

Груба И. И.

Системы охранной сигнализации

Технические средства обнаружения

Классификация средств обнаружения

Принципы действия

Сравнительные характеристики

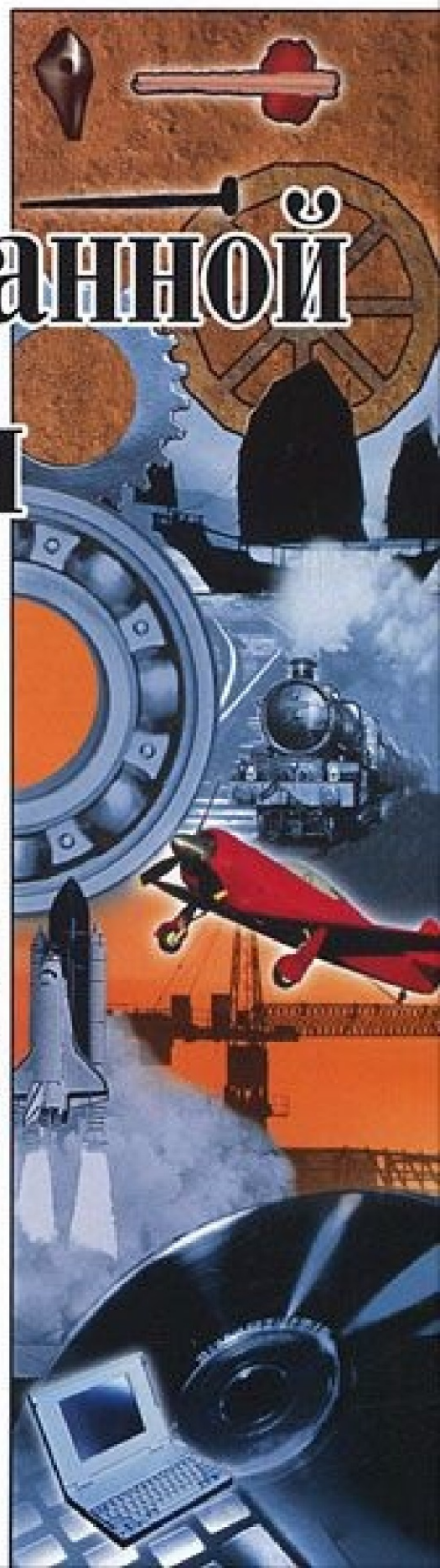
Типовые схемы использования

ISBN 5-91359-103-6



9 785913 591036

Пожалуйста, не забудьте!



Серия «Библиотека инженера»

Груба И. И.

Системы охранной сигнализации

Технические средства обнаружения

**Москва
СОЛОН-ПРЕСС
2012**

Груба И. И.

Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2012. — 220 с.: ил. —
Серия «Библиотека инженера»

ISBN 978-5-91359-103-6

Данная книга адресована всем, кто интересуется проблемами разработки, изготовления, проектирования, монтажа и эксплуатации средств и систем охранной сигнализации. Дано систематизированное описание большинства известных на настоящее время типов средств обнаружения. Приведены оценки уровней физических воздействий от обнаруживаемых объектов и от основных помеховых факторов. Представлены типовые схемы построения средств обнаружения и основных элементов, используемых в их составе. Описано устройство и даны сравнительные характеристики средств обнаружения различных принципов действия. Изложенный материал упорядочен, что позволяет использовать его в качестве справочного пособия. Книга представляет интерес как для начинающих, так и для квалифицированных инженеров и радиолюбителей, специализирующихся в области охранной сигнализации.

Сайт издательства «Ремонт и Сервис 21»: www.remserv.ru
Сайт издательства «СОЛОН-ПРЕСС»: www.solon-press.ru

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123001, Москва, а/я 82.
2. Оформить заказ можно на сайте **www.solon-press.ru** в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (499) 254-44-10, (499) 795-73-26.

Каталог издательства высылается по почте бесплатно.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса **www.solon-press.ru/kat.doc**.

Интернет-магазин размещен на сайте **www.solon-press.ru**.

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95,

www.aliants-kniga.ru

Предисловие

Охранная сигнализация привлекает активное внимание любителей электроники. Она познавательна, интересна и полезна, но в то же время и сложна. В ней тесно переплетаются многие разделы физики, математики, информатики, биологии, антропометрии, метеорологии. Большинство современных датчиков (преобразователей физических воздействий в электрический сигнал) отличается простотой и доступностью. Поэтому разработка и изготовление средств охранной сигнализации под силу любому радиолюбителю. Для этого необходима только определенная система в доступных сведениях, позволяющая ориентироваться в обилии различных технических решений, а иногда — просто знание терминологии для целенаправленного поиска в Интернете.

После изготовления своей конструкции обычно сам автор выступает в роли первого злоумышленника (или нарушителя), пытающегося преодолеть средство обнаружения (СО, извещатель). В случае удачного (с точки зрения автора) завершения эксперимента возникает естественный вопрос, сработает ли СО при появлении другого нарушителя, отличающегося массой, скоростью, одеждой, обувью? Сработает ли СО в другой обстановке (после его переноса в помещение большего или меньшего размера) или в других условиях? Не будут ли формироваться ложные срабатывания при появлении помеховых воздействий, таких как гроза, дождь, ветер, электромагнитные наводки, удар палкой, проход на некотором удалении постороннего человека, не имеющего злых намерений, или проезд автомобиля, троллейбуса, трамвая?

Ответ может дать оценка уровней воздействий от различных объектов и факторов с помощью подходящих уравнений физики, которая называется физической моделью обнаружения (ФМО). Выбор ФМО является основой для создания СО и в данном издании ему уделяется наибольшее внимание. Сложность заключается в том, что нарушитель — не шарик и не кубик, вписать его в уравнения физики в точном виде — весьма затруднительно. Но даже приблизительные оценки позволяют выявить основные закономерности сигналообразования и экстраполировать результаты отдельных частных экспериментов на множество более общих ситуаций. Выбор физической модели и ее интерпретация, а также систематизация СО по принципу действия не всегда однозначны и далее отражают личную точку зрения автора.

ФМО позволяет проследить непрерывную цепочку преобразований: параметры человека или помех — величина воздействия на чувствительный элемент (ЧЭ) — величина электрического сигнала на выходе ЧЭ и занимаемая им полоса частот — уровни сигналов на выходе электронного блока обработки — значения вероятности обнаружения (то есть вероятности срабатывания СО при появлении нарушителя) и вероятности ложного срабатывания (при воздействии помех). На каждом шаге преобразования можно дать количественные оценки диапазонов выходных уровней в зависимости от входных. ФМО помогает правильно подобрать подходящий ЧЭ или спроектировать и изготовить

его самостоятельно. Она дает возможность сравнивать уровни сигналов от человека и от помеховых воздействий, определять зависимости сигналов от параметров человека, выявлять возможные источники помех и определять методы борьбы с ними, оценивать потенциальную помехоустойчивость СО какого-либо типа и сравнивать физические принципы обнаружения между собой. Причем все это может быть сделано заранее, в тиши кабинета, до изготовления самого устройства.

Количественные оценки всегда наиболее сложны и ответственны, но именно они дают основу для практических приложений. Взяв в руки поваренную книгу и прочитав в ней стандартное «посолите по вкусу» или «варите до готовности», задумываешься, а кому она предназначена? Начинающего кулинара подобные фразы могут научить лишь на собственном горьком (или соленом) опыте, практикующий специалист и так все знает. Мне всегда казалось, что полезные сообщения должны быть максимально насыщены количественными оценками, хотя бы приблизительными, все же лучше, чем никакими. Данная книга дает именно такие оценки, получаемые на основе элементарных уравнений физики. Она предназначена в основном для любителей, знакомых с основами радиоэлектроники, впервые обратившихся к проблемам охранной сигнализации, и желающих выбрать направление для приложения своих сил к одному из многочисленных типов СО. Надеюсь, что и более опытные конструкторы, делающие в данной области не первый шаг, найдут в ней много интересного и полезного, что заставит их по-новому взглянуть на результаты своего труда, и возможно, усовершенствовать свои разработки. Главная цель данной книги состоит не в том, чтобы привести ряд более или менее удачных конструкций для повторения, а в том, чтобы увидеть в конкретном небольшом приборе проблему обнаружения в целом и проследить прохождение воздействий от начала их формирования до активации выходного сигнала. Зная весь путь, можно найти в нем узкие места, и определить меры по их преодолению.

Необходимость проведения большого количества разнообразных оценок приводит к обилию различных формул и расчетов. Если кому-то они покажутся излишне сложными или громоздкими, то можно пропустить сами формулы и выкладки, но обязательно обратить внимание на результаты вычислений и получаемые выводы. Везде, где это возможно, физические величины измеряются в единицах системы СИ.

На начальном этапе у человека, решившего самостоятельно собрать средство охранной сигнализации для установки дома или на даче, затруднения могут вызвать самые неожиданные вопросы — схема включения ЧЭ, согласование входных и выходных сопротивлений, необходимость настройки отдельных узлов, подавление радиочастотных помех на высокочувствительных входах и т.п. Особенно последнее — знаю по собственному опыту. Иногда важно представить себе сложность достижения поставленной цели и вовремя отказаться от выбранного пути, решив проблему другим способом. Поэтому описание ФМО плавно переходит в вы-

текающую из него типовую электронную схему, иллюстрирующую тот или иной принцип обнаружения. Учитывая ограниченный объем книги, схемы приведены в минимальном достаточном для понимания виде. Все приведенные схемы подготовлены специально для данного издания, они не соответствуют каким-либо конкретным моделям СО.

В приводимых схемах отсутствует много важных узлов и элементов: питания, резервного питания, контрроля, вскрытия, подавления специфических помех, настройки, индикации, оповещения. Без них невозможно представить себе законченное СО, но их разработка не представляет особой сложности. По этой причине печатные платы для схем не разрабатывались, предполагая их реализацию на макетных платах.

Хотелось бы сразу обратить внимание на то, что электронные схемы качественных СО многофункциональны и сложны. Следует предостеречь начинающих любителей от повторения схем датчиков, заполонивших страницы популярных журналов, основным достоинством которых является их реализация на одном транзисторе или на одной микросхеме (за исключением чисто познавательных целей). Простота хуже воровства. Экономия нескольких сотен рублей может стать причиной безвозвратной потери автомобиля, мотоцикла или содержимого сейфа, она же может привести к необходимости ежедневно настраивать СО или по несколько раз в день бегать на ложные срабатывания (не предполагая, что они ложные). Если регулировочный элемент выбранной конструкции служит для установки единственной рабочей точки, то скорее всего эта точка сместится при небольшом повышении температуры в комнате или изменении напряжения питания. В минимальном составе в СО должны вхо-

дить: ЧЭ, преобразующий физическое воздействие в электрический сигнал, усилитель этого сигнала с определенным коэффициентом усиления в заданной полосе частот и компаратор, срабатывающий при превышении определенного порога, то есть фактически – если превышен заданный уровень воздействия. Прежде всего СО должно обеспечивать удовлетворительные показатели обнаружения, и лишь потом его можно упрощать.

Хорошее СО всегда является результатом напряженной работы мысли. Оно – не просто пищалка, гуделка, квакалка или хрюкалка, а устройство, противостоящее разумному противнику. Можно дать количественные оценки уровней сигналов для различных ФМО, но нельзя научить думать. А думать надо о многом. Надо опередить нарушителя на один-два шага и выиграть партию, предусмотреть все возможные действия злодея и поставить на его пути препятствия, а также – предвидеть все его ответные шаги и также их пресечь. Поставить себя на место злоумышленника и себя же собственной мыслью преодолеть – только так можно получить хорошее СО. Нарушитель часто бывает знаком с промышленными образцами распространенных СО, но пасует перед неожиданным удачным техническим решением, придуманным и реализованным в своей конструкции обычным радиолюбителем, то есть человеком, любящим свое дело и способным защитить свою собственность.

Надеюсь, что данная книга будет полезна не только при изготовлении новых конструкций, но и при сравнении СО, их выборе, при определении мест установки, оценке качества работы, обслуживании и ремонте. Хотелось бы, чтобы прочитав ее, многие полюбили технику охранной сигнализации, как люблю ее я.

1. Основные понятия охранной сигнализации

1.1. Что такое средство обнаружения

С тех пор как появилась собственность, возникла необходимость ее охранять. В древние времена — от диких животных, а впоследствии — от все более умных людей. И если первоначально можно было обойтись крепкими дверями и замками, то сейчас уже невозможно представить себе систему безопасности без современных электронных приборов охранной сигнализации.

Главным элементом системы сигнализации является средство обнаружения (СО). Средство обнаружения — это прибор, предназначенный для формирования сигнала тревоги при появлении объекта обнаружения в заданной зоне, называемой зоной обнаружения (ЗО). Обычно объектом обнаружения (ОО) является человек и в этом случае он именуется нарушителем, злоумышленником или злодеем. Средство обнаружения называют также «датчиком», «извещателем», «сигнализационным датчиком», «детектором», «средством охранной сигнализации» или «сигнализатором», а сигнал тревоги — «срабатыванием» или «сработкой». Средство обнаружения состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), преобразующего воздействие от ОО в электрический сигнал, и блока обработки (БО), анализирующего этот сигнал и формирующего сигнал тревоги (рис. 1.1.1). Часто чувствительный элемент также называют «датчиком». Для того, чтобы избежать путаницы, следует использовать традиционный термин датчик только в случаях, исключая его неоднозначное понимание. В сомнительных случаях лучше заменять его терминами «чувствительный элемент» или «средство обнаружения» (или другими принятыми терминами). Сразу отметим, что средство обнаружения — понятие более широкое, чем датчик охранной сигнализации, поскольку оно предполагает обнаружение любого объекта, а не только человека-нарушителя.



Рис. 1.1.1 Средство обнаружения

Чувствительный элемент иногда называют «сенсором» или «детектором». Также можно встретить термины преобразователь, первичный преобразователь (ПП) или первичный измерительный преобразователь (ПИП), что особенно характерно для измерительной техники, где к входным элементам предъявляются особые метрологические требования. Многие ЧЭ, применяемые в СО, заимствованы из различных областей точного приборостроения, да и сами СО часто не только обнаруживают объект, но и измеряют параметры объекта или ведут обнаружение на основе оценки некоторых параметров. Поэтому, хотя и редко, термины преобразователь, ПП и ПИП можно встретить и в технике охранной сигнализации. Здесь и в дальнейшем автор уде-

ляет особое внимание терминологии, поскольку это не только способствует лучшему взаимопониманию между людьми, привыкшими обозначать одну и ту же сущность различными словосочетаниями, но и помогает более эффективно находить нужную информацию в Интернете или различных поисковых системах.

Основное назначение СО состоит в выдаче сигнала тревоги при вторжении нарушителя в охраняемую зону. Если при проходе нарушителя сигнал тревоги не будет выдан, такая ситуация называется пропуском нарушителя или ошибкой первого рода. Однако, не менее важно, чтобы СО не выдавало сигнал тревоги при отсутствии нарушителя. Если сигнал тревоги возникает при отсутствии нарушителя, такая ситуация называется ложной тревогой или ошибкой второго рода, а также — ложным срабатыванием или просто «ложняком». Попутно отметим, что рабочее состояние включенного датчика, когда сигнал тревоги отсутствует, но датчик готов к его выдаче, называется дежурным состоянием или дежурным режимом работы датчика. При этом особую сложность представляет тот факт, что между охраняемой зоной (которую в идеале должна полностью покрывать зона обнаружения датчика) и зоной свободного перемещения людей часто лежит очень узкая граница или ее вообще нет. Приведем несколько типичных примеров. Охраняемые помещения в здании отделены от коридора дверью или тонкой перегородкой, при этом комнаты часто сдаются под охрану не одновременно, а по коридору ночью могут ходить сами охранники. Территория посольства является территорией иностранного государства, мимо нее по тротуару ходят люди, а отделяет их тонкая решетка забора, через которую можно свободно просунуть руку, но любое преодоление забора должно быть обнаружено, ведь даже эта граница должна быть «на замке». Автомобильная сигнализация обязана включать сирену при попытке аккуратного снятия колеса, но молчать — при сильных случайных толчках.

Кроме основного назначения СО, от него часто требуется оценка и выдача дополнительной информации (рис. 1.1.1), такой как:

- исправность датчика и готовность к выдаче сигнала тревоги;
- наличие попыток вскрытия датчика с целью вмешательства в его работу;
- наличие повреждения сигнальной линии, т.е. линии передачи сигналов тревоги;
- отсутствие питания датчика, переход на резервное питание или разряд элементов питания, требующий их замену;
- распознавание типа объекта (человек, группа людей, транспорт, животное) или указание направления передвижения;
- указание параметров ОО (количества людей в группе, их скорости, траектории движения, местоположения, наличия оружия);
- степень достоверности сформированного сигнала тревоги; выдача дополнительной информа-

ции в виде аналогового сигнала (для его прослушивания или просмотра оператором с целью принятия окончательного решения).

Вся эта дополнительная сопутствующая информация может понадобиться только в случае проведения различных действий в ответ на различные сигналы. Вместе с тем ее разнообразие открывает обширное поле деятельности для тех, кто решил самостоятельно изготовить СО. Преодоление средств, выполненных по нестандартным нетиповым схемам построения, всегда представляет наибольшую сложность для нарушителя. Столкнувшись с неожиданным средством охраны, нарушитель либо будет терять значительное время на достижение своих целей, либо должен будет отказаться от своих намерений. Главная задача последующего изложения состоит не в том, чтобы привести несколько более или менее удачных электронных схем датчиков, а в том, чтобы показать, как самому сделать новое СО для определенных конкретных целей, затратив на его изготовление минимум сил и средств. Всегда необходимо помнить, что появление нарушителя – событие редкое, и СО должно быть готово к нему в любое время и в любых условиях. Необходимо сразу определить место установки датчиков там, где может появиться нарушитель: у дверей, на окнах, в коридорах. Кроме того, при разработке СО следует заранее решить, от какого нарушителя мы защищаемся: от простого пьяницы, вандала, квартирного вора, или подготовленного нарушителя, оснащенного техническими средствами для угона вашего конкретного автомобиля. При этом необходимо ориентироваться на определенные параметры нарушителя: диапазон скоростей и масс, позы передвижения, различные виды одежды и обуви.

Выбор датчиков, подходящих для конкретных целей применения, возможен только при условии полного представления обо всем многообразии существующих их типов. В случае самостоятельного изготовления СО необходимо знать параметры ОО и помеховых воздействий и четко представлять себе, чего можно ожидать от датчика того или иного типа, и каким образом добиться предъявляемых требований и обеспечить стабильность его работы.

Несмотря на важность места, занимаемого СО в системе сигнализации, само по себе оно не в состоянии решить ни одной из задач по охране собственности от нарушителя. Для полного решения задачи необходим ряд дополнительных средств. Перечислим основные из них. Средства питания служат для обеспечения длительной бесперебойной работы СО. Средства связи нужны для передачи сигналов тревоги по проводам, городским телефонным линиям или каналам сотовой связи. Средства обработки и отображения сигналов тревоги необходимы для звуковой и/или визуальной индикации состояния датчиков в пункте вневедомственной охраны или отделении милиции. Сирена или прожектор служат для непосредственного воздействия на нарушителя и предупреждения его действий. Вместе с дополнительными средствами СО решает определенную задачу противодействия нарушителю. В этом случае всю совокупность средств мож-

но назвать системой обнаружения или системой охранной сигнализации.

Средства питания, передачи сигналов, обработки, отображения, регистрации, проверки работоспособности часто выполняются в виде отдельного устройства, называемого пультом контроля, системой отображения информации (СОИ), системой сбора и обработки информации (ССОИ), приемной станцией или пультом отображения информации. Контрольный пульт устанавливается в помещении вневедомственной охраны или в сторожке дачного товарищества. При небольших объемах охраны (один коттедж или один автомобиль) все необходимые вспомогательные средства могут включаться непосредственно в состав самого СО. При больших объемах охраны или при желании обеспечить гибкость системы необходимо разрабатывать отдельные СО с учетом определенных правил и требований для возможности последующей интеграции датчиков в целостную систему охраны. Для создания хорошего средства необходимо четко представлять, каким образом оно будет взаимодействовать с другими составными частями системы, как работает система в целом и учитывать возможность модернизации, совершенствования и замены отдельных блоков системы. Ключевым вопросом разработки системы охранной сигнализации всегда является вопрос проведения ответных действий по сигналам тревоги, получаемым от датчиков. Именно с его решения и с определения задач охраны должно начинаться проектирование системы, даже если она состоит всего из одного датчика. Цель охраны состоит не в том, чтобы поймать нарушителя, а в том, чтобы успеть предотвратить его действия и сохранить защищаемую собственность.

Существует ряд устройств, не связанных непосредственно с системой охранной сигнализации. Однако они также предназначены для решения задач обеспечения безопасности. К ним относятся:

- средства физической защиты (замки, решетки, заборы, колючая проволока, бронированные двери и стены), которые сдерживают продвижение нарушителя и на преодоление которых он вынужден тратить дополнительное время;
- средства наблюдения или проверки сигналов тревоги, такие как камеры видеонаблюдения или микрофоны прослушивания, включаемые по сигналам тревоги;
- системы контроля управления доступом (контрольно-пропускные системы);
- товарные метки, прикрепляемые к товарам против их выноса из магазина;
- детекторы металла, взрывчатых веществ или других опасных материалов.

Наличие указанных дополнительных средств обеспечения безопасности на конкретном объекте охраны имеет большое влияние на организацию системы охранной сигнализации и также должно учитываться при выборе датчиков. Средства обнаружения – это те кирпичики, которые лежат в фундаменте системы охранной сигнализации. Чтобы здание получилось крепким, их следует точно подогнать друг к другу, а для этого – четко знать, какими они бывают.

1.2. Типы средств обнаружения

Знание классификации СО позволяет осуществлять обоснованный выбор датчиков для конкретных целей применения. При всем своем многообразии средства обнаружения делятся по различным признакам на ряд типов.

По принципу действия или, точнее, по характеру взаимодействия ОО с ЧЭ все СО делятся на пассивные и активные. ЧЭ пассивного СО воспринимает воздействия или излучение, исходящие непосредственно от нарушителя (например, механические воздействия или тепловое излучение), либо естественные виды излучения, рассеиваемые нарушителем (например, естественный свет). Пассивное СО ничего не излучает в пространство. ЧЭ активного СО воспринимает собственное искусственное излучение после его взаимодействия с ОО. Источник собственного излучения называется передатчиком или излучателем, а в случае его размещения в отдельном корпусе — передающим блоком. Если передатчик и приемник излучения находятся в одном корпусе, средство обнаружения называется однопозиционным; если в двух различных корпусах — двухпозиционным; если более чем в двух корпусах (например, когда СО выполнено в виде одного передающего и нескольких приемных блоков) — многопозиционным. В случае, если необходимо подчеркнуть, что передающие и приемные блоки закреплены стационарно и в процессе работы не меняют своего положения и ориентации, термины двухпозиционный и многопозиционный могут заменяться на бистатический и мультистатический соответственно. Выбор достаточно высокой мощности излучателя активного СО позволяет обеспечивать ему высокую помехоустойчивость. Преимущество же пассивного СО состоит в том, что оно не может быть обнаружено по характерному излучению передатчика.

Среди активных СО можно выделить две большие группы. СО первой группы постоянно воспринимают собственное излучение передающего блока, которое при появлении нарушителя частично или полностью перекрывается. Такие СО называются лучевыми (рис. 1.2.1). СО второй группы воспринимают излучение, отраженное от нарушителя при его появлении (рис. 1.2.2).

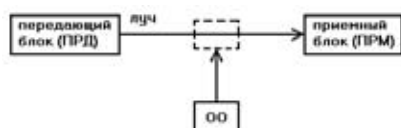


Рис. 1.2.1 Лучевое активное СО

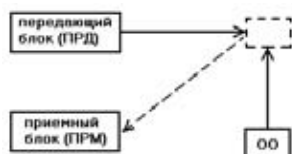


Рис. 1.2.2 Активное СО с отражением

Лучевые СО позволяют блокировать протяженные участки рубежа охраны длиной до нескольких сотен метров и имеют высокие значения показателей обнаружения, так как на приемник поступает значительная доля излучаемой энергии. Однако, они требуют прокладки отдельного кабеля как к приемнику так и к передатчику, подготовки местности (выравнивания поверхности грунта, вырубки деревьев и кустарников, скашивания травы) и юстировки (подстройки направления передающего и приемного блоков строго друг на друга вдоль соединяющей их прямой линии) во время установки и в процессе эксплуатации.

Активное СО с отражением чрезвычайно удобно при монтаже в случае совмещения передатчика и приемника в одном блоке. Однако, излучение передатчика используется неэффективно, так как отраженная от ОО энергия излучения в основном рассеивается в пространстве.

Задача. Может ли быть реализовано однопозиционное лучевое СО, предложите вариант реализации. (Ответ: может. Совет: используйте зеркало.)

Задача. Может ли лучевое СО иметь непрямолинейный рубеж охраны? (Ответ: может. Совет: используйте зеркало. Примечание: есть и другие решения.)

По условиям использования или месту установки все СО делятся на наружные и внутренние. Наружные СО, называемые также уличными или внешними, предназначены для установки вне помещений на улице. Внутренние СО предназначены для установки внутри помещений, которые могут быть как отапливаемыми так и неотапливаемыми. Предназначенные для отапливаемых помещений внутренние СО называются также комнатными СО.

По форме и размерам зоны обнаружения датчики делятся на точечные, линейные (или протяженные), площадные (или поверхностные) и объемные. Точечное СО имеет небольшую зону обнаружения размером не более 1...2м и служит для охраны отдельного предмета: сейфа, картины, шкафа. Линейное СО имеет ЗО, сильно вытянутую в одном направлении, длина ее составляет от нескольких метров до нескольких сотен метров, а поперечные размеры — от нескольких сантиметров до нескольких метров, при этом поперечные размеры всегда существенно меньше длины. Одним из примеров линейного СО может служить лучевое СО. Линейные СО служат в основном для охраны коридоров, участков периметров объектов и протяженных рубежей. Наружные линейные СО называются периметровыми или реже — периметральными. Площадные СО предназначены для охраны участков поверхности, например, стен комнат от проламывания, и имеют ЗО длиной и шириной от одного до нескольких десятков метров при толщине от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. В настоящее время площадные СО почти не используются, так как полностью вытеснены менее трудоемкими в установке объемными СО. Объемные СО имеют трехмерную зону обнаружения с линейными размерами от нескольких

метров до нескольких десятков метров. Они используются преимущественно для охраны отдельных помещений и замкнутых объемов.

По конструктивным признакам СО бывают заградительными, если их ЧЭ выполнен в виде физического препятствия (забора, решетки, защитной пластины) на пути нарушителя, и незаградительными. Заградительные СО позволяют не только обнаруживать, но и на некоторое время задерживать нарушителя. Незаградительные СО существенно дешевле и менее заметны.

По возможности скрытной установки СО они делятся на визуально маскируемые (или просто маскируемые) и немаскируемые. Маскируемые СО незаметны для нарушителя после завершения процесса их установки. Преимущество маскируемых СО заключается в том, что неподготовленный нарушитель не может определить положение зон обнаружения с тем, чтобы попытаться обойти их. В то же время немаскируемые СО часто используются специально, чтобы показать возможному нарушителю, что объект находится под охраной. С этой же целью на корпусе датчика размещают хорошо видимый издалека светодиод, который своим свечением дублирует сигнал тревоги. Выбор маскируемых или немаскируемых СО для системы охраны целиком зависит от того, каким образом будет организована система ответных действий по сигналам срабатывания.

По количеству выходных сигналов тревоги СО делятся на обнаруживающие (или обнаружительные) — при наличии единственного выходного сигнала тревоги — и распознающие, в которых количество выходных сигналов более одного и соответствует количеству распознаваемых объектов. Обычно задача обнаружения и задача распознавания решаются последовательно, поэтому СО имеет выход общей тревоги — выход обнаружения, появление сигнала на котором сопровождается указанием типа цели на другом выходе — выходе распознавания. Необходимость распознавания СО возникает только тогда, когда для различных объектов обнаружения (скажем, одиночного нарушителя или группы людей) предполагается проводить различные ответные действия.

По виду выходного сигнала СО подразделяются на релейные и аналоговые. Релейное СО выдает сигнал тревоги, имеющий два состояния: наличие тревоги и ее отсутствие, — чаще всего путем размыкания нормальнозамкнутых контактов реле, реже — замыканием нормально разомкнутых контактов. Аналоговое СО выдает непрерывный аналоговый сигнал, который может принимать любое значение из определенного диапазона. Аналоговый сигнал предназначен для прослушивания или просмотра оператором. При этом вместе с аналоговым сигналом обычно передается и релейный сигнал тревоги, необходимый для привлечения внимания оператора.

По характеру выходного релейного сигнала СО делятся на датчики движения (перемещения) и датчики присутствия (наличия). Первые формируют сигнал срабатывания только в ответ на движение ОО и не реагируют на неподвижные объекты. Вторые активируют сигнал срабатывания в течение всего времени нахождения ОО в пределах ЗО.

По типу связи между СО и средствами оповещения они делятся на проводные СО и беспроводные СО со связью по радиоканалу. Кроме того, проводные СО могут быть многопроводными (с передачей сигнала тревоги и каждого дополнительного сигнала по отдельной паре проводов) и СО с кодированием информации (с передачей множества различных сигналов в кодированном виде по одной паре проводов). Проводные СО обеспечивают более надежную передачу информации и дают возможность непрерывного контроля линии связи, поэтому они всегда предпочтительнее беспроводных. Беспроводные СО осуществляют связь на радиочастотах и используются в двух случаях:

- при необходимости передачи информации на большие расстояния в связи с дороговизной прокладки кабеля;
- при невозможности установки проводной связи, например, при нежелании нарушать интерьер охраняемого помещения или при охране подвижных объектов.

Подавляющее большинство СО относится к незаградительным, немаскируемым, обнаруживающим, релейным, многопроводным.

Наиболее полное представление обо всем многообразии СО дает их классификация по физическому принципу обнаружения. Для того, чтобы нарушитель был обнаружен, необходимо, чтобы какое-либо физическое воздействие от него поступило на ЧЭ. В акте передачи воздействия, кроме ОО и ЧЭ, участвуют также среда, то есть все окружающие и находящиеся между ними материальные объекты, и собственно материальный носитель информации (МНИ), непосредственно воздействующий на ЧЭ (рис. 1.2.3).

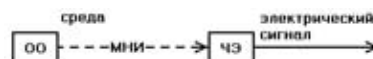


Рис. 1.2.3 Передача воздействия от ОО к ЧЭ

При этом возможны следующие варианты передачи воздействия (рис. 1.2.4):

- за счет непосредственного механического контакта ОО и ЧЭ без участия среды;
- в случае передачи воздействия через среду материальным носителем информации может служить сама среда или отдельные ее элементы — земля, вода, воздух, грунт, пол помещения, стены здания, забор, охраняемые предметы, сейфы, витрины, стеллажи; при этом воздействие может передаваться изменением давления или колебаниями среды (твердой, жидкой или газообразной), теплопередачей или электрическим током в среде (твердой или жидкой);
- в случае передачи воздействия через проницаемую среду (воздух или воду, если обнаружение идет под водой) сквозь нее могут перемещаться материальные объекты (частицы вещества, газы или радиоактивные частицы) или в ней могут распространяться поля (электрическое, магнитное или гравитационное) или электромагнит-

ные волны различных частотных диапазонов; поля и электромагнитные волны могут проникать и сквозь твердые среды.



Рис. 1.2.4 Возможные варианты передачи воздействия

В нижнем ряду рисунка 1.2.4 показаны все возможные пути передачи воздействия от обнаруживаемого объекта к ЧЭ, которые могут использоваться для целей обнаружения. Давление среды является, без сомнения,

всего лишь низкочастотной составляющей колебательного процесса, однако его следует рассматривать отдельно от последнего, так как оно часто требует для своего восприятия специальных ЧЭ и иной обработки сигналов. По понятным причинам, из рассмотрения исключены такие виды МНИ, как поля сильного и слабого взаимодействий.

Таким образом, можно выделить 21 вид МНИ, пригодных для решения задач обнаружения. Каждому виду МНИ соответствуют СО определенных типов. Всего можно насчитать 28 основных самостоятельных типов СО. Классификация СО по физическому принципу действия приведена в таблице 1.2.1.

Электромеханическое СО воспринимает непосредственное механическое воздействие от нарушителя (в виде перемещения рабочего органа датчика) и преобразует его в сигнал размыкания или замыкания контактов внешней электрической цепи. Электромеханические СО делятся на следующие три подтипа:

- электроконтактное СО, которое содержит в качестве ЧЭ электрическую кнопку или переключатель, например, кнопку открывания двери, переключатель положения ригеля замка, тревожную кнопку нападения на кассира;

Таблица 1.2.1. Классификация СО по физическому принципу действия

Среда	Материальный носитель информации	Тип СО
Без посредства среды	1. Непосредственное механическое контактное воздействие	1. Электромеханическое 1.1. Электроконтактное 1.2. Магнитоконтактное 1.3. Электрообрывное
		2. Тензометрическое
Твердая среда (земля, грунт, пол, забор, ограждение)	2. Давление	3. Протяженный датчик давления 4. Наклонометрическое
	3. Колебания	5. Вибрационное 5.1. Виброконтактное 5.2. Пьезоэлектрическое 5.3. Аналоговое 5.4. Трибоэлектрическое 5.5. Электретное 5.6. Оптоволоконное
		6. Сейсмическое
		4. Теплопередача
	5. Электрический ток	7. Термическое
Воздух	6. Давление	8. Шаговое
	7. Акустические колебания	9. Барометрическое
		10. Акустическое пассивное 10.1. Микрофонное 10.2. Датчик разбивания стекла
Воздух (проницаемая среда)	8. Макроскопические частицы	11. Акустическое активное 11.1. Лучевое 11.2. Доплеровское 11.3. Объемное
	9. Газы	-
	10. Радиоактивные частицы	12. Ольфактронное 13. Радиационное
Воздух (среда распространения полей)	11. Электрическое поле	14. Электростатическое
	12. Магнитное поле	15. Магнитометрическое 15.1. Точечное 15.2. Петлевое
	13. Гравитационное поле	16. Гравиметрическое

Таблица 1.2.1. Классификация СО по физическому принципу действия (окончание)

Среда	Материальный носитель информации	Тип СО
Воздух (непроводящая среда, прозрачная для электромагнитных волн)	14. Низкочастотные волны (длина волны $10^1...10^4$) м	-
	15. Радиоволны ($10^4...10^{-1}$) м	17. Емкостное
		18. Индуктивное
		19. Проводно-волновое
		20. Линия вытекающей волны
		21. Антенное
	16. Ультрарадиоволны ($10^{-1}...10^{-3}$) м	22. Радиолучевое
		23. Радиолокационное
		24. Радиометрическое
	17. Инфракрасные лучи ($10^{-3}...0,78 \times 10^{-6}$) м	25. Инфракрасное пассивное
		25.1. Однолучевое
25.2. Многолучевое		
25.3. Тепловизионное		
26. Фотолучевое		
27. ИК активное с отражением		
18. Световые лучи ($0,78 \times 10^{-6}...0,38 \times 10^{-6}$) м	(26. Фотолучевое)	
	28. Телевизионное	
19. Ультрафиолетовые лучи ($0,38 \times 10^{-6}...10^{-9}$) м	(26. Фотолучевое)	
20. Рентгеновские лучи ($10^{-9}...10^{-12}$) м	-	
21. Гамма-лучи ($10^{-12}...10^{-14}$) м	(13. Радиационное)	
Различные	Различные	29. Прочие
Любая	Сочетание двух или более из двадцати одного указанного выше МНИ	30. Комбинированные

— магнитоконтактное СО, чувствительным элементом которого является герметичный контакт — геркон, который срабатывает при приближении или удалении от него магнита; магнит может устанавливаться в двери, а геркон — в дверном косяке; магнитоконтактное СО обладает большей надежностью по сравнению с электроконтактным СО;

— электрообрывное СО, вырабатывающее сигнал тревоги при обрыве электрической цепи во время разрушения ЧЭ: наклеиваемой на окно фольги, токопроводящего стекла, замурованной в стену проволоки, проводящих нитей полотна забора при их перекусывании, натянутого над полом или лежащего на траве тонкого провода.

Общее достоинство электромеханических СО — их предельная простота. Им не нужен блок обработки сигналов и источник питания. Они легко устанавливаются, а после установки — незаметны. Недостатком электромеханических СО является их низкая аппаратная надежность, а электрообрывные СО — фактически одноразовые. Наиболее широко используются магнитоконтактные СО.

Тензометрическое СО представляет собой шаг вперед по сравнению с электромеханическим СО, так как его ЧЭ позволяет измерять силу воздействия от ОО и сравнивать ее с устанавливаемым пороговым значением. В качестве ЧЭ тензометрического СО может использоваться тензорезистор, натянутый провод, контактный коврик. В случае натянутого провода оно называется

также датчиком натяжения. Область применения тензометрических СО ограничена установкой внутри помещений или на заборе, так как их работе сильно мешают снег и обледенение.

Протяженный датчик давления — это датчик, воспринимающий деформацию внутри грунта, вызванную изменением давления на поверхность грунта при наступании человека. Обычно его ЧЭ выполнен в виде длинного эластичного шланга, заполненного незамерзающей жидкостью и закопанного на небольшую глубину в грунт. Протяженный датчик давления называют также барометрическим датчиком, шланговым СО, инфранизкочастотным (ИНЧ) сейсмическим СО, гидравлическим СО.

Наклонометрическое СО измеряет изменение угла наклона поверхности земли. Под действием силы тяжести ОО поверхность прогибается, и угол наклона меняется. При превышении измеренным значением порогового уровня инициируется сигнал срабатывания. Ввиду низкой чувствительности наклонометрическое СО применяется для обнаружения объектов, обладающих большой массой.

Действие вибрационного СО основано на регистрации колебаний, возникающих в результате контакта с нарушителем в окружающих твердых предметах, таких как забор, решетка, стена, охраняемый предмет, сейф, витрина. По используемому ЧЭ вибрационные СО делятся на шесть подтипов:

— виброконтактное СО имеет ЧЭ, механически замыкающий и размыкающий внешнюю элект-

- рическую цепь под действием вибрации; в качестве чувствительного элемента могут использоваться герконы определенных типов, незакрепленный шарик на проводящей опоре, ртутный контакт;
- вибрационное аналоговое СО имеет ЧЭ, формирующий на своем выходе аналоговый электрический сигнал, пропорциональный смещению или ускорению колебаний; ЧЭ, измеряющий ускорение, называется акселерометром; ЧЭ вибрационного аналогового СО обычно состоит из неподвижной катушки и подвижного магнита, взаимное перемещение которых наводит в катушке ЭДС; подобный датчик называется также электродинамическим датчиком или контактным микрофоном (особенно в случае закрепления датчика непосредственно на охраняемом предмете – сейфе, произведениях искусства и т.п.);
 - оптоволоконное СО использует в качестве датчика вибрации обычное оптоволокно, поскольку при передаче через него оптического сигнала его величина меняется, хотя и незначительно, при изгибах кабеля;
 - пьезоэлектрическое СО использует пьезоэлектрический элемент;
 - трибоэлектрическое СО использует многожильный кабель некоторых типов, при механической деформации которого на его жилах возникают заряды, пропорциональные деформации;
 - электретное СО использует электретный кабель, представляющий собой коаксиальный кабель с радиально поляризованным диэлектриком (электретом), также формирующим заряд при механической деформации; электретный кабель обладает существенно большей чувствительностью по сравнению с трибоэлектрическим.

Принцип действия сейсмического СО основан на регистрации колебаний грунта, возникающих при передвижении ОО. В качестве ЧЭ обычно используется сейсмометрический датчик – геофон – точечный магнитоэлектрический датчик колебаний повышенной чувствительности, который закапывается на небольшую глубину в землю. Часто точечные сейсмодатчики соединяются последовательно в одну группу. Подобная группа служит самостоятельным чувствительным элементом, называемым сейсмолинией, сейсмокозой или просто косой. Точечный сейсмодатчик позволяет блокировать отдельную дорожку или тропинку, сейсмолиния – протяженный рубеж большой длины. Достоинство сейсмического СО – полная маскируемость, недостаток – низкая помехоустойчивость во время сильного ветра при наличии деревьев или другой растительности, а также от транспорта.

Термическое СО воспринимает воздействие высокой температуры и предназначено для обнаружения попыток применения нарушителем инструмента термической резки (типа газовой горелки) для проделывания проходов или вскрытия хранилищ ценностей. Оно устанавливается на стальные решетки, перегородки,

двери, сейфы, негорюемые шкафы. Термическое СО отличается дешевизной и высокой помехоустойчивостью.

Шаговое СО контролирует сопротивление грунта, которое при передвижении человека периодически шунтируется его шаговым сопротивлением. Появление сигнала с шаговой частотой инициирует сигнал срабатывания.

Барометрическое СО носит также название инфразвукового датчика. Оно предназначено для охраны закрытых объемов и действует за счет регистрации изменения давления воздуха, например, при открывании дверей или окон помещения. Одним таким средством можно охранять небольшой коттедж или садовый домик, если в них отсутствуют устройства вентиляции или включенные кондиционеры.

Принцип действия акустического пассивного СО основан на приеме звуковых колебаний определенного диапазона частот и сравнении их интенсивности с заданным пороговым значением. Акустические пассивные СО бывают двух основных видов, отличающихся полосой принимаемых частот. Среднечастотные, называемые также микрофонными или звуковыми СО, срабатывают от шумов, возникающих при появлении и передвижении нарушителя (шаги, голос). Высокочастотные срабатывают от звуков разбивания стекла и часто так и называются – датчики разбивания стекла.

Акустические активные СО работают преимущественно в области ультразвуковых колебаний (15...40 кГц) и поэтому называются также ультразвуковыми (УЗ) датчиками. Они состоят из излучателя и приемника ультразвука. Акустические активные СО подразделяются на три подтипа: лучевое СО, фиксирующее прерывание узконаправленного УЗ луча; доплеровское СО, обнаруживающее нарушителя по доплеровскому сдвигу частот при его движении; объемное СО, регистрирующее изменение картины стоячих волн, формируемых излучателем ультразвука в замкнутом объеме. Все акустические СО работают только в помещениях, так как на улице имеют низкую помехоустойчивость.

Ольфактронное СО воспринимает запахи или газы, выделяемые человеком. Оно называется также газоанализаторным. Широкому распространению ольфактронных СО мешает их высокая стоимость.

Радиационное СО (или радиоизотопное СО) регистрирует интенсивность потока радиоактивных частиц (альфа-, бета-, гамма-частиц, протонов, нейтронов), излучаемых передающим блоком. Источником излучения является радиоактивный изотоп. Радиационное СО работает по принципу лучевого и фиксирует появление ОО по ослаблению потока частиц. Оно не требует прокладки кабеля к передающему блоку. Радиационные СО отличаются высокой помехоустойчивостью, но их распространению мешают соображения безопасности для здоровья людей.

Электростатическое СО обнаруживает появление в своей ЗО объектов, обладающих зарядом. Оно практически полностью теряет работоспособность на улице во влажные периоды времени из-за значительного стекания заряда на землю. Но в сухих помещениях, осо-

бенно с покрытием пола линолеумом, дает хорошие результаты. В связи с сильным уменьшением электростатического поля заряда при увеличении расстояния от него, СО данного типа используются преимущественно в узких проходах, дверных и оконных проемах.

Магнитометрические СО контролируют искажения естественного магнитного поля Земли и поэтому преимущественно фиксируют перемещение объектов, обладающих магнитным моментом. Значительная часть магнитометрических СО использует явление магнитной индукции, состоящее в появлении наведенной ЭДС в многовитковой катушке при изменении индукции магнитного поля; эта часть магнитометрических средств называется индукционными магнитометрическими СО. По виду ЧЭ магнитометрические СО делятся на два подтипа: точечное или сосредоточенное имеет компактный ЧЭ размером не более 0,1 м в виде катушки из нескольких тысяч витков провода на ферромагнитном сердечнике; петлевое имеет ЧЭ в виде петли многожильного кабеля, распянного в виде многовитковой катушки и закопанного на небольшую глубину в грунт. Точечное СО может быть выполнено также на основе феррозонда, тонких магнитных пленок (ТМП) или сквида. Оно используется в узких коридорах и проходах или вблизи дорог — для обнаружения автомобилей. Петлевое СО используется для охраны протяженных рубежей периметра.

Принцип действия гравиметрического (или гравитационного) СО основан на регистрации изменений гравитационного поля. Гравитационным полем обладают все материальные объекты, имеющие массу. Гравитационное поле не экранируется, поэтому ни один нарушитель не в состоянии скрыть или замаскировать свое присутствие. У гравиметрического СО есть только один недостаток — его пока нет.

Емкостное СО измеряет емкость антенной системы, в качестве которой может выступать и металлический забор, и козырек на стене здания, и стальной сейф, и металлический стеллаж, и закрепленная на охраняемом предмете металлическая пластина. При приближении к ним человека емкость антенной системы меняется, что и приводит к срабатыванию средства. Тело человека имеет большое значение относительной диэлектрической проницаемости, поэтому емкость меняется значительно, а изменение емкости фиксируется уверенно. Емкостные средства широко распространены. Для устойчивой работы они требуют наличия качественного заземления.

Индуктивное СО, как и емкостное, имеет антенную систему и фиксирует изменение ее индуктивности при появлении человека. Изменение индуктивности обычно невелико, поэтому индуктивные СО имеют невысокую помехоустойчивость и малое распространение по сравнению с емкостными.

Проводно-волновое СО содержит передатчик и приемник электромагнитного излучения с проводными антеннами, расположенными на небольшом расстоянии друг от друга. Оно работает на частотах диапазона 100 МГц. В случае приближения человека изменяется амплитуда и фаза принимаемого сигнала. Эти

изменения отслеживаются электронным блоком обработки СО. Проводно-волновое СО применяется и как точечное для охраны отдельных предметов, и как протяженное.

Линия вытекающей волны (ЛВВ) содержит один излучающий кабель и один или несколько приемных кабелей, уложенных на небольшом расстоянии параллельно излучающему кабелю. Длина кабелей — до 100 м. Как излучающий так и приемный кабель представляют собой коаксиальный кабель с прорезями в сплошном экране, проделанными через равные расстояния. Наличие прорезей обеспечивает равномерное излучение и прием электромагнитных волн вдоль всей длины кабеля. При появлении нарушителя вблизи кабелей изменяется уровень принимаемого сигнала. Кабели могут закрепляться на полотне забора, на стене или закапываться на небольшую глубину в грунт. ЛВВ позволяет охранять непрямолинейные участки периметра.

Антенное СО является чисто пассивным средством, работающим в диапазоне УКВ (на частотах около 100 МГц). Выбор диапазона связан с наличием «естественного» фона от большого количества радиовещательных станций. Приемник средства выполняется как обычный УКВ приемник. Во время приближения человека к антенне уровень принимаемого сигнала периодически увеличивается и уменьшается. Недостатком антенного СО является неустойчивость его работы и нестабильность параметров в зависимости от места установки. Возможные перспективы связаны с переходом на диапазоны сотовой связи.

Радиолучевое СО имеет в своем составе передатчик и приемник электромагнитного излучения, работающие на одной из фиксированных частот в диапазоне от 1 до 60 ГГц. Передатчик и приемник направляются друг на друга. В дежурном режиме приемник регистрирует излучение передатчика. При появлении в зоне луча (между передатчиком и приемником) нарушителя принимаемое излучение ослабляется за счет частичного перекрытия луча, что и фиксируется средством. Длина участка между передатчиком и приемником может достигать сотен метров. Радиолучевое СО — одно из наиболее широко распространенных средств для охраны периметров. Оно отличается высокой помехоустойчивостью к естественным погодным условиям (дождь, снег, туман).

Принцип действия радиолокационного СО основан на эффекте Доплера. Оно обычно является однопозиционным и содержит в одном корпусе излучатель электромагнитных колебаний частотой около 10 ГГц, приемник и блок обработки, выделяющий доплеровскую частоту и проводящий в простейшем случае селекцию объектов по скорости передвижения. В более сложных вариантах радиолокационное СО проводит также селекцию по дальности до ОО. Радиолокационные СО используются как для охраны помещений так и для охраны периметров.

Радиометрическое СО является объемным средством. Оно содержит передатчик электромагнитного излучения, создающий в замкнутом объеме картину

стоячих волн, и приемник электромагнитного излучения, фиксирующий изменения этой картины при появлении нарушителя. Радиометрическое СО для помещений является одним из наиболее помехоустойчивых типов СО.

Проводно-волновое СО, ЛВВ, радиолучевое СО, радиолокационное СО и радиометрическое СО часто называют также радиотехническими СО или радиоволновыми СО. Радиолучевое СО, радиолокационное СО и радиометрическое СО называют также микроволновыми датчиками или сверхвысокочастотными (СВЧ) датчиками.

Инфракрасное (ИК) пассивное СО воспринимает естественное тепловое излучение человека. Оно работает в диапазоне длин волн электромагнитного излучения около 10 мкм. Высокая чувствительность датчиков позволяет фиксировать перепады температур до 0,1 К. ИК пассивные СО делятся на три подтипа:

- однолучевое, имеющее ЗО в виде узкого луча, формируемого оптической системой (линзой или зеркалом);
- многолучевое, ЗО которого формируется специальными линзами Френеля; сигнал тревоги в многолучевом СО возникает только при последовательном пересечении нарушителем нескольких лучей, благодаря чему достигается высокая помехоустойчивость средства;
- тепловизионное содержит не один, а целую матрицу элементов, чувствительных к ИК излучению, что позволяет получать изображение, аналогичное телевизионному.

Многолучевые ИК пассивные СО широко распространены для охраны помещений.

Фотолучевое СО (или по-другому оптическое СО или инфракрасное активное СО) состоит из излучателя и приемника, направленных друг на друга. При прерывании луча формируется сигнал тревоги. Фотолучевое СО работает обычно в диапазоне ИК излучения. Реже встречаются СО в диапазонах видимого света или ультрафиолетового (УФ) излучения. Но и в этом случае их все равно называют фотолучевыми или оптическими СО (или УФ активными СО – для случая УФ излучения). Часто фотолучевые СО имеют не один, а сразу несколько лучей, что позволяет исключить возможность проползания под лучом или перепрыгивания через него, повысить помехоустойчивость средства и оценивать размеры и скорость движения объекта (для отстройки от птиц и мелких животных). Фотолучевые СО отличаются дешевизной, но при использовании на улице требуют запаса мощности излучателя для работы в сильный дождь, туман или снегопад. Они нуждаются в периодической юстировке передающего и приемного блоков и чистке оптических элементов.

ИК активное СО с отражением состоит из передатчика и приемника, направленных на определенную точку пространства. В дежурном режиме излучение передатчика рассеивается в пространстве и не доходит до приемника. При появлении ОО в заданной точке, отраженное от него излучение поступает на приемник, что приводит к формированию сигнала тревоги. СО

данного типа обычно реализуется в виде однопозиционного средства.

Под телевизионным СО понимается устройство, которое анализирует изображение с видеокамеры и формирует сигнал тревоги. Чаще всего данный сигнал используется для привлечения внимания оператора в случае изменения изображения. Телевизионное СО может быть как пассивным, работающим при естественном освещении, так и активным (с искусственной подсветкой). Телевизионные средства видеонаблюдения применяются повсеместно как для охраны помещений, так и для охраны уличных объектов.

К прочим СО относятся редкие, не нашедшие использования в виду дороговизны, работающие в ограниченных условиях применения и другие СО, не сформировавшиеся в отдельные типы.

Комбинированные СО – это СО, сочетающие в себе несколько различных физических принципов обнаружения. Все ЧЭ, входящие в состав комбинированного СО, должны иметь совмещенные зоны обнаружения и по возможности разные виды помех, способных вызывать сигналы ложной тревоги. Наиболее распространенными комбинациями являются сейсмомагнитометрическое СО и сочетание ИК пассивного и радиолокационного доплеровского СО. В случае сочетания двух физических принципов комбинированные датчики называются также датчиками двойной технологии. Комбинированные СО создаются с целью повышения помехоустойчивости, благодаря формированию общего сигнала тревоги только при подтверждении сигналов срабатывания по всем каналам обнаружения. Комбинированные СО практически не имеют ложных срабатываний.

Комбинированные СО нельзя считать самостоятельным типом средств при их делении по физическому принципу действия. Таким образом, можно говорить о 28-и различных типах средств обнаружения, используемых в системах охранной сигнализации. На настоящий момент наиболее широкое распространение получили СО следующих типов:

- магнитоконтактные – для охраны дверей помещений;
- тензометрические – для охраны отдельных предметов, преимущественно произведений искусства, внутри помещений;
- акустические пассивные – для защиты окон помещений от разбивания;
- емкостные – для установки на заборе или ограждении;
- радиолучевые – для охраны участков периметра;
- радиолокационные доплеровские и ИК пассивные – для установки внутри помещений;
- телевизионные – в качестве средств видеонаблюдения.

Может создаться впечатление, что кроме описанных 28-и типов СО других нет и быть не может, поскольку нет других МНИ (кроме приведенных в таблице 1.2.1). Однако, это не так. Во-первых, вспоминая, что все СО делятся на пассивные и активные, ожидать по-

явления новых типов пассивных СО действительно не следует. Во-вторых, среди активных СО одному и тому же МНИ могут соответствовать несколько различных физических эффектов, лежащих в основе обнаружения, которым следует ставить в соответствие различные типы СО. Так, наличие емкостного средства не стало препятствием для появления индуктивного средства, имеющего тот же МНИ. Приведенная классификация не претендует на полноту. В-третьих, в таблице 1.2.1 молчаливо предполагалось, что для активного СО тип МНИ, излучаемый передатчиком и действующий на нарушителя, и тип МНИ, идущий от нарушителя и воспринимаемый ЧЭ, — это один и тот же тип. Для лучевых СО, конечно, не может быть по-другому. В общем же случае для активных СО, не являющихся лучевыми, таблица, аналогичная таблице 1.2.1, должна содержать не 21 строку (по числу типов МНИ), а 21×21 (по числу их попарных комбинаций: один МНИ излучается передающим блоком средства, а другой МНИ принимается приемным блоком). Например, возможна такая комбинация: МНИ номер 8 (нумерация МНИ — по таблице 1.2.1) для воздействия на нарушителя и МНИ номер 7 для приема. Если это представляется слишком жестоким, то в качестве первого можно взять МНИ номер 9, например, аммиак — газ, вызывающий кашель и часто используемый для проверки эффективности новых противокашлевых лекарственных средств. В-четвертых, начав заполнять предложенную таблицу с 441-ой строкой, может показаться, что в ней слишком много пустых строк. Одна-

ко, их количество значительно сократится, если принять во внимание, что в активном СО акт воздействия на нарушителя МНИ одного типа и акт воздействия нарушителя на ЧЭ посредством МНИ другого типа могут быть разведены во времени и, более того, разнесены в пространстве. Например, реализация активного СО, в котором нарушитель, подвергшись воздействию макроскопических частиц (МНИ номер 8), начинает излучать магнитное поле (МНИ номер 12), на первый взгляд кажется невозможной. Однако не торопитесь. Насыпем на лестничной площадке первого этажа равномерно немного мелкого магнитного порошка. Если теперь установить на площадке второго этажа магнитометрическое СО, то оно будет контролировать перемещение нарушителя вверх по лестнице, благодаря прилипшим к подошве магнитным частицам, независимо от наличия у него в карманах предметов с магнитным моментом. Без сомнения, еще не все типы СО нашли своих первооткрывателей.

Проведенное деление СО на типы позволяет не только систематизировать СО и находить новые их типы, но и создавать физические модели обнаружения, а на их основе — проводить оценку значений полезных сигналов (от нарушителя) и помеховых сигналов (от помеховых факторов). Важно отметить, что в случае совпадения полезных и помеховых сигналов отличить их друг от друга невозможно никакой последующей интеллектуальной процессорной обработкой. Сигналы на выходе ЧЭ для нарушителя и для помеховых факторов должны быть изначально различными.

1.3. Как выбирать средства обнаружения

Задачи, решаемые с помощью средств охранной сигнализации, чрезвычайно многообразны. Если установить сигнализацию только непосредственно на охраняемый предмет внутри помещения, то после возникновения сигнала тревоги никто уже не успеет защитить его. Поэтому средства обнаружения устанавливаются и на входе в помещение и на входе в здание и вокруг зданий. Это позволяет заранее определить намерения нарушителя, наилучшим образом организовать противодействие и вовремя принять меры по защите охраняемой собственности. Система охранной сигнализации, в которой все датчики образуют несколько рубежей охраны, преодолеваемых нарушителем последовательно: рубеж периметра объекта, рубеж подхода к зданию, рубеж проникновения в здание, рубеж проникновения в помещение, рубеж передвижения внутри помещения, — называется многорубежной (рис. 1.3.1). Некоторые из рубежей могут отсутствовать в связи с невозможностью или дороговизной их установки. Желательно, чтобы все рубежи охраны были замкнутыми и не оставляли нарушителю лазеек для их преодоления.

Средства обнаружения, устанавливаемые на различных рубежах охраны, отличаются друг от друга. Они



Рис. 1.3.1 Многорубежная система охранной сигнализации

решают разные задачи, работают в разных условиях, имеют разные по форме и размерам зоны обнаружения. Обычно каждая из задач обнаружения решается с помощью вполне определенных предназначенных только для этого средств. В таблице 1.3.1 приведены возможные варианты решения с помощью СО различных типов. Точечное внутреннее СО нельзя установить на наружный забор вместо емкостного СО и наоборот.

Говоря об условиях применения датчика, наиболее важно, является он наружным или внутренним. Наружное СО очень редко можно использовать для охра-

ны внутри помещений, прежде всего из-за различных способов установки и монтажа, а также из-за отличающихся алгоритмов обработки сигналов. Наружное СО всегда дороже внутреннего и существенно дороже комнатного. Внутреннее СО никогда нельзя использовать для охраны на улице, поскольку для внутренних СО из соображений дешевизны не предусматривается защита от дождя, снега, тумана и других погодных факторов, а также возможность работы при низких температурах. На улице на СО воздействуют гораздо более сильные помеховые возмущения, поэтому внутренние СО теряют здесь либо работоспособность либо помехоустойчивость. Наружные и внутренние СО часто используют различные физические принципы обнаружения и не являются взаимозаменяемыми.

Таблица 1.3.1 Основные задачи СО

Задачи СО	Типы СО
Охрана отдельных предметов внутри помещения	Точечные внутренние (вибрационные, емкостные, тензометрические)
Обнаружение передвижения внутри помещения	Объемные внутренние (ИК пассивные, радиолокационные доплеровские, радиометрические)
Проникновение в помещение через двери	Датчики открывания двери (магнитоконтактные)
Проникновение в помещение через окна	Датчики разбивания стекла (электрообрывные, вибрационные, акустические пассивные)
Проникновение в помещение через стены	Поверхностные (электрообрывные, вибрационные)
Обнаружение передвижения внутри здания (по коридорам, лестницам, холлам)	Линейные внутренние (радиолучевые, фотолучевые) или объемные внутренние (ИК пассивные, радиолокационные доплеровские, радиометрические)
Проникновение на территорию объекта и передвижение по территории объекта	Линейные наружные (радиолучевые, емкостные, вибрационные, фотолучевые, магнитометрические)

Даже в пределах одной выбранной задачи обнаружения (табл. 1.3.1) различные СО могут отличаться размером и формой зоны обнаружения (ЗО). ИК пассивное СО с зоной 15×15 м подойдет для помещения размером 10×10 м, но его не удастся установить в узком коридоре длиной 30 м. Впрочем, установка СО со слишком большой ЗО в маленьком помещении также несет неприятности. Она может привести к повышенному уровню ложных срабатываний из-за повышенной чувствительности или от объектов, перемещающихся вне помещения. В этом случае необходимо наличие регулировки, позволяющей изменять дальность обнаружения в соответствии с условиями применения.

Столь же важен учет помеховых факторов, для работы в которых создано СО. Установив датчик, произведенный в одной из южных стран, можно оставить дачу без охраны на всю зиму, так как он теряет работоспособность после выпадения значительного слоя снега. Поэтому следует обращать внимание на возможность работы СО в условиях воздействия осадков, тумана, ветра, солнечной радиации и других факторов, характерных для места установки.

Итак, для эффективной работы СО необходимо учитывать его назначение, условия использования, форму и размеры ЗО, наличие помеховых факторов. Но это – неформальные параметры СО. Кроме них существуют формальные, которые можно оценить численно. Формальных показателей много – их более пятидесяти. Наиболее важные среди них – вероятность обнаружения и время наработки на ложное срабатывание (или вероятность ложного срабатывания). Их смысл понятен без пояснений. Количественные характеристики хороши тем, что их значения удобно сравнивать между собой. И если никто не скажет, какое СО лучше – внутреннее или внешнее, работающее в тропическом климате или в тундре, то любому ясно, что с ростом вероятности обнаружения улучшается и качество СО.

Многообразие условий применения средств охранной сигнализации приводит к очевидной дилемме: либо производить дорогие СО, универсальные по условиям использования, либо дешевые узкоспециализированные СО. На настоящий момент предпочтение отдается последним.

1.4. Пассивные средства обнаружения

Средства обнаружения – это отдельные кирпичики, которые лежат в фундаменте здания системы охранной сигнализации. Они представляют собой не единственную, но основную его составную часть. Чтобы все здание получилось прочным, кирпичи должны быть подогнаны друг к другу. Плотный контакт в местах соприкосновения обеспечивает надежную опору верхних этажей, где живут люди и по которым судят обо всей постройке. Необходимость замены одного элемента не

должна приводить к полной перестройке всей системы. Внешние грани любого СО – это те связи, по которым оно общается с остальными элементами. Три из них обязательны всегда (или почти всегда). Контакт с окружающей средой обеспечивает поступление информации о появлении человека-нарушителя, подсоединение к проводам питания дает аппаратуре электроэнергию, контакт с сигнальной линией позволяет передавать необходимые сигналы. Прежде всего – сигналы тревоги.

Идентичность и универсальность внешних связей и функционального назначения СО определяет то, что и внутреннее их устройство оказывается во многом схожим. Принцип построения всех пассивных СО один и тот же: преобразовать воздействие от обнаруживаемого объекта в сигнал тревоги. Наблюдается ряд общих принципов и в построении активных СО.

Можно изготовить сотню устройств, повторяя электронные схемы, приведенные в различных журналах, но так и не понять, каким образом сделать сто первое самостоятельно. Столкнувшись с наличием в схеме труднодоступной или дефицитной детали, часто приходится отказываться от повторения схемы, хотя любую деталь можно заменить на аналогичную с небольшими доработками схемы. Автор любого устройства изготавливает его из того, что доступно ему. Корректировка схемы не вызывает сложностей, если понимать назначение каждого элемента или узла. Попробуем определить внутреннее устройство СО, исходя из обязательных требований к его внешним связям. В дальнейшем изложении отдадим предпочтение ходу описания «от общего к частному», что способствует более глубокому пониманию устройства СО, круга его возможностей и методов улучшения любой заданной характеристики.

На входе любого пассивного СО находится ЧЭ, на выходе — элемент, формирующий сигнал тревоги. Объединив оба элемента в одно целое, получим блок-схему простейшего СО (рис. 1.4.1а). По данной схеме собрано подавляющее большинство электрообрывных, электроконтактных и магнитоcontactных датчиков. В результате воздействия, превышающего определенное значение, они просто размыкают (или замыкают) внешнюю электрическую сигнальную цепь. За их простоту приходится платить усложнением схем приемной пультовой аппаратуры. Сигнал тревоги в простейшем СО не имеет нормированных параметров. Сопротивление в сигнальной цепи определяется типом используемого ЧЭ. Прибор, принимающий сигнал тревоги, должен будет подстраиваться под параметры датчика. Дверь может быть открыта на доли секунды или на десятки минут. Такой же будет и длительность сигнала тревоги установленного на ней электроконтактного или магнитоcontactного СО. Окончательное решение ложится на пультовую аппаратуру, так как размыкание сигнальной цепи на время менее 0,1 с вряд ли следует считать действительным сигналом тревоги — скорее всего оно вызвано импульсной наводкой.

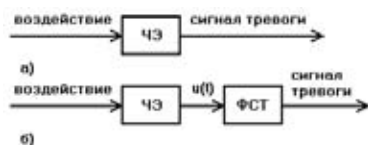


Рис. 1.4.1 Блок-схема простейшего пассивного СО

Блок-схему, изображенную на рис. 1.4.1а, можно упростить, исключив из нее ЧЭ. Подобные устройства широко известны, они есть в каждой квартире, но уже не являются средствами обнаружения. А может быть, это просто никому не приходило в голову? Зато они чу-

десно селективируют человека разумного от всех остальных объектов. Вы, конечно же, поняли, что речь идет об обычном дверном звонке. Нарушитель, жаль только не каждый, подойдя к двери, сам сообщает о своем появлении. Услышав звонок, можно не сомневаться, что пришла не собака и не кошка, и даже не обезьяна, а человек. Если установить два звонка различной тональности на разной высоте, то удастся определить и его рост. Нарушитель в силу своей разумности определенным образом реагирует на внешние раздражители. Увидев ключ от двери, он попытается вставить его в замочную скважину. У таблички с надписью — остановится и прочтает. Зафиксировав осмысленное действие на оставленную «ловушку», можно полностью исключить возможность ложного срабатывания. Психология поведения — это признак, по которому человек в наибольшей степени отличается от всех остальных объектов. Природное явление, воздействующее на ЧЭ, не перемещается в пространстве целенаправленно. Установив ряд ЧЭ в различных точках предполагаемой траектории движения, можно отстроиться от большинства помех естественного характера. Если передвигается животное с массой человека, то эта хитрость уже не поможет. Собака может пройти по тому же маршруту. Конечно, животные ходят не на двух, а на четырех ногах. Но и человек может встать на четвереньки. И только когда объект движется к определенной цели, преодолевая препятствия, наблюдает за окружающими событиями, реагирует на них и меняет траекторию в связи с возникающими опасениями, тут уж точно можно сказать, что он не просто человек, а настоящий нарушитель. Достаточно немного пофантазировать, и реальность описанного психологического принципа построения системы охранной сигнализации становится почти очевидной. Расставить на пути нарушителя достаточное число знаков, понятных только ему. Под каждый знак поставить по датчику. И ждать. Правда, на ловушку не попадет человек, если он глухой, слепой, неграмотный, тупой или, наконец, он торопится. Последнее весьма вероятно. Если простота охранной сигнализации не является самоцелью, то нарушителя необходимо обнаружить при его появлении независимо ни от каких сопутствующих обстоятельств.

На одну ступеньку выше по лестнице сложности пассивных СО стоят приборы, выполненные по блок-схеме, изображенной на рис. 1.4.1б. Чувствительный элемент, как и прежде, преобразует излучение или воздействия от нарушителя или их изменения, связанные с появлением нарушителя, в электрический сигнал $u(t)$, поступающий на формирователь сигнала тревоги (ФСТ). Подобная схема реализуема, если величина полезного сигнала на выходе ЧЭ достаточна для того, чтобы надежно инициировать сигнал срабатывания, то есть составляет не менее одного вольта. Здесь сигнал тревоги имеет нормированные параметры сопротивления и длительности. Такое СО может быть подключено к любой стандартной пультовой аппаратуре.

Чувствительные элементы весьма разнообразны. В ответ на внешние воздействия они меняют свое сопротивление, емкость, индуктивность, заряд или значение

какого-либо другого параметра. Изменение этого параметра преобразуется в пропорциональное изменение напряжения с помощью так называемого согласующего устройства (СУ). Последнее удобно считать неотъемлемой составной частью самого ЧЭ. Сигнал с выхода СУ (или ЧЭ) в виде напряжения $u(t)$, изменяющегося с течением времени t , может быть подвергнут обработке, преобразованию или дальнейшему серьезному анализу с помощью различных электронных схем. Амплитуда сигнала на выходе ЧЭ несет основную долю информации о появлении ОО. Она чаще всего невелика и измеряется милливольтами, микровольтами и даже нановольтами. Привести в действие ФСТ сигналами такого уровня затруднительно. Поэтому, прежде всего сигнал с выхода ЧЭ необходимо усилить до уровня нескольких вольт и отфильтровать в полосе полезных сигналов. Усиленный сигнал следует проверить на принадлежность множеству полезных сигналов, сравнив его параметры с пороговыми. Таким образом основную блок-схему пассивного СО можно представить в следующем виде (рис. 1.4.2). Она состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), усилителя (У), фильтра (Ф), компаратора (К) и реле тревоги (РТ).



Рис. 1.4.2 Основная блок-схема пассивного СО

Чувствительный элемент

ЧЭ преобразует физическое воздействие P в выходное напряжение U . В качестве физического воздействия может выступать сила, смещение, уровень потока энергии, напряженность поля или мощность излучения. Обычно при отсутствии воздействия ($P = 0$) отсутствует и выходной сигнал ($U = 0$). Если это не так, всегда имеется возможность смещения начальной точки отсчета в нужное место. Наличие воздействия приводит к появлению напряжения на выходе ЧЭ. Основной характеристикой ЧЭ является зависимость $U(P)$, примерный вид которой приведен на рис. 1.4.3. Она носит название передаточной или рабочей характеристики чувствительного элемента. Входное воздействие изменяется в пределах от 0 до P_{\max} . Обычно величина полезного воздействия превосходит величину помехового. Поэтому значение P_{\max} соответствует наибольшему из всех возможных воздействий от человека. По мере возрастания входного воздействия от 0 до P_{\max} напряжение на выходе ЧЭ также возрастает от 0 до U_{\max} . Зависимость $U(P)$ почти всегда носит линейный или близкий к линейному характер, поэтому для ее описания достаточно знать единственный показатель $k = U_{\max} / P_{\max}$, называемый средней чувствительностью датчика. Единицей ее измерения является отношение единицы напряжения (вольт) к единице физического воздействия. На практике определить значение чувствительности проще из соотношения $k = \Delta U / \Delta P$, где ΔU – изменение выходного напряжения ЧЭ в ответ на изменение физического воздействия на ΔP . Это избавляет нас от необходимости установки исходной точки передаточной характеристики строго на начало коор-

динат. В верхней части графика (рис. 1.4.3) при больших значениях P часто наблюдается завал характеристики в виде участка, близкого к линии, параллельной оси OP . Лучше избегать работы на этом участке в виду того, что на нем резко уменьшается чувствительность, и сигналы от различных воздействий становятся мало-различимыми. Величина воздействия меняется со временем. В результате на выходе ЧЭ формируется электрический сигнал $u(t)$.

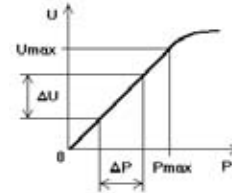


Рис. 1.4.3 Передаточная характеристика ЧЭ

СО не является точным измерительным прибором. Нам важно установить не рост или вес человека, а только лишь факт его появления. Поэтому отклонения передаточной характеристики от линейного закона или разброс значений чувствительности k не сильно влияют на показатели обнаружения прибора. По этой же причине удовлетворительное качество демонстрируют как самостоятельно изготовленные ЧЭ, так и ЧЭ, приспособленные для этой цели из элементов, имеющих другое назначение. Например, в роли датчиков вибрации успешно используются герконы, головки динамических громкоговорителей, отрезки коаксиального или оптоволоконного кабеля и даже аккумуляторные батареи мембранного типа. Можно смело допустить отклонения чувствительности k в пределах до нескольких десятков процентов, то есть в пределах отклонений, характерных для естественного разброса измеряемых параметров человека. Говоря о зависимости $U(P)$ в целом на математическом языке, требуется, чтобы она была взаимно однозначной и монотонной. Смысл обоих понятий и их необходимость практически очевидны.

Усилитель

В результате воздействия человека на ЧЭ почти любого типа величина сигнала на его выходе изменяется на доли вольта. Работа с малыми сигналами не позволяет добиваться высоких показателей СО во время их длительной автономной работы. Небольшие сигналы неразличимы на фоне медленно дрейфующего начального уровня. На выходе ЧЭ необходимо установить усилитель. Он нужен, чтобы поднять уровень сигнала до значений, достаточных для его последующей обработки, принятия решения о появлении ОО и активации сигнала тревоги. Уровень полезного сигнала после усиления должен быть не менее одного вольта. Естественное ограничение уровня сверху – напряжение питания.

Главным показателем усилителя является его коэффициент усиления K_{yc} , равный отношению величины сигнала на его выходе $U_{\text{вых}}$ к величине сигнала на входе $U_{\text{вх}}$, то есть $K_{yc} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$. Зная диапазон входных воздействий ($0 \dots P_{\max}$) и чувствительность ЧЭ k , легко

найти диапазон изменения входных сигналов усилителя ($0 \dots U_{\max}$, где $U_{\max} = k \times P_{\max}$), а отсюда – и требуемый коэффициент усиления $K_{\text{УС}} = U_{\text{ПИТ}} / (k \times P_{\max})$.

Пример. ЧЭ тензометрического средства характеризуется значением $k = 20$ мкВ/Н. Считая максимальным воздействие от человека весом $P_{\max} = 200$ кГ = 2000 Н, диапазон входных сигналов усилителя составит $0 \dots 40$ мВ. При номинальном напряжении питания 12 В, его минимальное значение может составить 10 В. Тогда напряжение на выходе усилителя не может превосходить $8 \dots 9$ В (в зависимости от типа применяемой схемы) и коэффициент усиления должен быть равен $K_{\text{УС}} = (8 \text{ В}) / (40 \text{ мВ}) = 200$.

Схемы усилителей выполняются на основе операционных усилителей (ОУ) – специальных микросхем, предназначенных для усиления разности сигналов между своим положительным (+) и отрицательным (–) входами (рис. 1.4.4). В большинстве восьмивыводных микросхем с одним ОУ за выводами определенных номеров закреплены одинаковые функции (рис. 1.4.4а): 2 – «вход –», 3 – «вход +», 4 – «V–» (отрицательное напряжение питания), 6 – U_{out} (напряжение выходного сигнала), 7 – «V+» (положительное напряжение питания). К ним относятся UA741, UA776, 140УД6, КР140УД608, 140УД12 и мн.др. То же относится к восьмивыводным микросхемам двоярных ОУ (рис. 1.4.4б), содержащим в одном корпусе два независимых усилителя. Типовыми микросхемами являются NJM4558, LM358, LM2904, LM1458, 1040УД1. Четырнадцативыводная микросхема счетверенных ОУ содержит в одном корпусе четыре независимых ОУ, имеющих общее питание. Она обычно также имеет стандартную разводку или, как теперь модно говорить, распиновку (рис. 1.4.4в). Наиболее распространены LM324, LM2902, 1401УД2.

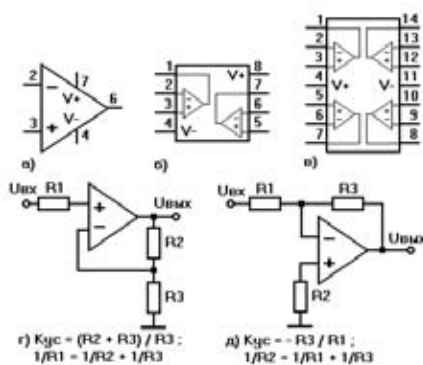


Рис. 1.4.4 Схемы усилителей

Две стандартные схемы усилителей приведены на рис. 1.4.4г, 1.4.4д. Выходной сигнал в схеме неинвертирующего усилителя (рис. 1.4.4г) имеет ту же полярность, что и входной сигнал, но в $K_{\text{УС}}$ раз большую амплитуду. Наличие резистора R1 не обязательно (то есть допускается $R1 = 0$), но позволяет стабилизировать работу усилителя. Инвертирующий усилитель (рис. 1.4.4д) не только усиливает входной сигнал, но и меняет его полярность на противоположную по отношению к полярности входного сигнала, так как коэффициент

усиления $K_{\text{УС}}$ в данном случае отрицательный. При необходимости получения положительного сигнала, его следует инвертировать повторно. Наличие резистора R2 также не является обязательным и его величина может быть равной 0 Ом. При желании в литературе можно найти другие типовые схемы усилителей.

Приведенные схемы обеспечивают удовлетворительное качество в большинстве практических приложений. Усиление одного каскада не безгранично. Предельную величину $K_{\text{УС}}$ усилителя на одном ОУ общего назначения можно определить по формуле $K_{\text{УС}} = F_1 / F_В$, где F_1 – частота единичного усиления, для ОУ общего назначения равная $F_1 = 1000000$ Гц или около того, $F_В$ – верхняя частота полосы полезных сигналов в герцах. Ее оценки будут приведены ниже в разделе «Фильтр». Приведенная формула отражает тот простой факт, что чем больше полоса частот усиливаемых сигналов, тем меньшее усиление ОУ может быть достигнуто. На практике лучше не приближаться к предельным значениям частот и коэффициентов усиления. При необходимости усиления сигнала более чем в несколько сотен раз, следует использовать несколько последовательно соединенных каскадов, имеющих примерно одинаковое усиление. Результирующий коэффициент усиления будет равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Значение $K_{\text{УС}}$ для каждого каскада не должно превышать $300 \dots 500$. Если требуется усилить сигнал в 20000 раз, следует последовательно поставить два каскада с усилением по 140.

Использование ОУ в схемах усиления предпочтительнее по сравнению с транзисторными схемами, так как обеспечивает более стабильные характеристики. Во входных цепях, где уровни полезных сигналов могут быть менее единиц микровольт, необходимы малошумящие усилители. Ранее их удавалось реализовать только на биполярных транзисторах в режиме малых коллекторных токов. Сейчас появилось много микросхем малошумящих ОУ, которые работают в широком диапазоне температур и которые можно купить в любом магазине радиодеталей. Схемы их включения аналогичны приведенным на рис. 1.4.4. Шумовой характеристикой ОУ является спектральная плотность шума $e_{\text{ш}}$. Значение плотности приводится ко входу усилителя, то есть после измерения на его выходе делится на коэффициент усиления. Единицей измерения $e_{\text{ш}}$ является $\text{нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$. Чтобы получить квадрат среднеквадратического отклонения шума $(E_{\text{ш}})^2$ в полосе частот от f_{H} до $f_{\text{В}}$, необходимо квадрат плотности умножить на ширину полосы, то есть $E_{\text{ш}} = ((e_{\text{ш}})^2 \times (f_{\text{В}} - f_{\text{H}}))^{1/2}$ (в нановольтах). Амплитуда шума пропорциональна полосе частот, что становится одним из аргументов в пользу фильтрации сигналов, то есть ограничения полосы пропускания до минимальных размеров. Основной потребитель малошумящих ОУ – техника высококачественного звуковоспроизведения. Поэтому производители ОУ обычно измеряют значение $e_{\text{ш}}$ на частоте 1 кГц. В охранной сигнализации больший интерес представляют сигналы с частотой в районе 1 Гц, где значения $e_{\text{ш}}$ повышаются в $1,5 \dots 10$ раз. В зависимости

от уровня $e_{ш}$ можно разделить ОУ на три группы: обычные с $e_{ш}$ более $10 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$, малолушмящие с $e_{ш}$ от 1 до $10 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$ и ОУ с очень низким уровнем шума $e_{ш}$ менее $1 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$. К малолушмящим ОУ относятся ОР470, SA5534, SE5534, ОР27А, ОР27С, ОР37А, ОР37С, очень низкий уровень шума имеют LT1028А, AD8099, AD797, AD8334.

Фильтр

ЧЭ воспринимает все физические воздействия, поступающие из внешней среды. Это воздействия не только от ОО, но и от многочисленных помеховых факторов — солнца, дождя, ветра. Их поток не прекращается ни на секунду, продолжаясь во время появления нарушителя и проявляясь в результирующем сигнале. После усиления в сигнал добавляются различные электронные шумы аппаратуры. Помеховые сигналы присутствуют в пассивных СО практически любых типов. Их наличие значительно осложняет процесс обнаружения полезных сигналов. К счастью, природа возникновения помеховых сигналов столь многообразна, что их спектр занимает очень широкую полосу, непрерывно заполняя диапазон частот от 0 до сотен килогерц и выше. Полоса частот полезных сигналов значительно уже. Данный факт позволяет отсеять все ненужное, сохранив требуемую информацию в исходном виде. Именно этой цели служат фильтры.

На рисунке 1.4.2 фильтр Ф установлен после усилителя У. В действительности удобнее чередовать каскады усиления с каскадами фильтрации или вводить элементы фильтрации в схемы усилителей. В случае слабых входных сигналов (менее 1 мВ), требующих большого усиления, проявляются помеховые воздействия от многочисленных радиопередающих устройств. Наиболее подвержены этому длинные проводные ЧЭ, воспринимающих электромагнитные колебания наподобие антенн. Тогда целесообразно установить первый каскад фильтрации непосредственно на выходе ЧЭ до первого каскада усиления. Он должен подавлять электромагнитные наводки высокой частоты. Если этого не сделать, то после первого же нелинейного элемента в спектре помех появятся составляющие на перекрестных (в том числе и на низких) частотах, и борьба с помехами значительно осложнится.

Всем известно, насколько можно улучшить разборчивость зашумленной речи, отсекая сигналы с частотами ниже 300 Гц и выше 3000 Гц, и сохраняя только сигналы с частотами внутри этого диапазона, где сосредоточена основная часть энергии голоса человека. Назначение фильтра состоит в том, чтобы с одной стороны в максимальной степени подавить все помеховые сигналы, а с другой — пропустить все полезные с наименьшими искажениями. Отсюда понятен общий подход к поиску параметров фильтра. Сначала необходимо определить диапазон частот полезных сигналов, что почти всегда подразумевает нахождение нижне частоты F_H и верхней частоты F_B диапазона. После этого устанавливается фильтр Ф (рис. 1.4.2) с полосой пропускания от F_H до F_B , который так и называется полосовым фильтром.

Процедура формального получения значений F_H и F_B очевидна. Она состоит из трех последовательных шагов:

- записать все возможные полезные сигналы на выходе усилителя У (рис. 1.4.2);
- исключить из каждой записи все возможные помеховые сигналы — ведь нам нужны параметры «чистых» сигналов без наложившихся шумов;
- найти спектры всех сигналов и определить их границы снизу (F_H) и сверху (F_B).

Первый шаг требует больших трудозатрат. Придется варьировать не только каждый параметр ОО в полном диапазоне его изменения, но и перебирать все комбинации параметров. Если ограничиться пятью параметрами, каждый из которых может принимать десять значений, то количество записей составит $10^5 = 100000$. На их проведение потребуется 500 дней. Второй шаг требует больших усилий и тщательности. Необходимо изолировать ЧЭ от всех посторонних внешних воздействий, кроме воздействий от человека, экранировать аппаратуру от электромагнитных наводок и погрузить ее в жидкий азот для минимизации тепловых шумов. Третий шаг требует только лишь хорошего супербыстродействующего компьютера. Весь этот титанический труд завершится нахождением двух чисел. Оставим его для потомков. Попробуем найти F_H и F_B более простым способом.

Имея ЧЭ с усилителем (широкополосным) и проведя небольшое количество экспериментов, нетрудно определить размер его зоны чувствительности a . Передвигаясь со скоростью v , человек (или другой ОО) пересечет ЗЧ за время τ , равное $\tau = (a + b) / v$, где b — поперечный размер самого человека. Если ЗЧ вытянута в одном направлении (направлении рубежа охраны), то a представляет собой ширину ЗЧ (рис. 1.4.5). В этом случае человек пересечет ЗЧ за время τ , равное $\tau = (a + b) / (v \times \cos \alpha)$, где α — угол между перпендикуляром к рубежу и направлением движения человека (рис. 1.4.5). Длительность полезного сигнала равна продолжительности τ нахождения человека в ЗЧ. Форма сигнала может быть произвольной. Задав определенный диапазон скоростей v и углов α , легко определить диапазон длительностей сигналов τ .

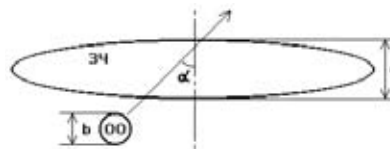


Рис. 1.4.5 Передвижение ОО через ЗЧ

Пример. Человек с поперечным размером $b = 0,3 \dots 0,5 \text{ м}$ пересекает луч ИК пассивного СО ($a = 2 \text{ м}$) со скоростями $v = 0,3 \dots 0,5 \text{ м/с}$ под углом $\cos \alpha = 0,2 \dots 1$. Найдем диапазон длительностей сигналов τ из соотношения $\tau = (a + b) / (v \times \cos \alpha)$. Минимальное значение $\tau_{\min} = (0,3 + 2) / 5 = 0,46 \text{ с}$, максимальное значение $\tau_{\max} = (0,5 + 2) / (0,3 \times 0,2) = 42 \text{ с}$.

Нижняя и верхняя частота фильтра зависят от формы сигнала. Для упрощения оценок предположим, что по-

лезный сигнал представляет собой прямоугольный импульс длительностью τ . После прохождения фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза F_B искажается фронт и спад импульса (рис. 1.4.6). При этом длительность фронта оценивается величиной постоянной времени $\tau_\Phi = RC = 1 / (2\pi F_B)$. Она должна быть примерно на порядок меньше минимальной длительности импульса τ_{\min} . Отсюда верхняя частота $F_B = 10 / (2\pi\tau_{\min}) \approx 1,6 / \tau_{\min}$. В приведенном примере $F_B = 1,6 / 0,46 = 3,5$ Гц.

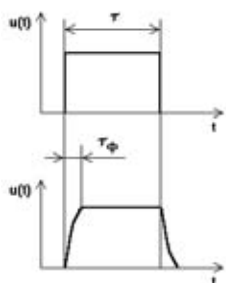


Рис. 1.4.6 Искажения импульса после прохождения ФНЧ

Любой фильтр верхних частот (ФВЧ) подавляет постоянную составляющую сигнала. После прохождения прямоугольного импульса через ФВЧ с частотой среза F_H искажается его верхняя полочка (рис. 1.4.7). Время убывания постоянной составляющей характеризуется величиной постоянной времени $\tau_H = RC = 1 / (2\pi F_H)$. Чтобы остался почти неискаженным самый длинный импульс, должно выполняться условие $\tau_H = 10\tau_{\max}$. Поэтому нижняя частота полосового фильтра $F_H = 1 / (20\pi\tau_{\max}) \approx 0,016 / \tau_{\max}$. Для рассмотренного примера получим $F_H = 0,016 / 42 = 0,0004$ Гц. Частота очень низкая, в полосу пропускания попадут фликкер-шумы. А для чего она такая низкая? Чтобы сохранить неискаженным импульс длительностью 42 с. Принятие решения о появлении нарушителя не требует ожидания его ухода из ЗО. Решение принимается в течение первых $\tau_{\min} = 0,46$ с. Если сохранение формы самого длительного импульса не является самоцелью, то можно значительно повысить помехоустойчивость СО, установив нижнюю частоту $F_H = 1 / (20\pi\tau_{\min}) \approx 0,016 / \tau_{\min}$. В нашем примере это составит $F_H = 0,016 / 0,46 = 0,035$ Гц.

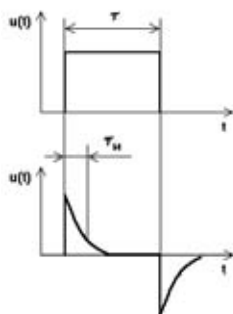


Рис. 1.4.7 Искажения импульса после прохождения ФВЧ

Рассмотренный случай прямоугольного импульса является наиболее строгим с точки зрения как верхней, так и нижней частоты фильтра. Если наблюдаемый по-

лезный сигнал имеет более плавный вид, то нижняя и верхняя частоты полосового фильтра обычно уточняются в сторону сужения полосы, так как реальный сигнал не имеет ни резких фронтов, ни продолжительной полки. Если же предполагается последующий анализ тонкой структуры сигналов, то полоса частот может быть, наоборот, расширена, чтобы избежать потери важной информации. Как следует из полученных соотношений, полоса пропускания фильтра пассивного СО определяется в основном минимальными размерами и максимальной скоростью ОО. Для значений $a = 0...2$ м, $b = 0,2...0,5$ м, $v = 3...7$ м/с она лежит в пределах от $0,02...0,5$ Гц до $2...50$ Гц.

Фильтр с полосой пропускания от F_H до F_B может быть реализован путем последовательного соединения двух более простых фильтров: фильтра нижних частот (ФНЧ) с полосой пропускания от 0 до F_B и фильтра верхних частот (ФВЧ) с полосой пропускания от F_H до бесконечности. На рисунке 1.4.8 приведены схемы простых, но достаточно эффективных ФНЧ и ФВЧ первого порядка. ФНЧ (рис. 1.4.8а) пропускает сигналы до частоты среза $F_B = 1 / (2\pi RC)$. Частотой среза называется та частота, далее которой сигнал ослабляется более чем в $(2)^{1/2}$ раз, что соответствует уровню ослабления минус 3 дБ. ФВЧ (рис. 1.4.8б) пропускает сигналы от частоты среза $F_H = 1 / (2\pi RC)$. Порядок фильтра определяет степень подавления помеховых сигналов по мере удаления от полосы его пропускания. ФНЧ первого порядка подавляет сигнал во столько же раз сильнее, во сколько больше его частота.

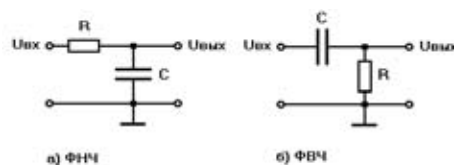


Рис. 1.4.8 Фильтры первого порядка

Последовательное соединение фильтров – стандартный способ их использования. Оно применяется как для получения фильтров с полосами пропускания сложного вида, так и для повышения порядка фильтра. Фильтр второго порядка состоит из двух фильтров первого и обладает в два раза более высокими характеристиками подавления. Он может понадобиться в том случае, когда амплитуда помехового сигнала вне полосы пропускания оказывается слишком большой или частоты помеховых сигналов лежат близко от полезных. Частота среза двух последовательно соединенных ФНЧ будет ниже частот среза каждого из них. Для того, чтобы обеспечить заданное значение F_B , каждый из них должен иметь частоту среза $F_{B1} = F_B / ((2)^{1/2} - 1)^{1/2} = 1,554 \times F_B$. При последовательном соединении двух одинаковых ФВЧ первого порядка частота среза каждого из них должна составлять $F_{H1} = F_H \times ((2)^{1/2} - 1)^{1/2} = 0,644 \times F_H$. Для фильтров n -го порядка, составленных из n одинаковых последовательно соединенных фильтров n -го порядка, $F_{B1} = F_B / ((2)^{1/n} - 1)^{1/2}$ и $F_{H1} = F_H \times ((2)^{1/n} - 1)^{1/2}$.

Оценивая значения F_H и F_B , можно было заметить, что на них влияют параметры с размерностью времени, например τ , точность задания которых невелика. Поэтому не требуется высокая точность и при реализации фильтров, если, конечно же, задача состоит только в обнаружении объекта, а не в измерении его параметров. Вполне удовлетворительной будет погрешность F_H и F_B на уровне нескольких десятков процентов, а для сопротивлений и емкостей — $\pm 10...20\%$, благо встретить сейчас элементы с более высокой погрешностью можно редко. Сами значения сопротивлений R находятся в пределах от 22 кОм до 2 МОм. Более низкие значения приводят к увеличению токов, а следовательно, и энергопотребления всей схемы, более высокие не обеспечивают стабильной работы при изменении внешних условий и вызывают повышенный уровень собственных шумов и наводок.

До сих пор мы молчаливо предполагали, что СО располагается на пути движения нарушителя. Войдя в ЗЧ, он, не останавливаясь, продолжает движение дальше. Для точечных или объемных СО, устанавливаемых в непосредственной близости от охраняемых предметов, более вероятна другая ситуация. Нарушитель подходит к своей цели и останавливается на продолжительное время. Величина воздействия, а следовательно и сигнала, длительное время остается на высоком уровне, то есть в полезном сигнале присутствует постоянная составляющая, которая должна быть без искажений представлена на выходе фильтра до тех пор, пока человек находится внутри ЗЧ. Постоянная составляющая имеет нулевую частоту. В этом случае $F_H = 0$, ФВЧ отсутствует и остается только ФНЧ. Подобные СО называются датчиками присутствия или наличия нарушителя. Они постоянно формируют сигнал, пока человек находится в их ЗЧ. Если в такое СО добавить ФВЧ, то постоянная составляющая сигнала исчезнет, и СО будет реагировать только на перемещение нарушителя. После его остановки внутри ЗЧ средство перестанет его «видеть». Такое СО называется датчиком движения или перемещения. Датчики присутствия дают дополнительную информацию и дают не бесплатно. Датчики движения более распространены по сравнению с датчиками присутствия, поскольку они отличаются дешевой и лучшей помехоустойчивостью, благодаря подавлению помех в нижней части спектра. А постоянно выдавать сигнал тревоги — нужно ли это? При хорошей организации охраны вполне достаточно обнаружить нарушителя один раз — при его появлении — и чем раньше, тем лучше. Хотя осознавать, что птичка еще не выпорхнула из клетки — просто приятно.

Усилитель U и фильтр Φ (рис. 1.4.2) часто реализуются в виде одной электронной схемы, которая называется активным фильтром. Он одновременно выполняет как функцию усиления сигналов в заданное число раз, так и их фильтрацию в полосе частот от F_H до F_B . Наиболее популярные и хорошо зарекомендовавшие себя схемы активных фильтров показаны на рис. 1.4.9.

Первая схема (рис. 1.4.9а) сочетает в себе инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления $K_{УС} = -R_2 / R_1$ и ФНЧ первого порядка с верхней частотой

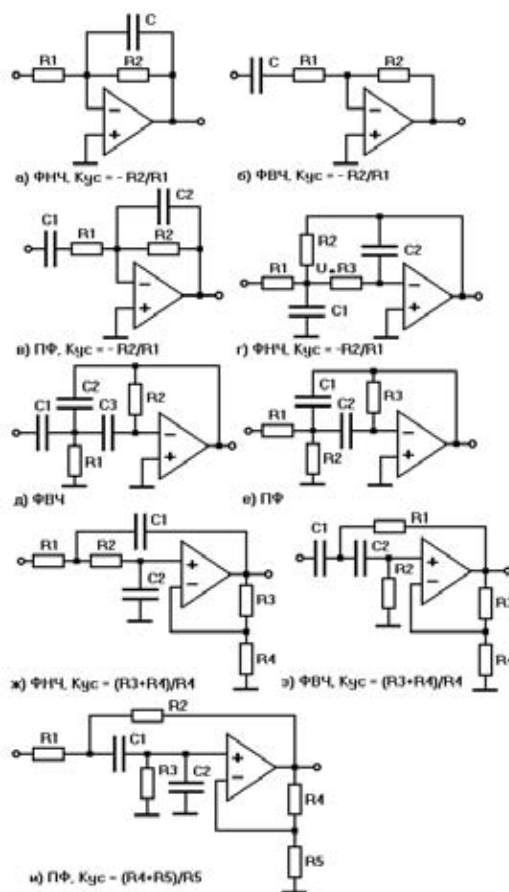


Рис. 1.4.9 Схемы активных фильтров

$F_B = 1/(2\pi RC)$. Следующая схема (рис. 1.4.9б) — инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления $K_{УС} = -R_2 / R_1$ и ФВЧ первого порядка с нижней частотой $F_H = 1/(2\pi R_1 C)$. Простейший активный полосовой фильтр (ПФ), изображенный на рис. 1.4.9в, имеет первый порядок как по нижней частоте $F_H = 1/(2\pi R_1 C_1)$, так и по верхней $F_B = 1/(2\pi R_2 C_2)$ ($F_H < F_B$). Коэффициент усиления аналогичен первым двум схемам: $K_{УС} = -R_2 / R_1$. Последующие схемы активных фильтров (рис. 1.4.9г...и) имеют второй порядок. Фильтры более высокого порядка характерны для техники, требующей точного воспроизведения формы сигналов, например, звуковой или телевизионной. Если нам необходимо только обнаружить появление объекта, обладающего большим количеством заранее неизвестных параметров, то потребности в высококачественной передаче сигналов нет, и фильтры выше второго порядка являются ненужной экзотикой. Тем не менее, надо знать и помнить о существовании трех основных типов фильтров высокого порядка: фильтров Баттерворта, фильтров Чебышева и фильтров Бесселя. Фильтры Баттерворта обладают максимально плоской передаточной характеристикой в полосе пропускания; однако они имеют большую неравномерность временных задержек различных спектральных составляющих. В ответ на ступенчатый входной сигнал, на выходе фильтра на «ступеньку» наложится колебательный процесс. Филь-

тры Чебышева имеют наиболее крутой спад от полосы пропускания к полосе подавления; обладая наилучшими показателями подавления ненужных частот, они имеют как волнообразную АЧХ в полосе пропускания, так и сильные фазовые искажения сигналов. В ответ на ступенчатый входной сигнал на выходе фильтра мы вновь увидим «ступеньку», сопровождаемую еще более сильным колебательным процессом. Фильтры Бесселя отличаются наименьшими искажениями формы сигналов во времени. При неровной АЧХ в полосе пропускания и весьма пологом спаде АЧХ в полосе подавления, в ответ на «ступеньку» они дают ту же «ступеньку», но в слегка сглаженном виде. Все эти фильтры могут понадобиться в случае необходимости оценки параметров обнаруживаемого объекта, когда требуется усиление сигналов одновременно с минимальными искажениями их спектра или формы.

Расчет фильтров высокого порядка (рис. 1.4.9г...и) носит весьма громоздкий характер. При необходимости его несложно выполнить самостоятельно, найти в литературе или Интернете. Существует ряд программ, позволяющих подобрать параметры схем (значения сопротивлений и емкостей) для получения нужного коэффициента усиления $K_{УС}$ и границ полосы пропускания F_H и F_B .

Режекторный фильтр

Среди множества помеховых сигналов один тип занимает особое место. Это наводки от сети промышленной частоты 50 Гц. Они накладываются на полезные сигналы и мешают процессу их обнаружения. На Земле нет ни одного места, где не бывает таких наводок. В некоторых местах отличается значение частоты: шестьдесят герц вместо пятидесяти. Сетевые наводки особенно велики для СО с длинными проводными ЧЭ, которые в силу специфики их работы должны иметь электромагнитную связь с окружающим пространством и поэтому их нельзя заэкранировать. Величина сигнала наводки в производственном цеху промышленного предприятия достигает единиц вольт, а в машинном зале гидроэлектростанции — сотен вольт. Отношение сигнал/помеха может быть менее одной миллионной. Наличие сетевых наводок характерно для магнитометрических, емкостных, проводно-волновых и ряда других типов СО.

Наряду с сетевыми наводками основной частоты наблюдаются их гармонические составляющие на частотах 100, 150, 200, 250 ... Гц. Наличие гармоник связано с качеством местной электрической сети. Это особенно неприятно: проверенное и отработанное в городских условиях СО может неожиданно оказаться полностью неработоспособным после его установки в дачном домике, где вид сетевого сигнала может отличаться от чисто синусоидального. Амплитуда гармонических составляющих значительно меньше амплитуды наводки на частоте 50 Гц. На частоте 150 Гц она меньше основной составляющей в несколько сотен раз, на частоте 250 Гц — в сотни тысяч раз. Несмотря на это, она все еще может превосходить величину полезного сигнала.

Способы очищения сигналов от сетевых наводок зависят от того, попадают ли они в полосу полезных

сигналов от F_H до F_B . Если частоты сетевых наводок лежат вне полосы пропускания фильтра, то борьба с ними сводится к повышению порядка фильтра. Если же одна из частот, скажем 50 Гц, оказывается внутри диапазона $F_H \dots F_B$, то ее следует вырезать с помощью так называемого режекторного фильтра, который пропускает все сигналы, кроме имеющих заданную частоту.

Значение частоты переменного тока в бытовой электрической сети поддерживается с очень высокой точностью. Она не может опуститься ниже 49 Гц или подняться выше 51 Гц. Режекторный фильтр должен подавлять частоты указанного диапазона в несколько сотен раз, пропуская без искажений сигналы с частотами вне диапазона 50 ± 1 Гц (или 100 ± 2 Гц, 150 ± 3 Гц, ... — для высших гармоник). Основные схемы режекторных фильтров приведены на рис. 1.4.10.

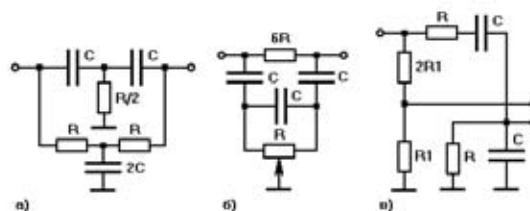


Рис. 1.4.10 Схемы режекторных фильтров

Первая схема (рис. 1.4.10а) носит название двойного Т-образного фильтра. Она обеспечивает высокую надежность подавления сигналов заданной частоты $F_{РЕЖ}$, величина которой определяется значениями сопротивлений R и емкостей C : $F_{РЕЖ} = 1/(2\pi RC)$. Частоте $F_{РЕЖ} = 50$ Гц соответствует, например, пара значений $R = 100$ кОм и $C = 0,03$ мкФ.

Вторая схема (рис. 1.4.10б) называется дифференциально-мостовой. Ее отличительной чертой является возможность перестройки частоты подавления $F_{РЕЖ}$, например, если заранее неизвестно, составит ли она 50 или 60 Гц. Значение частоты в этом случае составит $F_{РЕЖ} = 1/(2\pi C(3R_{ЛЕВ}R_{ПРАВ})^{1/2})$, где $R_{ЛЕВ}$ и $R_{ПРАВ}$ — сопротивления левой и правой частей переменного резистора $R = R_{ЛЕВ} + R_{ПРАВ}$. Третья схема (рис. 1.4.10в) представляет собой мост Вина-Робинсона и имеет частоту подавления $F_{РЕЖ} = 1/(2\pi RC)$. Здесь выходной сигнал снимается не относительно общего провода, как обычно, а с диагонали моста, в плечах которого стоят частотнонезависимый и частотнозависимый делители напряжения.

Все режекторные фильтры требуют установки только высокоточных и стабильных резисторов и конденсаторов с погрешностью не более $\pm 1\%$. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и температурный коэффициент емкости (ТКЕ) не должны превышать 10^{-4} 1/К, иначе при изменении температуры значение частоты фильтра $F_{РЕЖ}$ будет уходить от требуемого.

Компаратор

После усиления и фильтрации сигнал уже может быть подан на каскад, принимающий решение о формировании сигнала срабатывания. В основе типовой схемы

построения пассивного СО лежат три принципа селекции сигналов: селекция по его амплитуде, селекция по его длительности и селекция по частоте. Третий принцип реализуется на предварительном этапе в виде частотного фильтра Φ (рис. 1.4.2). Селекция по амплитуде осуществляется каскадом, называемым компаратором. Можно встретить и другие названия: пороговый элемент, пороговое устройство, селектор амплитуды. В отличие от обычных компараторов, в средствах обнаружения на этот элемент, кроме основной обязанности сравнения амплитуды сигнала с заданным пороговым значением, ложится дополнительная – селекции сигналов по длительности.

Если сигнал на входе компаратора может иметь любую полярность (как положительную, так и отрицательную), то следует использовать двухпороговый компаратор, состоящий из двух отдельных компараторов (одного для положительных, другого для отрицательных сигналов). Это может оказаться проще, чем использовать детектор для обращения отрицательных сигналов.

Именно величина сигнала является главным отличительным признаком появления ОО. Она пропорциональна значению того физического параметра – веса, емкости, магнитного момента и т.д., – измерение которого положено в основу данного принципа обнаружения. Величина порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ соответствует минимальному значению физического параметра ОО. Схемы компараторов, выполненных на операционных усилителях (ОУ) DA1, представлены на рисунке 1.4.11. Не рекомендуется применять в качестве устройств сравнения амплитуд логические элементы, поскольку значение порога в них заранее точно не известно, и является к тому же нестабильным. Первая схема (рис. 1.4.11а) предназначена для случая, когда питание компаратора осуществляется от стабилизированного источника питания напряжением $U_{\text{пит}}$. Под стабилизированным понимается источник питания, напряжение на выходе которого меняется не более, чем на 5...10%, с течением времени, при изменении окружающей температуры, тока нагрузки или других факторов. В этом случае напряжение на опорном входе компаратора «минус» также будет стабильным $U_{\text{пор}} = U_{\text{пит}} R_2 / (R_1 + R_2)$. Путем выбора значений сопротивлений R_1 и R_2 делителя напряжения может быть установлено любое значение $U_{\text{пор}}$ от 0 до $U_{\text{пит}}$. Оно определяет величину порога, при превышении которого входным сигналом $U_{\text{вх}}$, на выходе компаратора формируется положительный сигнал, инициирующий сигнал срабатывания.

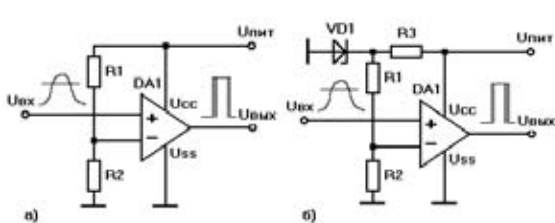


Рис. 1.4.11 Схемы компараторов

Если напряжение питания компаратора $U_{\text{пит}}$ не является стабилизированным, то величина порога также

будет «гулять». Тогда значение $U_{\text{пор}}$ необходимо стабилизировать с помощью цепи R_3 , VD_1 (рис. 1.4.11б). Здесь опорное пороговое напряжение составит $U_{\text{пор}} = U_{\text{ст}} R_2 / (R_1 + R_2)$, где $U_{\text{ст}}$ – напряжение на стабилитроне VD_1 . Недостатком схемы является повышенный потребляемый ток и меньший диапазон изменения напряжения порога $U_{\text{пор}}$ от 0 до $U_{\text{ст}}$, а не до напряжения питания.

На рис. 1.4.11 показан сигнал на выходе компаратора в виде импульса положительной полярности. Его амплитуда почти равна напряжению питания, а длительность равна времени, в течение которого величина входного сигнала $U_{\text{вх}}$ превышает величину порога $U_{\text{пор}}$. Но вид сигнала не вполне гладкий. Связано это с тем, что входной сигнал нарастает очень медленно, а за счет шумов на нем наблюдается легкая «рябь». Во время прохождения порога он будет хаотически то подниматься над порогом, то опускаться вниз. За счет этого в начале выходного импульса (и в конце его) будет наблюдаться «борода» – целый частокот из нескольких десятков очень коротких импульсов. Наличие «бороды» затрудняет работу последующих каскадов, а если выходной сигнал подается на цифровые микросхемы, то оно просто недопустимо. Проблема решается введением в компаратор (рис. 1.4.11а) двух резисторов, образующих положительную обратную связь, что превращает его в так называемый триггер Шмитта (рис. 1.4.12) или компаратор с гистерезисом. Подобный элемент всегда устанавливается между аналоговой и цифровой частями электронной схемы. В результате введения резисторов R_3 и R_4 величина порога расщепляется. Пока порог не превышен, потенциал на правом конце резистора R_4 равен нулю, и значение порога составляет $U_{\text{пор1}} = (U_{\text{пит}} R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot (1 + R_3/R_4)$. После первого превышения потенциал на правом конце R_4 становится равным $U_{\text{пит}}$, в результате чего порог резко уменьшается на небольшую величину до значения $U_{\text{пор2}} = U_{\text{пит}} \times (R_2 / (R_1 + R_2) - R_3 / (R_3 + R_4)) \times (1 + R_3/R_4)$. Импульс на выходе компаратора будет иметь один фронт и один спад. Отношение R_3/R_4 определяет величину гистерезиса – разности порогов в прямом и обратном направлениях. С одной стороны гистерезис должен быть достаточно большим – чтобы исключить появление хотя бы одного волоска от «бороды», с другой стороны малым – чтобы не затягивать спад выходного импульса. Отношение R_3/R_4 обычно находится в пределах от 1/10 до 1/3. Оно выбирается тем больше, чем меньше отношение сигнал/шум на входе компаратора.

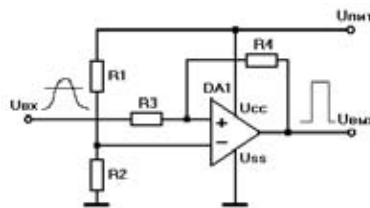


Рис. 1.4.12 Схема компаратора с гистерезисом

Рассмотренные компараторы являются однопороговыми. Они делят все множество значений амплитуды

сигнала на две области: все, что больше порога, считается полезным сигналом; все, что меньше – помеховым. Встречаются более сложные ситуации. Диапазон амплитуд полезных сигналов может быть ограничен как снизу, так и сверху. Вес человека превосходит силу случайных воздействий, но он ниже веса слона или автомобиля, появление которых необходимо игнорировать или реагировать на них иначе, чем на появление человека. В подобных случаях может понадобиться двухпороговый или даже многопороговый компаратор. Его несложно собрать из нескольких однопорговых и ряда простейших логических элементов И, ИЛИ и НЕ.

Попадая в ЗЧ датчика, нарушитель воздействует на него в течение определенного промежутка времени. Даже если ЗЧ имеет форму тонкого луча диаметром в несколько миллиметров, а очень худой человек с поперечным размером $b_{\min} = 0,2$ м пересекает его с максимальной скоростью $v_{\max} = 7$ м/с, длительность сигнала не может стать меньше, чем $\tau_{\min} = b_{\min} / v_{\max} = 0,03$ с. Человек не успеет войти в дверь, открываемую менее чем на 0,3...0,4 с. С другой стороны, среди множества разнообразных помеховых воздействий есть много таких, длительность которых очень мала. К ним относятся грозовые разряды, случайные удары, брошенная бутылка. Все слышали вой хора автомобильных сирен, который поднимается в ответ на акустическую ударную волну, сопровождающую молнию или пролет сверхзвукового истребителя. К некоторым противоугонным системам не предусмотрена селекция сигналов по длительности, хотя сделать это легко. Небольшие осложнения позволяют значительно повысить помехоустойчивость СО.

Схемы компараторов с селекцией сигналов по длительности приведены на рис. 1.4.13. Первая схема является чисто аналоговой. В ней КА – любой амплитудный компаратор с аналоговым выходом, например, из числа представленных на рис. 1.4.11. Цепь R2, C1 определяет величину порога длительности сигнала τ_0 . Сопротивление резистора R2 составляет 100 кОм...1 МОм. Цепь R1, VD1 служит для быстрого разряда конденсатора C1 после короткого помехового импульса. Сопротивление резистора R1 на порядок меньше R2. Цепь R3, R4 – делитель напряжения. Конденсатор C2 емкостью около 0,1 мкФ служит для стабилизации опорного напряжения. Сопротивление резисторов R3 и R4 не должно быть слишком большим во избежание тепловых шумов и наводок и слишком малым – для снижения потребляемого тока. Рекомендуется устанавливать $R3 = R4 = 0,1...1$ МОм. Требуемое пороговое значение $\tau_0 = 0,7R2C1$ определяется значением емкости C1. К формированию положительного сигнала на выходе схемы будет приводить только появление более длительных импульсов. В случае $\tau_0 = 0,1$ с значения сопротивлений и емкостей составят $R1 = 12$ кОм; $R2 = R3 = R4 = 220$ кОм; (для напряжения питания около 10 В); $C1 = 0,68$ мкФ; $C2 = 0,1$ мкФ.

Вторая схема (рис. 1.4.13б) реализует цифровой метод селекции импульсов по длительности. Он позволяет исключить из схемы конденсаторы большой емкости, экономя размеры и повышая стабильность основ-

ных параметров СО. Здесь КЦ – любой амплитудный компаратор с цифровым выходом, например, представленный на рис. 1.4.12. Сигнал высокого уровня на выходе КЦ запускает генератор импульсов на элементах DD1.1 и DD1.3. Период следования импульсов составляет $T_{\text{и}} = 1,38R1C1$. Импульсы подаются на счетный вход CE счетчика DD2, вход сброса R которого управляется инвертором на элементе DD1.2. Двоичный счетчик DD2 подсчитывает спады импульсов. После прихода с генератора восьмого импульса на выходе схемы будет сформирован сигнал высокого уровня $U_{\text{вых}}$. Пороговое значение длительности составит $\tau_0 = 7,5T_{\text{и}} = 10R1C1$. Значение R1 выбирается в пределах от 10 до 1000 кОм. Величина C1 определяется по требуемой пороговой длительности τ_0 . Для $\tau_0 = 0,1$ с и $R1 = 1$ МОм получим $C1 = 10$ нФ.

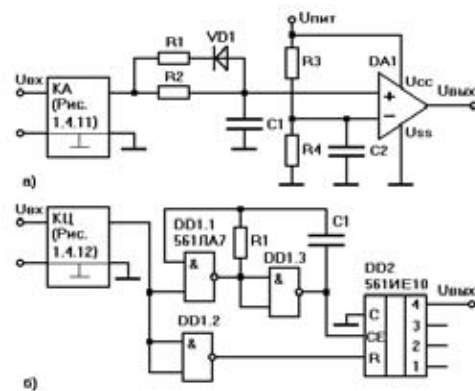


Рис. 1.4.13 Схемы компараторов с селекцией по длительности

Реле тревоги

Возникновение сигнала высокого уровня на выходе компаратора свидетельствует о появлении нарушителя. Остается преобразовать сигнал таким образом, чтобы его можно было передать по длинной проводной линии, и чтобы он был понятен центральной пультовой аппаратуре или любому стандартному исполнительному устройству. Кроме того, необходимо исключить влияние СО и пультовой аппаратуры друг на друга. Случайный или намеренный выход из строя одной составной части системы охранной сигнализации не должен приводить к повреждению остальных частей системы. Для передачи сигнала по длинной линии и электрического разделения цепей служит электромагнитное реле. Его управляющая обмотка принадлежит СО, а гальванически не связанные с ней контакты реле, хотя и располагаются внутри СО, – принадлежат пультовой аппаратуре, которая контролирует состояние контактов (замкнуто/разомкнуто) путем подачи в сигнальную линию собственного напряжения. Стандартную длительность размыкания контактов или время выдержки сигнала тревоги обеспечивает одновибратор. Этот элемент широко распространен в различных электронных схемах. При подаче на его вход импульса произвольной (обычно небольшой) длительности он формирует импульс фиксированной продолжительности. Но какой

именно? Слишком короткий сигнал менее нескольких десятых долей секунды может быть потерян на фоне действующих в длинной проводной линии импульсных помех. Слишком длинный более нескольких десятков секунд приведет к необоснованным потерям драгоценного времени на принятие пультовой аппаратурой окончательного решения. Поэтому длительность сигнала тревоги, передаваемого по проводной линии, должна находиться в пределах нескольких секунд. Конечно, бывают и исключения, когда недопустима потеря даже десятых долей секунды, например, при включении камеры видеонаблюдения по сигналу тревоги, — но это случай особый. Задание длительности в общем случае не требует высокой точности, вполне допустима погрешность в пределах $\pm 50\%$. Следовательно, собственно реле тревоги должно состоять из одновибратора, задающего длительность сигнала тревоги, и исполнительного реле, управляемого сигналом фиксированной длительности.

Варианты типовых схем одновибраторов можно видеть на рис. 1.4.14. Первая из них выполнена RS-триггере (рис. 1.4.14а). В начальном состоянии на входе S триггера и на его выходе Q — сигналы низкого уровня. Приход на вход сигнала высокого уровня переводит выход Q также в состояние высокого уровня. Конденсатор C начинает заряжаться через резистор R и через время $T_{TR} = (RC) \times \ln 2 = 0,69RC$ сигнал на входе R превысит пороговое значение, триггер будет сброшен и выходной сигнал примет значение низкого уровня. В данной схеме длительность входного импульса не должна превышать T_{TR} .

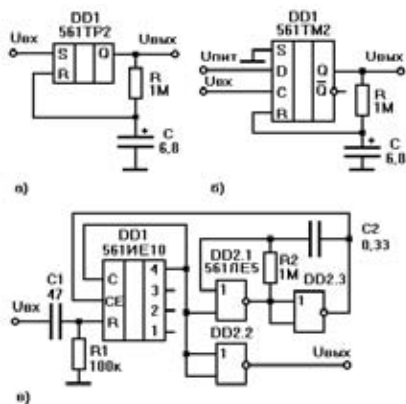


Рис. 1.4.14 Одновибраторы

Схема одновибратора на D-триггере (рис. 1.4.14б) отличается от предыдущей тем, что ее запуск осуществляется фронтом входного импульса. В связи с этим длительность входного импульса может быть произвольной. Время выдержки в любом случае составит $T_{TR} = (RC) \times \ln 2 = 0,69RC$.

Исходное состояние одновибратора на двоичном счетчике (рис. 1.4.14в) — сигнал низкого уровня на входе начальной установки R микросхемы DD1. На ее выходе «8» — сигнал высокого уровня, который через нижний вход DD2.1 блокирует работу генератора, выполненного на элементах DD2.1 и DD2.3, а через эле-

мент DD2.2 поддерживает выходной сигнал $U_{ВЫХ}$ в состоянии низкого уровня. Фронт входного сигнала высокого уровня выделяется дифференцирующей цепочкой C1, R1. Он поступает на вход R счетчика DD1 и переводит все его выходы DD1 в состояние низкого уровня. В результате выходной сигнал $U_{ВЫХ}$ принимает значение высокого уровня, а генератор на элементах DD2.1 и DD2.3 начинает формирование импульсов с периодом $1,38R2C2$. Импульсы поступают на счетный вход CE микросхемы DD1. Показание счетчика увеличится на единицу сразу после включения генератора. После окончания седьмого импульса на выходе «4» счетчика устанавливается сигнал высокого уровня, который через вход C блокирует счет импульсов. Генератор останавливается, выходной сигнал $U_{ВЫХ}$ принимает значение низкого уровня. Длительность выходного сигнала составляет семь периодов генератора $T_{TR} = 7 \times 1,38 \times R2C2 = 9,7R2C2$. Для $R2 = 1 \text{ МОм}$, $C2 = 0,33 \text{ мкФ}$ время выдержки составит $T_{TR} = 3,2 \text{ с}$. По сравнению с предыдущими в данной схеме нет громоздких конденсаторов большой емкости. Выбор того или иного варианта одновибратора (рис. 1.4.14) чаще всего связан с тем, какая именно «половинка» или «четвертинка» микросхемы оказывается свободной во всей схеме СО. Микросхема 561IE5 содержит четыре элемента 2И-НЕ, 561TP2 — четыре RS-триггера, 561IE10 — два четырехразрядных счетчика, а 561TM2 — два D-триггера.

Электромагнитные реле

Сигнал тревоги фиксированной длительности, формируемый на выходе одновибратора, должен быть передан на большое расстояние. Выход СО с открытым коллектором обеспечивает дальность до нескольких километров, но не дает возможности изолировать электронную схему СО от напряжений, которые наводятся в протяженной проводной линии или подаются через ее приемный конец. Реле на выходе СО предназначено для его электрической изоляции от тех внешних цепей, в которые подается сигнал тревоги.

Контакты реле подсоединены к внешней по отношению к СО электрической цепи. При работе с пультовой аппаратурой на них может быть подано максимальное напряжение до 30 вольт, поскольку данная аппаратура, как и СО, питается от источников напряжением 10...15 В или 20...30 В. Коммутируемый ток также невелик и обычно не превышает 30 мА. По этим параметрам вполне подходят небольшие электромагнитные реле типов РЭС-49, РЭС-60 и РЭС-80. В отдельных случаях СО предназначаются для непосредственного включения по сигналам тревоги различных исполнительных устройств: телевизионных камер, сирен, прожекторов. Тогда могут потребоваться реле с коммутируемым напряжением до 220 вольт и коммутируемым током до десятков ампер. В этих случаях длительность сигнала тревоги также потребует коррекции. Обычно пультовая аппаратура работает с сигнальными цепями, обладающими в дежурном режиме сопротивлением 1...30 кОм, а в состоянии тревоги — ∞ (обрыв). В случае объединения нескольких СО в одну

зону путем их последовательного соединения одно СО (самое дальнее) имеет оконечный резистор сопротивлением 1...30 кОм, а остальные – нормально замкнутые контакты (в дежурном режиме). Иногда пультовая аппаратура предполагает работу с сигнальными цепями, сопротивление которых в дежурном режиме составляет 1...30 кОм, а в состоянии тревоги – менее 200 Ом (короткое замыкание с учетом сопротивления проводов). Возможность подключения к произвольной пультовой аппаратуре гарантируется наличием на выходе СО как нормально замкнутых, так и нормально разомкнутых контактов реле.

В состав любого реле входит управляющая и коммутируемая (управляемая) цепь. Обе цепи электрически изолированы друг от друга. Подача напряжения в управляющую цепь приводит к замыканию или размыканию коммутируемой цепи. В качестве элементов СО применяются три основных типа реле: чаще всего нейтральные (обычные) электромагнитные реле, несколько реже – поляризованные электромагнитные реле, еще реже – оптореле. Обычные электромагнитные реле переключают коммутируемую цепь на все то время, в течение которого управляющая цепь находится под напряжением. Поляризованные двухстабильные реле требуют подачи электрического импульса напряжения только в момент переключения. В оптореле связь управляющей и коммутируемой цепи осуществляется через инфракрасное излучение, но, как и в обычных электромагнитных реле, требуется постоянно подавать управляющее напряжение на все время переключения.

На выбор реле для использования в составе СО влияют многие его параметры. Прежде всего, это рабочее напряжение $U_{\text{РАБ}}$, которое необходимо подать на управляющую цепь реле для его надежного включения. Рабочее напряжение обычного электромагнитного реле превышает напряжение срабатывания $U_{\text{СРАБ}}$ на 30...50%; оно должно составлять 6...10 В при напряжении питания СО 12 В и 12...20 В при напряжении питания 24 В. Если ориентироваться на напряжение срабатывания, то сила прижатия контактов в коммутируемой цепи может оказаться слишком слабой для их удержания при изменении температуры, давления, под действием вибрации, ударов или акустического шума. Рабочий ток реле должен быть минимальным и не должен превышать 20...30 мА, иначе на него будет приходиться весь потребляемый СО ток. Обычные электромагнитные реле обладают гистерезисом: ток срабатывания $I_{\text{СРАБ}}$ превосходит ток отпускания $I_{\text{ОТП}}$. Их отношение называется коэффициентом возврата и составляет $K_{\text{ВОЗ}} = I_{\text{СРАБ}} / I_{\text{ОТП}} = 0,1...0,98$. Часто считают несущественным такой показатель, как общее количество переключений реле. Это не так. Действительно, нарушитель появляется редко, но необходимость регулярной (до одного раза в час) проверки СО может потребовать за 10 лет до 100000 переключений реле. Сопротивление изоляции (между управляющей и коммутируемой цепями реле) обычно превышает 200 МОм, что более чем достаточно. А вот напряжение изоляции желательно иметь не менее 2000 вольт, особенно для коммутации протяженных проводных линий, прохо-

дящих вне зданий и помещений, где особенно сильно сказывается наличие наводок. Напряжение изоляции, называемое также электрической прочностью реле, – это напряжение между управляющей и коммутируемой цепями, которое не может привести к повреждению реле. Как всегда, важны рабочий диапазон температур и атмосферного давления. Электромагнитные реле содержат подвижные элементы, поэтому для них следует учитывать устойчивость к вибрации и ударам. И конечно, реле должны иметь небольшие размеры (до нескольких кубических сантиметров) и массу (до нескольких десятков грамм).

Ряд параметров реле не является определяющим при их выборе для использования в средствах охранной сигнализации. Небольшие коммутируемые токи до 30 мА и напряжения до 30 В обеспечиваются практически всеми типами реле. Время непрерывного нахождения управляющей обмотки обычного электромагнитного реле под напряжением составляет около 100 часов, этого более чем достаточно. Время срабатывания электромагнитного реле – 1...30 мс, что существенно меньше длительности сигнала тревоги. Сопротивление замкнутых контактов реле составляет 0,1...2 Ом, что значительно меньше сопротивления сигнальной линии. Контакты реле, установленного в СО, работают на активную нагрузку, то есть в наиболее благоприятном режиме.

Схемы включения обычных электромагнитных реле даны на рисунке 1.4.15. В первой из них входной импульс положительной полярности длительностью несколько секунд открывает транзистор VT1, и на управляющую обмотку реле K1 подается напряжение питания $U_{\text{ПИТ}}$. Протекающий через нее ток отсоединяет контакт Я (якорь) от контакта НЗ (нормальнозамкнутый) и подсоединяет его к контакту НР (нормально разомкнутый). Вывод ЯР подключен к якорю через резистор R2 сопротивлением 1...30 кОм, выполняющий роль оконечного. Контакты реле (рис. 1.4.15а) показаны в дежурном режиме СО. Подсоединение пультовой аппаратуры производится через контакты ЯР (или Я) и НЗ, исполнительных устройств – через Я и НР. При коммутации токов более 0,1 А полезно подсоединить между контактами Я и НР искрогасящий конденсатор емкостью 0,01...0,1 мкФ (показан пунктиром). Он позволит значительно продлить жизнь контактам реле, защитив их поверхность от обгорания в момент разрыва цепи. Импульсный диод VD1 защищает транзистор VT1 от пробоя импульсом высокого напряжения, формируемым индуктивной обмоткой реле K1 в момент закрывания транзистора. Когда транзистор VT1 открыт, через управляющую обмотку реле K1 протекает ток $I_{\text{К1}} \approx U_{\text{ПИТ}} / R_{\text{ОБМ}}$, где $R_{\text{ОБМ}}$ – активное сопротивление управляющей обмотки. Для полного открывания транзистора он должен находиться в насыщении, что обеспечивается током базы, в 10 раз меньшим требуемого тока коллектора. Резистор R1 ограничивает ток базы на требуемом уровне. Если амплитуда входного импульса равна напряжению питания, то $R1 = 10R_{\text{ОБМ}}$. Например, если $U_{\text{ПИТ}} = 24 \text{ В}$, а $R_{\text{К1}} = 4 \text{ кОм}$, то ток коллектора 6 мА, а $R1 = 39 \text{ кОм}$.

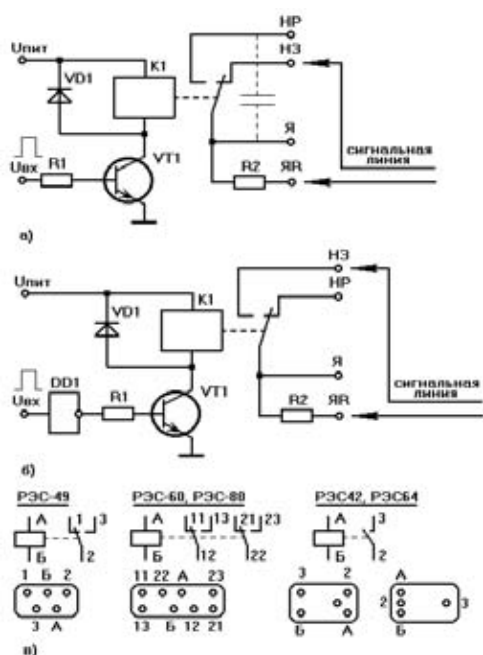


Рис. 1.4.15 Схемы включения и цоколевка электромагнитных реле

В качестве реле К1 можно использовать многие виды реле. Цоколевка некоторых типов обычных одностабильных реле приведена на рис. 1.4.15в, а их основные характеристики – в таблице 1.4.1. Из огромного количества реле выбраны те, которые пригодны для напряжений питания 10...30 В, имеют малые размеры и коммутируют слаботочные цепи. Сюда же включены герконовые реле (РЭС42, РЭС64), которые отличаются меньшими токами срабатывания, но при этом слабой стойкостью к механическим воздействиям, таким как удары, тряска и вибрация. Герконовые реле нельзя устанавливать в автомобильную сигнализацию или в любую другую, где имеется повышенный уровень механических воздействий. Количество срабатываний реле при коммутации активной нагрузки в цепях постоянного тока до 0,1 ампера напряжением до 30 вольт для обычных реле составляет около ста тысяч, для герконовых – около десяти миллионов.

Первая схема (рис. 1.4.15а) имеет один недостаток: отсутствие напряжения питания СО останется незамеченным в течение длительного срока. Контакты НЗ и Я будут замкнуты просто в силу того, что отключено питание СО. Поэтому лучше использовать видоизмененную схему (рис. 1.4.15б), на входе которой введен инвертор DD1 (микросхема 561ЛН2 или аналогичная). Теперь обмотка реле К1 будет постоянно находиться под напряжением, за исключением времени подачи сигнала тревоги; контакты реле НР и НЗ меняются местами (изображение на рис. 1.4.15б соответствует обесточенному состоянию реле К1). После включения питания СО контакты НЗ и Я замкнутся до появления сигнала тревоги (или до снятия напряжения питания со СО). Теперь, если сигнальная линия разомкнется на несколько секунд – это сигнал тревоги, если на длительный период, – значит, возникла проблема с питанием СО. Данная схема также имеет небольшой недостаток: управляющая обмотка реле постоянно находится под напряжением. Через нее все время протекает ток от 5 до 30 мА (в зависимости от напряжения питания и от типа реле), что обычно составляет значительную долю от полного тока, потребляемого СО. Разве не удивительно: тратить почти всю электроэнергию на сигнализацию о ее наличии? Но другого выхода нет. Или точнее, не было до тех пор, пока не появились поляризованные реле.

Поляризованные реле

Существенно сократить потребляемый ток СО позволяет применение поляризованных реле. Термин «поляризованное» означает наличие внутри электромагнитного реле небольшого постоянного магнита, смещающего рабочую точку его обмотки. В результате на обмотку реле допускается подавать ток только в определенном направлении, а якорь (подвижный контакт) может не возвращаться в исходное состояние после снятия напряжения с обмотки. Реле приобретает важное свойство двухстабильности. Подобная разновидность поляризованных реле называется реле-переключатель. Оно имеет две управляющие обмотки и работает следующим образом. При кратковременной подаче напряжения на одну обмотку контакты реле переходят в первое устойчивое состояние, при кратковременной

Таблица 1.4.1 Характеристики обычных электромагнитных реле

Название	Р _{ОБМ} , Ом	U _{РАБ} , В	U _{СРАБ} , В	U _{ОТП} , В	Диапазон рабочих температур, °С	Масса, г	Размеры, мм
РЭС-49	270	12	<6,5	>1,0	-60...+85	3,5	10,5×5,3×15,6
	800	18	<10,6	>1,6			
	1900	27	<16,7	>2,0			
РЭС-60	270	12	<6,6	>1,2		3,5	10,8×5,7×16
	800	18	<11,0	>1,9			
	1900	27	<17,5	>3,1			
РЭС-80	610	15	<8,7	>0,8	-60...+85	2	10,4×5,3×10,8
	1700	27	<14,0	>3,4			
РЭС42 (герконовое)	820	12	<6,5	>1,2	-60...+100	12	13×15×30
	4000	27	<14	>3			
РЭС64 (герконовое)	2000	10	<6,2	>0,8	-60...+85	6	10×9,4×35
	9700	27	<16,5	>2			

подаче напряжения на другую – они переключаются в другое устойчивое состояние. Напряжение подается на 5...100 мс, поэтому энергопотребление схемы сокращается значительно. Время срабатывания поляризованного реле составляет 5...15 мс в зависимости от его типа, для надежного переключения реле длительность подаваемого импульса устанавливается в 2...7 раз больше. В любом случае она не должна превышать одной секунды, иначе произойдет перегрев обмотки. Понятно, что нельзя коммутировать переключающий импульс собственными контактными группами реле, так как оно может зависнуть в недопереключенном состоянии. Магнитная система поляризованного реле смещена под действием постоянного магнита и тонко сбалансирована, поэтому подаваемое на обмотку напряжение не должно отличаться от рабочего более чем на 50% ни в меньшую, ни в большую сторону.

Параметры некоторых двустабильных поляризованных реле типа РПС45 приведены в таблице 1.4.2. Они наиболее подходят для применения в СО. Реле РПС45 содержит две группы контактов, обозначенных номерами 11, 12, 13 и 21, 22, 23, и две обмотки: А-Б и В-Г. После подачи напряжения на первую (плюс на контакт А, минус – на Б), замыкаются контакты 12 с 13 и 22 с 23. Подача напряжения на обмотку В-Г (плюс на В, минус на Г) переключает реле в противоположное состояние: замыкает контакты 12 с 11, а 22 с 21. Обмотки внутри реле включены встречно, поэтому допускается соединение контактов Б и Г с последующей подачей переключающих импульсов на контакты А и В. В этом случае полярность импульса определяет направление переключения. Время срабатывания реле РПС45 составляет 5 мс, количество срабатываний при коммутации активной нагрузки в цепях постоянного тока до 0,1 ампера напряжением до 30 вольт – около ста тысяч, масса – 3,5 г, размеры – 6,5×13,5×12,5, диапазон рабочих температур – от минус 60 до плюс 125°С.

Таблица 1.4.2 Поляризованные реле

Название	R _{ОБМ} , Ом	U _{РАБ} , В	U _{СРАБ} , В
РПС45	43	6,3	2,25...3,5
	150	12	3,6...6,6
	220	15	5...8,2
	800	27	9...15

Схемы реле тревоги на основе поляризованных реле приведены на рисунке 1.4.16, здесь же дана цоколевка реле РПС45. На вход первой схемы (рис. 1.4.16а) в дежурном режиме поступает сигнал низкого уровня, а сигнал тревоги имеет высокий уровень при длительности в несколько секунд. Фронт сигнала тревоги выделяется элементами С1, R3. В результате на выходе DD1.2 формируется импульс низкого уровня длительностью $T_{ИМП} = 0,7R3C1 = 20$ мс. Через открытый транзистор VT1 на обмотку А-Б поляризованного реле подается импульс, размыкающий сигнальную цепь СО (контакты Н3 и Я). Спад импульса сигнала тревоги аналогичным образом последовательно проходит через элементы DD1.1, C2, R4, DD1.3, R6, VT2 и возвращает реле в дежурное состояние, в котором замкнуты его

контакты 11 и 12. Резистор R1 ограничивает тока на спаде импульса сигнала тревоги и защищает выходную цепь предыдущего каскада. Аналогичной цели служит резистор R2. При напряжении питания схемы $U_{ПИТ} = 12$ В следует взять реле РПС45 с обмоткой сопротивлением 150 Ом. Тогда коллекторный ток транзисторов VT1, VT2 может достигать 100 мА и в их качестве подойдут популярные КТ3107. Резисторы R5 и R6 ограничивают ток базы транзисторов VT1 и VT2 соответственно на уровне 10 мА (с учетом выходного сопротивления микросхем DD1.2 и DD1.3). После первого включения контакты поляризованного реле могут находиться в произвольном состоянии. Поэтому, подав питание на СО, необходимо вызвать его срабатывание, проведя пробный проход. После этого СО полностью перейдет в дежурный режим. Схема отличается простотой, но состояние реле неопределенно и после подачи питания, и после его снятия. Это затрудняет работу системы охранной сигнализации при большом количестве датчиков.

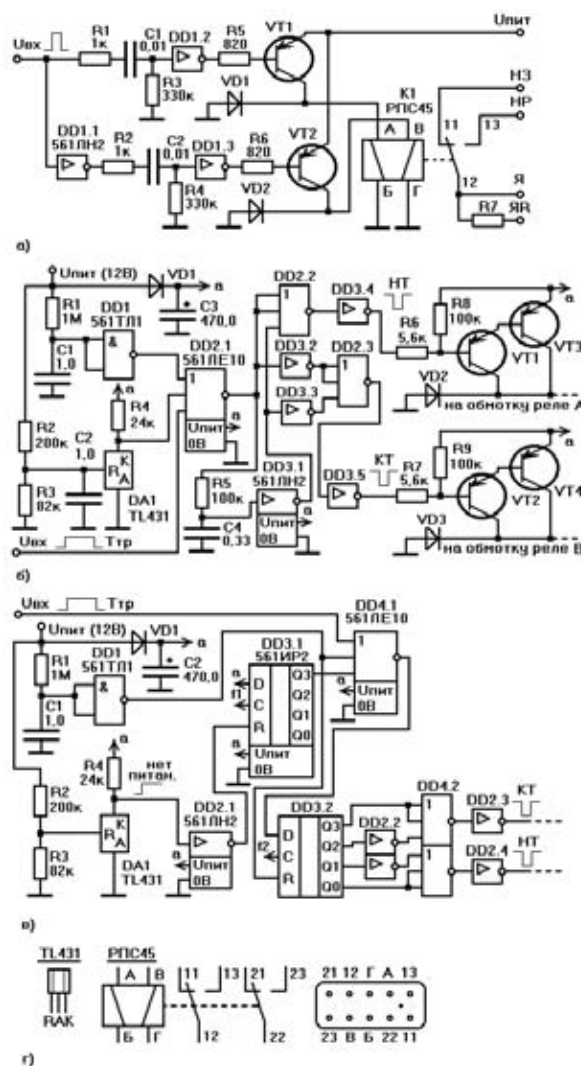


Рис. 1.4.16 Схемы включения и цоколевка поляризованного реле

Вторая схема (рис. 1.4.16б) дополнительно содержит как цепи принудительного перевода контактов ре-

ле в дежурное состояние при включении СО, так и цепи их переключения в состояние тревоги при пропадании напряжения питания. Включение реле не происходит мгновенно. Сопротивление проводов питания достигает сотен ом, и для зарядки конденсаторов емкостью несколько сотен микрофард может потребоваться до нескольких десятых долей секунды. Таким образом, примерно через одну секунду после включения питания будет накоплено достаточно энергии, чтобы перевести контакты реле тревоги в дежурное состояние. Этой цели служат элементы R1, C1 и DD1. Их работа происходит следующим образом. После включения питания конденсатор C1 начинает заряжаться через резистор R1 и приблизительно через время $(0,7R1C1)$ напряжение на нем достигнет половины напряжения питания, то есть порога срабатывания триггера Шмитта на элементе DD1. В результате сигнал на выходе DD1 будет иметь значение высокого уровня в течение приблизительно $0,7R1C1 = 0,7$ секунды после включения питания, и низкого уровня – все последующее время. По окончании интервала времени 0,7 с реле будет установлено в исходное дежурное состояние. Сигнал на выходе элемента DD1 называется сигналом начальной установки или начального сброса. Он может быть использован для перевода в исходное состояние различных других элементов схемы обработки.

Номинальное значение напряжения питания составляет $U_{пит} = 12$ вольт. Оно может опуститься до 10 вольт, но не ниже. Установим в качестве порогового значения напряжения питания 9 В и будем формировать сигнал пропадания питания сразу по достижении этого значения. Наиболее просто реализовать схему на элементе управляемого стабилитрона DA1 TL431 (отечественный аналог КР142ЕН19А). Пороговое значение напряжения его опорного входа (R) высокостабильно и составляет 2,495 В. Делитель R2, R3 обеспечивает именно это значение при $U_{пит} = 9$ В с учетом тока опорного входа 1...2 мкА. Конденсатор C2 сглаживает кратковременные провалы питания длительностью до 0,02...0,03 с, наличие которых неизбежно при питании по длинной проводной линии от общего источника. При напряжении питания выше 9 В элемент DA1 находится в открытом состоянии и резистор R4 поддерживает ток через него на уровне 0,5 мА. При понижении напряжения питания менее 9 В управляемый стабилитрон DA1 закрывается, формируя на своем катоде (К) сигнал высокого уровня, по началу которого реле переводится в состояние тревоги. Для переключения поляризованного реле требуется значительный импульс тока. Энергию для этого следует накопить заранее, пока напряжение питания не пропало совсем. Для этой цели служит конденсатор C3, постоянно заряженный от источника $U_{пит}$ через диод VD1, препятствующий разряду C3 при снижении напряжения питания. Конденсатор C3 обеспечивает «резервным» питанием цепи R4, DA1, микросхемы DD2, DD3 и цепи управления реле K1. Раздельное питание возможно благодаря тому, что входы DD2.1 нормально находятся в состоянии низкого уровня. Состояние высокого уровня для цепей с пониженным $U_{пит} = 5$ В оказалось бы состоя-

нием низкого уровня для цепей, питаемых от $U_{пит} = 12$ В.

Сигнал тревоги $U_{вх}$ поступает на третий вход элемента ИЛИ-НЕ DD2.1. Цепь R5, C4 формирует задержку сигнала тревоги (или включения/отключения питания) на время около $(0,7R5C4) = 0,020$ с. На выходе элемента DD3.1 присутствует сигнал тревоги низкого уровня с задержкой 20 мс. В результате на выходе DD3.4 формируется сигнал начала тревоги (НТ) низкого уровня длительностью 20 мс. На выходе DD3.5 – сигнал окончания тревоги (КТ) той же длительности. Импульс НТ переводит реле в состояние тревоги, сигнал КТ возвращает реле в дежурное состояние. Элемент И реализован на элементе ИЛИ-НЕ DD2.3 и двух элементах НЕ DD3.2, DD3.3, чтобы выполнить всю схему управления на двух микросхемах DD2 и DD3, питание которых осуществляется от точки а, а не от $U_{пит}$. Наличие составных транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 позволило снизить управляющий ток базы до уровня 1 мА, что значительно облегчает выходные режимы элементов DD3.4 и DD3.5. Емкость конденсатора C3 должна обеспечивать ток до $I = 80$ мА через обмотку реле в течение $\Delta t = 20$ мс при снижении напряжения на конденсаторе до верхней границы напряжения срабатывания ($U_{сраб} = 6,6$ В), то есть $C3 \geq I\Delta t / (U_{пит} - U_{сраб}) = (0,02 \times 0,08) / (10 - 6,6) = 0,00047 = 470$ мкФ.

Третья схема (рис. 1.4.16в) реализована на цифровых микросхемах. Здесь вновь присутствует цепь начального сброса при включении питания R1, C1, DD1 и цепь контроля напряжения питания R2, R3, R4, DA1. При снижении напряжения питания менее 9 вольт на катоде (К) DA1 формируется сигнал высокого уровня. Цепь на элементах DD2.1 и DD3.1 блокирует сигналы от кратковременных прерываний (просечек) питания и пропускает только сигналы с длительностью более $(3,5 / f1)$, где $f1$ – частота импульсов, подаваемых на вход сдвига С регистра DD3.1. Чтобы сигнал тревоги формировался только в случае пропадания питания более чем на 0,1 секунды, частота $f1$ должна составлять около 35 Гц. Появление сигнала высокого уровня на выходе Q3 элемента DD3.1 говорит о том, что питания не было дольше, чем 0,1 с. На три входа элемента ИЛИ-НЕ DD4.1 подаются три сигнала. Первый из них – сигнал включения питания – служит для перевода реле в дежурное состояние, второй – выключения питания для его перевода в состояние тревоги, и собственно сигнал тревоги заданной длительности, по началу которого реле устанавливается в состояние тревоги, а по окончании – в дежурное состояние. На вход сдвига С регистра DD2.2 подается последовательность импульсов с частотой $f2 = 50$ Гц, благодаря чему на выходе элемента DD2.4 формируется сигнал начала тревоги (НТ) длительностью ровно 20 мс, а на выходе DD2.3 – сигнал окончания тревоги (КТ). Дальнейшая часть схемы повторяет рис. 1.4.16б. Данная схема не содержит времязадающих конденсаторов, поэтому она компактна, а ее параметры весьма стабильны.

Питание микросхем DD2, DD3 и DD4 должно производиться от точки гарантированного питания а. Импульсные сигналы с частотой $f1$ и $f2$ могут формиро-

ваться генераторами на двух инверторах (аналогично изображенному на рис. 1.4.14). Питание генераторов также должно осуществляться от точки а. Вторая возможность — общий генератор с цепочкой делителей, питаемые от общего для всего СО напряжения. В этом случае между выходами генератора и входами С регистров DD3.1 и DD3.2 должны быть установлены преобразователи уровней (например, на микросхеме 561ПУ4, питаемой от цепи а) для согласования уровней сигналов. Все приведенные схемы (рис. 1.4.16) реализованы на поляризованных реле РПС45.

Сигнал пропадания напряжения питания в приведенных схемах совмещается с сигналом тревоги и переводит реле в «тревожное» состояние. Подобное решение обеспечивает простоту построения СО, но оно не всегда удобно. Непрерывный сигнал тревоги может говорить как об отсутствии питания, так и о банальном обрыве сигнальной линии, а возможно и о попытке нарушителя снять СО. Если есть возможность раздельной передачи сигналов, то естественно направить сигнал снижения напряжения питания с катода DA1 (рис. 1.4.16) не на реле тревоги, а по отдельной цепи.

Оптореле

Электромагнитные реле — как обычные, так и поляризованные — при использовании их в СО обладают рядом недостатков. В основе этих реле лежит принцип электромагнита. Поэтому любое из них подвержено воздействию магнитных полей. В свое время мы выбрали из всего множества реле те, которые срабатывают при протекании через управляющую обмотку минимальных токов. Действующие магнитные поля в них также невелики, а якорь — весьма чувствителен. Порог срабатывания вряд ли может быть достигнут флуктуацией магнитного поля Земли или магнитной бурей. А вот близость сильного магнита или мощного электродвигателя способна повлиять на работу «сердца» СО. Можно защитить реле, разместив его внутри магнитного экрана, представляющего собой контейнер из ферромагнитного материала толщиной в несколько миллиметров. Однако, при этом возрастут и размеры и стоимость СО. Второй недостаток электромагнитных реле заключается в повышенной чувствительности к ударам и вибрации. Подвижность якоря проявляется наиболее сильно, когда напряжение на обмотке понижено и не достигает значения рабочего напряжения, а также когда направление ударов перпендикулярно к оси поворота якоря. Еще один недостаток электромагнитных реле вновь связан с наличием в них механических элементов, он проявляется в пониженной надежности реле. После каждого срабатывания немного стирается ось якоря, слегка растягивается возвратная пружина; постепенное старение приводит к тому, что параметры реле меняются. Через несколько лет непрерывной эксплуатации якорь реле может заклинить и любое срабатывание станет последним. Механизм реле находится в замкнутом объеме корпуса, не только изолирующего его от внешних воздействий, но и повышающего теплоизоляцию реле. Как результат, четвертый недостаток — возможность перегрева реле. Он прояв-

ляется при пониженном атмосферном давлении, длительной подаче напряжения на обмотку реле или при слегка повышенном напряжении на обмотке реле, так как зависимость рассеиваемой мощности от напряжения — квадратичная. Все недостатки — не очень существенные, их можно преодолеть. Но лучше, чтобы их не было совсем. Полное избавление дает применение оптоэлектронных реле или просто — оптореле.

Оптореле (рис. 1.4.17а) состоит из входного инфракрасного светодиода и выходных МОП-транзисторов, управляемых фоточувствительной схемой. Светодиод играет роль управляющей обмотки реле, МОП-транзисторы — выходных контактов реле. Пока через светодиод протекает достаточный ток, сопротивление МОП-транзисторов будет иметь небольшое значение. Полное представление о работе оптореле дает зависимость сопротивления между выходными контактами $R_{\text{ВЫХ}}$ от входного тока $I_{\text{ВХ}}$ (рис. 1.4.17б). При возрастании входного тока $I_{\text{ВХ}}$ от 0 до 0,2...0,7 мА (в зависимости от типа и конкретного экземпляра оптореле, внешних условий и т.п.) выходные «контакты» разомкнуты и $R_{\text{ВЫХ}} \approx 100$ ГОм. При дальнейшем возрастании тока до значений $I_{\text{ВХ}} = 1...2$ мА выходные МОП-транзисторы открываются и их сопротивление резко падает до $R_{\text{ВЫХ}} \approx 100$ Ом. Светодиод работает в инфракрасном диапазоне, поэтому падение напряжения на нем невелико и составляет около $U_{\text{ВХ}} \approx 1,0$ В. Увеличение тока до 5 мА обеспечивает надежное открывание оптореле. Максимальное значение входного тока $I_{\text{ВХ}} \approx 25$ мА, при этом напряжение на светодиоде возрастает до $U_{\text{ВХ}} \approx 1,5$ В. Дальнейшее увеличение входного тока нежелательно, так как светодиод может выйти из строя. При уменьшении входного тока все стадии протекают в обратном порядке; в отличие от электромагнитных реле, оптореле не обладают гистерезисом.

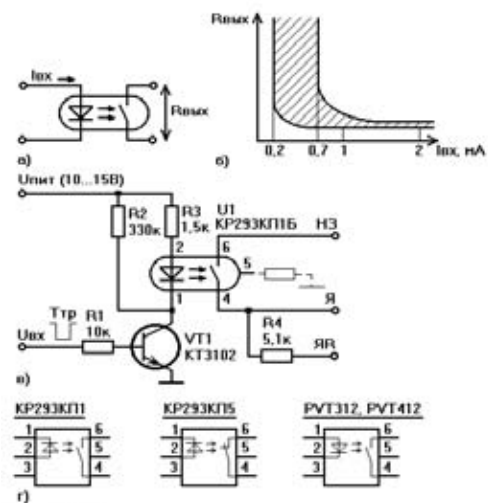


Рис. 1.4.17 Оптореле

Оптореле обладают рядом важных достоинств. Конструкция оптореле монолитная или, как говорят, твердотельная. В нем нет подвижных деталей и контактов, а коммутация цепей производится электронными схемами. Благодаря этому, для оптореле характерны

высокая надежность, длительное время жизни, высокая скорость переключения и отсутствие дребезга контактов. Связь управляющего светодиода и выходных контактов осуществляется с помощью ИК излучения, поэтому обе цепи электрически не связаны. По сравнению с электромагнитными реле, оптореле отличаются невосприимчивостью к внешним магнитным полям, повышенной стойкостью к ударам и вибрации, меньшими размерами и более высокой чувствительностью, то есть срабатыванием при малых входных токах. Есть и недостатки. Некоторые оптореле имеют ограничения на минимальный коммутируемый ток на уровне 0,1...0,5 мА, так как токи утечки МОП-транзисторов в разомкнутом состоянии могут достигать десятков микроампер.

Схема включения оптореле приведена на рис. 1.4.17в. Ее питание осуществляется от нестабилизированного источника напряжением от 10 до 15 вольт. В дежурном режиме входное напряжение $U_{вх}$ близко к напряжению питания $U_{пит}$. В течение сигнала тревоги оно уменьшается до 0 В. Сопротивление резистора R3 должно обеспечивать в наихудших условиях ток через светодиод не менее 5 мА (в дежурном режиме). Учитывая максимальное напряжение на светодиоде 1,5 В и максимальное напряжение коллектор-эмиттер открытого транзистора VT1 0,25 В, получаем $R3 \leq (10 В - 1,5 В - 0,25 В) / 5 мА = 1,65 кОм$. Можно установить $R3 = 1,5 кОм \pm 10\%$. Максимальный ток через светодиод составит $I_{max} = (15 В - 1 В) / 1,35 кОм = 10 мА$. Чтобы транзистор работал в ключевом режиме, ток базы должен составлять одну десятую от тока коллектора, отсюда величина сопротивления $R1 \leq (15 В - 1 В) / 1,0 мА = 14 кОм$. Например, $R1 = 10 кОм \pm 10\%$. Для устойчивой работы оптореле необходим еще один резистор – R2. Он шунтирует небольшой коллекторный ток I_c транзистора VT1 в закрытом состоянии. Отсутствие излучения любого инфракрасного светодиода гарантируется при напряжении на нем менее 0,8 В, поэтому $R2 \leq 0,8 В / I_c$. Для максимального тока $I_c = 2 мА$ получим $R2 \leq 400 кОм$, например, $R2 = 330 кОм \pm 20\%$. Сопротивление резистора R4, как и прежде, $R4 = 1...30 кОм$.

Основная цель использования оптореле U1 (рис. 1.4.17в) заключалась в обеспечении полной гальванической развязки всей электронной схемы СО от внешних электрических цепей. Однако, это таит в себе одну опасность. Если гальванической связи действительно нет, например, когда СО питается от собственной аккумуляторной батареи и находится в изолированном неза-

земленном корпусе, то незначительные токи утечки (порядка $I \approx 1 пА$) могут привести к накоплению на СО статического заряда. За сутки ($T \approx 100000 с$) на емкости оптореле ($C \approx 100 пФ$) может накопиться заряд, дающий разность потенциалов $\Delta U = IT / C \approx 10^{-12} \times 10^5 / 10^{-10} = 1000 В$. Во избежание пробоя оптореле статическим электричеством полезно соединить его выходную и входную цепи резистором большого сопротивления от 1 до 10 МОм. Практически не влияя на работу аппаратуры, он обеспечит медленное стекание зарядов со СО. Например, можно соединить вывод 4, 5 или 6 оптореле U1 с общим выводом левой части схемы, как показано на рис. 1.4.17в пунктиром. Можно избрать и другой, хотя и более дорогостоящий путь, заключив СО в проводящую оболочку, которую впоследствии заземлить. Если пультовая аппаратура также заземлена, то заряды изначально не будут накапливаться.

Основные параметры некоторых наиболее подходящих оптореле приведены в таблице 1.4.3. Они коммутируют значительные токи до $I_{ком} = 300 мА$ и напряжения до $U_{ком} = 400 В$. Их цоколевка дана на рисунке 1.4.17г. Каждое из этих оптореле выполнено в корпусе DIP-6, размеры которого составляют 9,9×6,6×4,0 мм. Время включения – 2...3 мс. Оптореле КР293КП1 содержит одну группу нормально разомкнутых контактов (1НР), КР293КП5 – одну группу нормально замкнутых контактов (1НЗ). Имеются реле с двумя группами контактов: 2НР (КР293КП3), 2НЗ (КР293КП7), 1НР + 1НЗ (КР293КП9). Для работы вне помещений требуется повышенное (более 2000 В) напряжение изоляции, которое обеспечивается отечественными оптореле серии К449КП ($U_{изол} \geq 3000 В$). При необходимости управления мощной нагрузкой можно подобрать оптореле с коммутируемым напряжением до ~660 В и током до 100 А. Многие реле, управляющие включением нагрузки в сети переменного тока, обеспечивают ее подключение в момент перехода питающего напряжения через ноль, что обеспечивает минимальный уровень излучаемых помех.

Реле позволяет передавать сигнал тревоги по длинной проводной линии на центральный пульт. Для местной его индикации можно обойтись более простыми средствами. Индикация возможна в двух вариантах: с помощью светового или звукового сигнала. Наиболее экономичный способ визуальной индикации – использование излучения красного светодиода, хорошо видимого на расстояниях до нескольких десятков метров. Он удобен во время проверки работоспособности

Таблица 1.4.3 Параметры оптореле

Название	Фирма	Тип	$I_{вх}, мА$	$U_{вх}, В$	$I_{ком}, мА$	$U_{ком}, В$	$R_{вх}, Ом$	$U_{изол}, В$	Диапазон рабочих температур, °С
КР293КП1А	Протон	1НР	5	1,1...1,5	300	±60	5	1500	-45...+85
КР293КП1Б					100	±230	25		
КР293КП1В					100	±400	35		
КР293КП5А	Протон	1НЗ	5	1,1...1,5	250	±60	5	1500	-45...+85
КР293КП5Б					120	±230	25		
КР293КП5В					100	±350	50		
PLA110	Clare	1НР	5		150	400	22		
PVT312	IR	1НР	2		190	±250	10	4000	-40...+85
PVT412	IR	1НР	3		140	±400	27	4000	-40...+85

или настройки СО с небольшой ЗО. Перемещаясь вблизи от датчика, человек имеет возможность наблюдать наличие срабатываний в реальном времени. Схема местной световой индикации (рис. 1.4.18а) управляется тем же сигналом тревоги фиксированной длительности, который используется в реле тревоги. Времени свечения в несколько секунд вполне достаточно для того, чтобы убедиться в наличии срабатывания.

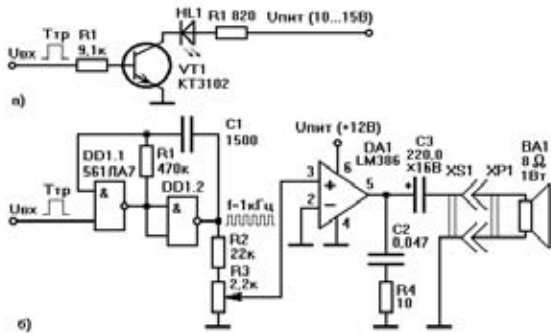


Рис. 1.4.18 Схемы световой и звуковой индикации сигнала тревоги

Если размеры ЗО превышают несколько десятков метров, разглядеть свечение светодиода будет сложно, особенно в яркий солнечный день. Здесь может быть полезен звуковой сигнал (рис. 1.4.18б). Вообще хотелось бы, чтобы зона отчетливой индикации срабатывания совпадала с ЗО датчика. Приведенная схема представляет стандартное включение микросхемы LM386 и при умеренной мощности около одного ватта обеспечивает дальность слышимости до 50 метров. Собственно звуковой излучатель ВА1 может быть съемным, что не только защищает его от механических повреждений, но и решает проблему отключения местной индикации после окончания пробных испытаний.

В пределах одной квартиры или небольшого домика можно отказаться от схем с гальванической развязкой, воспользовавшись более простыми схемами с открытым коллектором. Для этого достаточно исключить элементы VD1 и K1 из схемы рис. 1.4.15а, снимая сигнал тревоги непосредственно с коллектора транзистора VT1. Такой подход позволяет сэкономить не только на дорогостоящих реле, но и на одном проводе сигнальной цепи.

Пример. Определим параметры алгоритма некоторого тензометрического СО, если чувствительность используемого датчика равна $k = 20$ мкВ/Н, а минимальная длительность полезного воздействия составляет $\tau_{\min} = 0,2$ с. Тогда в состав СО войдут (рис. 1.4.19) чувствительный элемент (ЧЭ), усилитель (У) с коэффициентом усиления $K_{УС} = 200$, полосовой фильтр (Ф) с полосой пропускания от $F_H \approx 0,016 / \tau_{\min} = 0,08$ Гц до $F_B \approx 1,6 / \tau_{\min} = 8$ Гц, компаратор (К) с регулируемым порогом амплитуды $U_{\text{пор}} = 0,6...2,0$ В (что соответству-

ет силе воздействия от 15 до 50 кГ) и порогом длительности сигнала 0,2 с и реле тревоги (РТ).

Формированием сигнала тревоги заканчивается алгоритм обнаружения или селекции полезных сигналов на фоне помеховых. Зная параметры этих сигналов и параметры алгоритма – нижнюю и верхнюю частоты фильтра F_H и F_B , порог срабатывания $U_{\text{пор}}$ и время селекции по длительности τ_{\min} – можно оценить вероятность обнаружения P_o и время наработки на ложную тревогу $T_{\text{лт}}$. Есть ряд более или менее обязательных элементов, входящих в состав СО, которые не связаны непосредственно с алгоритмом обнаружения. Они реализуют вспомогательные функции СО и их наличие направлено на улучшение его неосновных характеристик. К этим элементам относятся схемы преобразователей и стабилизаторов напряжения, датчиков вскрытия (ДВ), проверки работоспособности (ПР) или дистанционного контроля (ДК), тактовые генераторы, схемы грозозащиты и заземления. Ограниченный объем изложения не позволяет остановиться на них более подробно. Отметим лишь вкратце. Схемы питания обеспечивают стабильную работу СО от различных, в том числе нестабилизированных, источников напряжения и автоматический переход на резервное питание в случае пропадания основного. ДВ сигнализирует о попытках вскрытия корпуса СО или его снятия с места первоначальной установки. Схема ПР проводит постоянный контроль работоспособности средства. Генераторы тактовых импульсов (ГТИ) синхронизируют работу составных элементов; они позволяют избавиться от ненадежного и нестабильного способа задания временных интервалов с помощью RC-цепочек. Схемы грозозащиты предохраняют электронику СО от импульсов перенапряжения, которые могут быть вызваны не только молнией, но и различного рода наводками или разрядами статического электричества. От правильно выбранного заземления зависит многое в работе аппаратуры. Попробуйте ответить хотя бы на простейший вопрос: какой полюс источника питания следует заземлять – положительный или отрицательный?

Итак, необходимыми составными частями пассивного СО являются усилитель, фильтр, компаратор и реле тревоги. Стандартная схема построения ЧЭ-У-Ф-К-РТ часто обеспечивает удовлетворительные результаты, особенно в условиях умеренной помеховой обстановки. В более суровых условиях она может давать сбои в виде отдельных пропусков или ложных срабатываний. Борьба с помеховыми воздействиями требует усложнения схем построения СО и алгоритмов обработки сигналов. Существует более двадцати типовых методов усовершенствования СО, таких как подавление импульсных помех, автоматическая подстройка параметров алгоритма, выделение дополнительных информативных признаков, однако их описание выходит за рамки данного изложения.

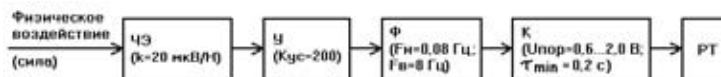


Рис. 1.4.19 Блок-схема тензометрического СО

1.5. Активные средства обнаружения

Активные СО по степени сложности находятся выше пассивных. Они отличаются значительным разнообразием, как принципов действия, так и внутреннего устройства. Наибольшее сходство с пассивными СО имеют активные СО, работающие за счет отражения собственного излучения от обнаруживаемого объекта. Излучатель (И) служит в них для своеобразной «подсветки» ОО (рис. 1.5.1а). Определим примерный вид электрического сигнала на выходе ЧЭ, формируемого при перемещении ОО. Во время отсутствия ОО отраженный сигнал либо имеет нулевой уровень (в идеале), либо уровень естественного фона (рис. 1.5.1б, положение 1). При перемещении ОО из точки 1 в точку 2 интенсивность излучения, попадающего на ЧЭ, будет возрастать. В соответствии с этим увеличится и уровень электрического сигнала на выходе ЧЭ (положение 2). После ухода ОО из ЗО (положение 3) все вернется в исходное состояние. Схема дальнейшей обработки сигналов с выхода ЧЭ и принятия решения будет (в простейшем случае) идентична типовой схеме построения пассивного СО (рис. 1.4.2).

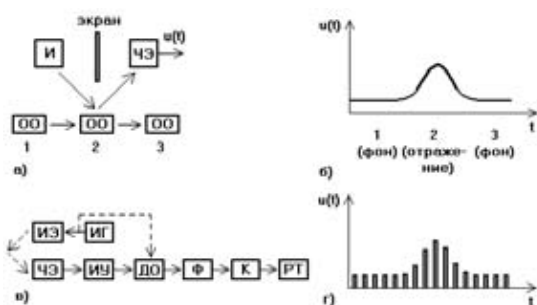


Рис. 1.5.1 Типовое активное СО с отражением

С целью экономии практически всегда излучатель И посылает воздействие в окружающую среду не непрерывно, а отдельными небольшими порциями. В результате мы получаем другой вариант блок-схемы активного СО с отражением (рис. 1.5.1в). Здесь ИГ – импульсный генератор, то есть генератор электрического сигнала в виде коротких прямоугольных импульсов, следующих с определенным периодом. В принципе возможно использование генераторов импульсов другой формы или пачек импульсов, например, для распознавания «своего» сигнала от «чужого». Генератор управляет излучающим элементом ИЭ. Импульсы излучения рассеиваются в пространстве в ожидании нарушителя. Воспринимая отдельные порции воздействия, ЧЭ формирует на своем выходе электрический сигнал $u(t)$, также состоящий из отдельных импульсов различной амплитуды. Амплитуда меняется как в связи с перемещением ОО, так и по причине воздействию различных помеховых факторов. После прохождения импульсного усилителя ИУ необходимо преобразовать отдельные импульсы (рис. 1.5.1г) в непрерывный сигнал, соединяющий «вершины» импульсов. Этой цели служит детектор огибающей (ДО). Главное преимущество активного СО с отражением состоит в том, что оно

может быть однопозиционным, благодаря чему нет необходимости прокладывать два отдельных кабеля к передающему и приемному блокам СО. Разместив излучатель и приемник в одном корпусе, получаем дополнительное преимущество – возможность использования сигнала ИГ для выделения огибающей ДО. Эта связь показана на рис. 1.5.1в пунктиром, она позволяет значительно повысить качество восстановления огибающей. После ДО, как и обычно, следуют фильтр (Ф), компаратор (К) и реле тревоги (РТ). Они хорошо знакомы нам по анализу пассивных СО (п. 1.4). По сравнению с типовой схемой пассивного СО (рис. 1.4.2) появились два новых элемента: ИГ и ДО. Собственно ИЭ в зависимости от назначения может быть излучателем акустических или электромагнитных волн, инфракрасных или световых лучей. От него требуется только лишь способность быстро реагировать на управляющий электрический сигнал, поступающий от ИГ.

Другая разновидность активных СО – лучевые СО. В основе их работы лежит прерывание нарушителем искусственного потока, излучаемого СО. Они не намного сложнее рассмотренных выше активных СО с отражением. ЧЭ активного лучевого СО постоянно воспринимает воздействие его излучателя И (рис. 1.5.2а). В целях экономии излучаемый сигнал также импульсный. Вид сигнала на выходе ЧЭ несколько отличается (рис. 1.5.2б). Теперь импульсы имеют наибольшую амплитуду во время отсутствия ОО. При появлении ОО он перекрывает луч и величина сигнала огибающей падает до нуля или хотя бы слегка уменьшается. Перекрытие будет неполным, если ширина луча превосходит размеры человека. Для радиолучевых СО может наблюдаться и обратная картина: убывание величины сигнала в отдельные моменты времени сменяется ее возрастанием. Но это не меняет суть дела: постоянная составляющая будет отфильтрована ФВЧ, а компаратор К может быть как однопороговым, так и двухпороговым. Таким образом, типовая схема активного лучевого СО (рис. 1.5.2в) почти полностью совпадает со схемой активного СО с отражением (рис. 1.5.1в). Она состоит из импульсного генератора (ИГ), излучающего элемента (ИЭ), чувствительного элемента (ЧЭ), детектора огибающей (ДО), фильтра (Ф), компаратора (К) и реле тревоги (РТ).

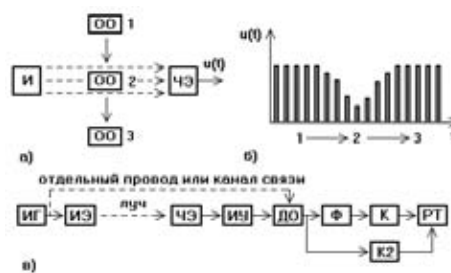


Рис. 1.5.2 Типовое активное лучевое СО

Следует сделать два важных замечания общего характера относительно лучевых СО. Во-первых, излуча-

тель и приемник лучевого СО почти всегда располагаются в различных блоках, устанавливаемых на значительном расстоянии друг от друга. Теперь для получения сигнала ИГ, необходимого в процессе выделения огибающей, его придется передавать по отдельному проводу или по специальному каналу связи. Канал должен быть достаточно высокочастотным, чтобы обеспечивать точность передачи фронтов импульсов по порядку величины не ниже одной микросекунды. Это настолько усложняет работу СО, что часто предпочтение отдается варианту ДО, который должен восстанавливать огибающую, не имея информации о моментах активации передающего блока. В этом случае, если вблизи друг от друга работают два одинаковых лучевых СО, то приемник не сможет отличить «свои» импульсы от «чужих». Во-вторых, после прохождения сигналом фильтра Ф мы теряем информацию о наличии его постоянной составляющей. Иными словами, быстрое исчезновение самого луча приведет к формированию сигнала тревоги, а медленное останется незамеченным. К подобной ситуации может привести старение элементов, постепенное смещение передатчика или приемника, дрейф несущей частоты излучателя или загрязнение блоков. А может быть и простое экранирование луча посторонним предметом. СО медленно перестанет существовать, а все будут уверены в его работоспособности. Против этого лучевое СО должно иметь дополнительную цепь, следящую за наличием постоянной составляющей принимаемого сигнала. В эту цепь входит второй компаратор (К2). В случае длительного (более нескольких десятков секунд) ослабления луча ниже уровня, задаваемого порогом компаратора К2, должен быть сформирован сигнал тревоги.

Сигнал активного СО с отражением при появлении нарушителя возрастает (рис. 1.5.1г). Сигнал лучевого СО, наоборот, убывает (рис. 1.5.2б). Существует и третий тип активных СО — активные СО со взаимодействием. Они составляют значительную часть активных СО и занимают промежуточное положение между активными СО с отражением и лучевыми СО. В основном они имеют объемную ЗО за счет широких диаграмм направленности ИЭ и ЧЭ. В активных СО со взаимодействием имеется постоянная связь излучателя и приемника, а появление нарушителя приводит к изменению начального уровня сигнала, как в сторону его возрастания, так и убывания (рис. 1.5.3а). Например, если расположить два провода (один — излучающий электромагнитные волны, второй — принимающий) параллельно друг другу на расстоянии порядка нескольких метров, то появление человека в различных точках будет приводить то к увеличению уровня принимаемого сигнала за счет дополнительного отражения от человека, то к уменьшению сигнала за счет частичного перекрытия потока излучаемой энергии. Величина отношения максимального изменения сигнала ΔU к его постоянной составляющей U называется глубиной модуляции $m = \Delta U / U$. Она часто измеряется в процентах и для различных типов СО составляет от нескольких десятков до нескольких десятых долей процента. Типовая схема активного СО со взаимодействием

(рис. 1.5.3б) ничем не отличается от схемы лучевого СО, кроме, возможно, наличия двух порогов у компаратора К. И это действительно так. Ряд лучевых СО превращается в объемные активные СО путем простой замены ИЭ и ЧЭ (так называемых передающих и приемных головок).

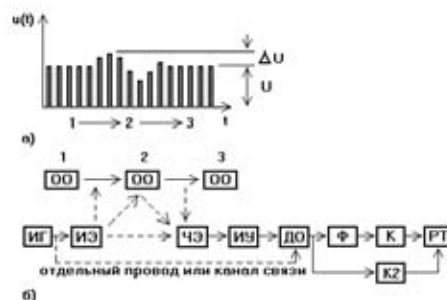


Рис. 1.5.3 Типовое активное СО со взаимодействием

Таким образом, по сравнению с рассмотренными ранее схемами пассивных СО (рис. 1.4.2) в активных СО появляются три дополнительных блока: ИГ, ИЭ и ДО. Для СО различных типов ИГ отличаются только значениями параметров выходных импульсных последовательностей, а ДО — наличием или отсутствием синхронизирующего сигнала с выхода ИГ. ИЭ различны для СО различных типов, поэтому далее будут рассмотрены варианты реализации ИГ и ДО.

Конечно, импульсный усилитель ИУ несколько отличается от просто усилителя У (рис. 1.4.2). Но только полосой усиливаемых частот. Ранее мы рассматривали вопрос выбора нижней F_H и верхней F_B частоты для усиления прямоугольного импульса длительностью $T_{имп}$. Полученные оценки справедливы и в данном случае: $F_H \approx 0,016 / T_{имп}$; $F_B \approx 1,6 / T_{имп}$. Так, например, для длительности $T_{имп} = 1$ мс частоты полосового усилителя составят от 16 Гц до 1600 Гц.

Импульсный генератор

Принцип действия ИЭ практически всегда состоит в формировании определенного типа излучения при подаче на него напряжения питания (или управляющего напряжения). В ответ на импульс напряжения следует импульс излучения той же длительности за исключением, возможно, небольших переходных процессов в начале и в конце импульса. В качестве ИЭ может выступать светодиод с оптической системой, диод Ганна с резонатором и антенной или генератор радиочастотного диапазона. Излучение формируется в течение всего времени, когда на ИЭ подается напряжение. Если оно подается непрерывно, то излучение ИЭ является непрерывным, а само активное СО называется непрерывным. Обычно управляющее напряжение подается в виде отдельных импульсов (рис. 1.5.4а), тогда и СО называется импульсным. Импульсное питание (или управление) ИЭ обеспечивает ряд существенных преимуществ СО по сравнению с непрерывным:

- низкое энергопотребление ИЭ, которое пропорционально отношению длительности импульса $T_{имп}$ к периоду следования импульсов T , то есть

- $T_{\text{имп}} / T$; мощность, потребляемая ИЭ, часто составляет основную часть мощности, потребляемой СО в целом;
- высокая степень маскировки, благодаря пониженному среднему уровню излучения;
 - повышенная надежность, связанная с рациональным и экономным использованием ИЭ, общий ресурс которого бывает ограничен; время наработки на отказ ИЭ пропорционально тому же отношению $T_{\text{имп}} / T$; длительность непрерывной работы некоторых ИЭ невелика, поэтому при работе в непрерывном режиме их пришлось бы периодически менять на новые;
 - высокая помехоустойчивость; непрерывный режим работы сопровождается столь высоким уровнем низкочастотных фликкер-шумов, что активные СО ряда типов, например, уличные оптические видимого диапазона длин волн, абсолютно неработоспособны, так как невозможно пересветить солнце, а активные СО других типов — имеют ограниченную дальность действия; спектр периодических импульсов лежит в узкой полосе высоких частот, так что последовательность искусственных световых вспышек будет отчетливо заметна даже на фоне значительной естественной засветки; в импульсном режиме возможно отстроиться от множества весьма интенсивных помеховых воздействий, он столь же важен для активных СО, как и гетеродин для радиоприема;
 - безопасность для людей; большинство видов излучения не добавляет здоровья.

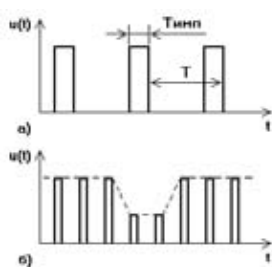


Рис. 1.5.4 Управляющие импульсы

Преимущества достигаются с помощью введения несложной схемы импульсного генератора (ИГ), на выходе которого формируется периодическая последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1.5.4а). Активные СО с непрерывным излучением встречаются редко и лишь в тех случаях, когда результат взаимодействия излучения и ОО зависит не от мгновенного их состояния, а от всей предыстории процесса.

Все вышеперечисленные достоинства импульсного режима работы активных СО проявляются в наибольшей мере, если период следования импульсов T будет максимальным, а длительность импульса $T_{\text{имп}}$ — минимальной. Выбрав слишком большой период T , мы рискуем пропустить самого мелкого и быстрого нарушителя, и с этой точки зрения период T должен быть минимальным, обеспечивающим обнаружение любого

ОО. После приема последовательности импульсов необходимо контролировать постоянство их амплитуды (рис. 1.5.4б). Обнаружив отклонение в одном импульсе, говорить о появлении нарушителя рано — это может быть импульсная наводка, муха, пылинка или сбой питания. Решение следует принимать после обнаружения подряд K «дефектных» импульсов ($K = 2 \dots 8$). Тогда максимальному периоду следования импульсов T_{max} будет соответствовать минимальные размеры ОО b_{min} и максимальная скорость передвижения v_{max} , то есть $T_{\text{max}} = b_{\text{min}} / ((K+1)v_{\text{max}})$. Здесь к значению K добавлена единица, так как момент появления нарушителя заранее неизвестен, а длительность импульса $T_{\text{имп}}$ значительно меньше периода T . Данный факт поясняет рис. 1.5.4б, где полагается $K = 2$. Для худого человека $b_{\text{min}} = 0,2$ м и максимального значения скорости $v_{\text{max}} = 7$ м/с получим $T_{\text{max}} = 0,2 / ((K+1) \times 7) = 0,0095 \dots 0,0032$ с в зависимости от принятого в алгоритме обнаружения значения K в пределах от двух до восьми. Диапазон соответствующих частот составит $f_{\text{min}} = 105 \dots 315$ Гц. Напомним, что во избежание пропусков нарушителя период ИГ должен быть не более приведенной оценки T_{max} (а частота — не менее f_{min}). Необходимо учитывать и стабильность генератора. Если $K = 2$, то частота кварцевого ИГ может быть установлена равной 105 Гц, а частота РС-генератора должна быть выбрана около 150 Гц с учетом ее возможного значительного дрейфа.

При оценке длительности импульса $T_{\text{имп}}$ следует учитывать следующие факторы:

- ИЭ начинает излучать (с требуемыми параметрами) не сразу после подачи импульса напряжения питания (или управляющего напряжения); для большинства полупроводниковых ИЭ (светодиоды, диоды Ганна) время выхода на режим не превышает 1 мкс;
- ЧЭ также должен успеть выйти на рабочий режим, чтобы успеть эффективно и точно воспринять свою долю излученного импульса; здесь время выхода на режим обычно меньше, так как на ЧЭ постоянно подано напряжение питания, а величина принимаемого импульса невелика;
- излучатели и приемники обычно имеют высокую добротность, чтобы увеличить помехоустойчивость СО; добротность Q оценивается отношением несущей частоты излучателя F к ширине полосы частот ΔF , то есть $Q = F / \Delta F$; известно, что чем выше добротность, тем дольше длится переходной процесс, который следует исключить из анализа принимаемых импульсов; амплитуда переходного процесса $A(t)$ в зависимости от времени t описывается экспоненциальным законом $A(t) = A_0(1 - \exp(-2\pi Ft / 2Q))$, где A_0 — интересующее нас значение амплитуды установившихся колебаний; до уровня, соответствующего заданной глубине модуляции m , амплитуда $A(t)$ возрастет за время τ , определяемое из выражения $m = (A(\tau) - A_0) / A_0 = \exp(-\pi F \tau / Q)$ или $\pi F \tau / Q = \ln(1/m)$; поэтому время выхода на режим не может быть меньше, чем $\tau = Q \ln(1/m) / (\pi F)$; например, для генератора, ра-

ботающего на частоте $F = 100$ МГц, приемника с добротностью $Q = 50$ и алгоритма обнаружения с пороговой глубиной модуляции $m = 0,05$ время выхода на режим составит не менее $\tau = 0,5$ мкс; из последнего выражения следует одно полезное для практики наблюдение: добротность Q приблизительно равна числу периодов $1/F$, в течение которых амплитуда затухающих колебаний убывает в 20 раз (так как $e^\pi \approx 20$);

- в электронных блоках СО широко применяются недорогие ЭРЭ: ОУ общего назначения и цифровые логические микросхемы КМОП; они обеспечивают длительности фронтов сигналов на уровне $0,1 \dots 1$ мкс.

Таким образом, для большинства типов СО не удается сделать длительность импульса $T_{\text{имп}}$ менее $1 \dots 10$ мкс.

Зная основные параметры ИГ, можно рассмотреть наиболее предпочтительные варианты его реализации. Минимальное количество деталей требуется при изготовлении ИГ на основе однопереходного транзистора (рис. 1.5.5). Транзистор КТ117 имеет один р-п переход и две базы. Принцип работы ИГ заключается в периодической зарядке конденсатора $C1$ через резистор $R1$ до порогового уровня транзистора и в последующей быстрой разрядке конденсатора через открывающийся переход транзистора. Частота следования импульсов составляет около $1/T = 500$ Гц, а длительность импульса $T_{\text{имп}} = 10$ мкс. Данный ИГ надежен и компактен, но период следования импульсов T не слишком стабилен, а длительность импульса $T_{\text{имп}}$ регулируется в узких пределах. Еще один недостаток — уникальность однопереходного транзистора и сложность его замены.

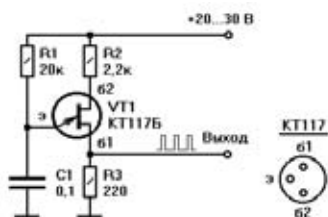


Рис. 1.5.5 ИГ на однопереходном транзисторе

Более доступен ИГ на основе аналога однопереходного транзистора, составленного из двух биполярных транзисторов различной проводимости (рис. 1.5.6а). Схема работает следующим образом. В исходном состоянии конденсатор $C1$ разряжен, а транзисторы $VT1$, $VT2$ — закрыты. В результате включения напряжения питания $U_{\text{пит}} = +10 \dots 30$ В, конденсатор $C1$ начинает заряжаться через резистор $R1$. После того, как напряжение на эмиттере $VT1$ превысит напряжение на делителе $R2$, $R3$ примерно на $0,6$ В, транзистор $VT1$ откроется. В результате откроется транзистор $VT2$ и начнется быстрый разряд конденсатора $C1$ через эмиттерный переход транзистора $VT2$. По окончании разряда оба транзистора закроются и цикл заряда/разряда повторится. При закрытых транзисторах напряжение на выходе близко к напряжению питания, при открытых — к нулю. Таким образом, на выходе наблюдаются корот-

кие отрицательные импульсы на фоне постоянного высокого уровня. При указанных на схеме значениях частота импульсов составляет около $1/T = 500$ Гц, а длительность импульса $T_{\text{имп}} = 10$ мкс. Диод $VD1$ обеспечивает устойчивость запуска генератора. По сравнению с ИГ на однопереходном транзисторе (рис. 1.5.5) данный генератор дешевле, стабильнее, а параметры выходной последовательности регулируются в широких пределах изменением значений $C1$, $R1$, $R2$, $R3$. Нетрудно видеть, что через диод $VD1$ проходят импульсы тока нужного периода и длительности. Поэтому полупроводниковый излучающий элемент, — например, светодиод — может быть установлен непосредственно вместо $VD1$. Изменяя величину сопротивления резистора $R2$ в пределах от нескольких сотен ом до нескольких килоом, можно регулировать амплитуду импульса тока через $VD1$ от единиц миллиампера до 200 мА (максимально допустимый импульсный ток через транзистор КТ3102). Транзисторы КТ3102А, КТ3107А можно заменить на аналогичные транзисторы с индексом Б, а при пониженном напряжении питания — на транзисторы с другими буквенными индексами.

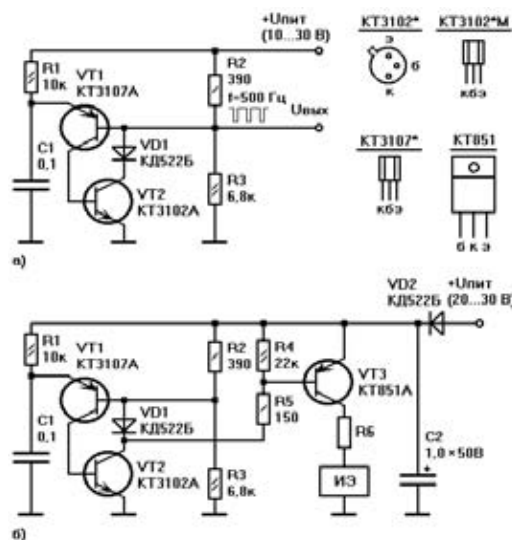


Рис. 1.5.6 ИГ на двух биполярных транзисторах

В случае необходимости увеличения тока импульса через ИЭ до $0,2 \dots 2$ А следует прибегнуть к усилению сигнала предыдущего ИГ с помощью транзистора $VT3$ (рис. 1.5.6б). Резистор $R6$ величиной до нескольких ом служит для ограничения тока через ИЭ. Транзистор КТ851А можно заменить на КТ814. Цепочка $VD2$, $C2$ служит для сглаживания напряжения питания излучателя. Схема (рис. 1.5.6б) может представлять собой полную схему передающего блока активного СО.

ИГ может быть реализован на логических элементах (рис. 1.5.7). Выбор в пользу логических элементов, транзисторов или ОУ зависит от общего построения СО в целом. ИГ на двух инверторах (рис. 1.5.7а) отличается от обычного генератора наличием отдельных цепей заряда и разряда конденсатора $C1$. Благодаря этому, период следования импульсов $T = \ln 2 \times R2 \times C1 \approx 0,69 R2 C1$ значительно отличается от длительнос-

ти импульса $T_{\text{имп}} = \ln 2 \times R_3 \times C_1 \approx 0,69R_3C_1$ и каждый из них допускает независимую регулировку. Резистор R_1 ограничивает входной ток элемента DD1.1. При приведенных на схеме значениях период импульсов на выходе DD1.2 составит $T \approx 2$ мс, а длительность импульсов $T_{\text{имп}} \approx 10$ мкс. Элемент DD1.3 служит для развязки цепей генератора от ИЭ и для усиления импульсов, так как микросхема 561ЛН2 обеспечивает на своем выходе втекающий ток низкого уровня до 10 мА. Резистор $R_4 = 1$ кОм ограничивает ток импульса отрицательной полярности на уровне 5 мА. Эти импульсы усиливает транзистор VT1, работающий в ключевом режиме. Стабилизированное напряжение питания составляет +10 В, от него же питается микросхема DD1. Резистор R_5 ограничивает ток через ИЭ величиной до 50 мА.

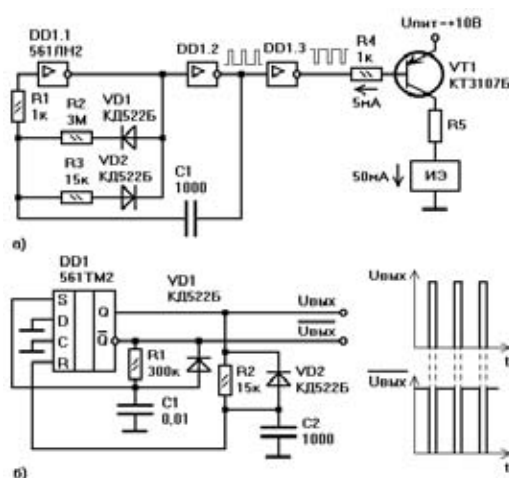


Рис. 1.5.7 ИГ на логических элементах

Несложный вариант ИГ, реализованный на триггере, приведен на рис. 1.5.7б. Длительность положительных импульсов на прямом выходе триггера составит около $T_{\text{имп}} = \ln 2 \times R_2 \times C_2 \approx 0,69 \times (15 \text{ кОм}) \times (1000 \text{ пФ}) \approx 10$ мкс. Период следования импульсов $T = \ln 2 \times R_1 \times C_1 \approx 0,69 \times (300 \text{ кОм}) \times (0,01 \text{ мкФ}) \approx 2$ мс. Достоинством схемы является возможность отдельной подстройки обоих параметров T и $T_{\text{имп}}$ и наличие наряду с прямым выходом $U_{\text{вых}}$ инверсного, что упрощает последующее усиление импульсов. Недостаток обеих схем на логических элементах (рис. 1.5.7) — невысокая стабильность параметров выходной последовательности импульсов, в основном, в связи с нестабильностью порогового уровня логических микросхем. Для микросхем серий 561, 564, 4000 величина порога близка к половине питающего напряжения, но она не нормирована и может меняться не только при изменении температуры или других внешних условий, но и в зависимости от выбранного экземпляра микросхемы.

Более стабильные параметры обеспечивает ИГ на основе ОУ (рис. 1.5.8). Делитель R_1, R_2 вместе с конденсаторами C_2, C_3 формирует «виртуальную землю» — средний уровень напряжения питания, равный $U_{\text{пит}} / 2$. На ОУ DA1 выполнен компаратор. Делитель R_5, R_6 устанавливает его порог на уровне $3U_{\text{пит}} / 4$ в течение поло-

жительного импульса на выходе ОУ. В этот промежуток времени конденсатор C_1 заряжается через резистор R_3 . Напряжение на C_1 возрастает и после достижения порога значение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ меняется на нулевое. Тогда делитель R_5, R_6 устанавливает порог компаратора, равный $U_{\text{пит}} / 4$, а конденсатор C_1 начинает разряжаться через резистор R_4 от исходного напряжения $3U_{\text{пит}} / 4$. После достижения порогового значения $U_{\text{пит}} / 4$ сигнал на выходе DA1 принимает значение, близкое к $U_{\text{пит}}$, и процесс повторяется. На выходе ИГ наблюдается непрерывная последовательность периодических импульсов. Длительность положительного импульса приблизительно равна $T_{\text{имп}} = \ln 3 \times R_3 \times C_1 \approx 1,1R_3C_1$; период следования импульсов — $T = \ln 3 \times R_4 \times C_1 \approx 1,1R_4C_1$. Для приведенных на рис. 1.5.8 значений параметров длительность импульсов составит $T_{\text{имп}} \approx 10$ мкс, а период $T \approx 2$ мс. В качестве DA1 можно использовать любой ОУ, подходящий по напряжению питания и скорости нарастания выходного сигнала.

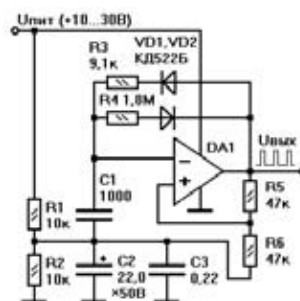


Рис. 1.5.8 ИГ на ОУ

Значительно упростить схему ИГ, улучшив при этом его стабильность, позволяет использование внешних генераторов тактовых импульсов (ГТИ) на основе высокостабильных кварцевых генераторов. Простота и качество ИГ достигаются за счет почти полного отсутствия таких элементов, как конденсаторы и резисторы. Первая схема (рис. 1.5.9а) выполнена на цифровой микросхеме D-триггера 561ТМ2. Его установочный вход S подсоединен к общему проводу (минусу питания), а вход данных D — к плюсу питания. Если на счетный вход C подать периодический импульсный сигнал с частотой f_1 , то по фронту каждого импульса на выходе Q будет устанавливаться сигнал высокого уровня. Подав на вход сброса R импульсный сигнал более высокой частоты f_2 , обеспечим формирование коротких импульсов. Для $f_1 = 512$ Гц и $f_2 = 32768$ Гц получим на выходе схемы импульсы длительностью $T_{\text{имп}} = 1/(2f_2) = 15,26$ мкс с периодом $T = 1/f_1 = 1,952$ мс. В данном генераторе использован тот факт, что смена состояний выходных сигналов всех счетчиков-делителей ГТИ происходит по спадам исходной импульсной последовательности. Поэтому проводник, идущий к входу R D-триггера, должен иметь минимальную длину.

Если в течение длительности импульса $T_{\text{имп}}$ необходимо провести несколько последовательных операций, то можно воспользоваться другой схемой ИГ (рис. 1.5.9б). Она выполнена на D-триггере 561ТМ2 и счетчике Джонсона 561ИЕ9. На счетный вход C D-триггера

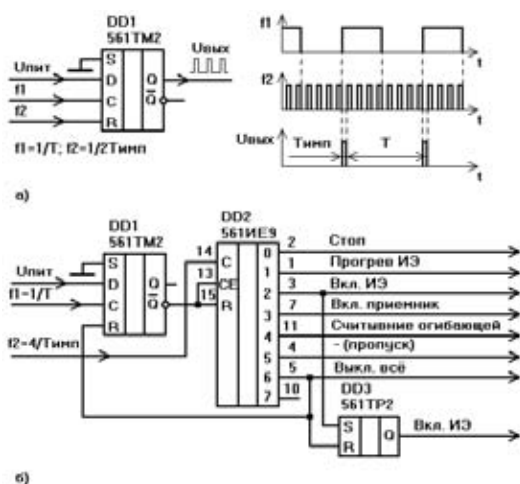


Рис. 1.5.9 ИГ с использованием ГТИ

подается последовательность импульсов с периодом, равным требуемому значению периода следования импульсов ИЭ. Для $f_1 = 512$ Гц получим $T = 1/f_1 = 1,952$ мс. На счетный вход С счетчика DD2 подается импульсная последовательность более высокой частоты f_2 . В результате на его выходах 0...7 последовательно появляются положительные управляющие импульсы, которые могут использоваться, например, в таком порядке: включить питание (прогрев) ИЭ, перевести ИЭ в режим излучения, включить приемник излучения, провести считывание огибающей импульсных сигналов, выключить всё (предварительно выждав паузу). Каждое последующее включение в данном ряду требует небольшой задержки во времени для выхода на режим предыдущего элемента. Например, после начала излучения ИЭ следует выждать короткий промежуток времени для стабилизации его параметров, и лишь затем включить приемник излучения и т.д. На выходе Q микросхемы DD3 будет сформирован положительный импульс для включения ИЭ. Его длительность в четыре раза превышает период исходной последовательности импульсов $1/f_2$, то есть $T_{\text{имп}} = 4/f_2$. Спустя период T вся последовательность действий повторится снова и т.д. Для $f_2 = 32768$ Гц длительность излучаемого импульса составит $T_{\text{имп}} = 4/f_2 = 122,1$ мкс (от фронта управляющего импульса на выходе 2 до фронта импульса на выходе 6 счетчика DD2). При необходимости все временные параметры ИГ данного типа легко изменяются как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Детектор огибающей

Детектор огибающей (ДО) необходим для восстановления плавного сигнала из значений амплитуд отдельных импульсов в заданные моменты времени (рис. 1.5.1г). На вход ДО поступает последовательность почти прямоугольных импульсов различной амплитуды; на его выходе должна наблюдаться гладкая кривая, соединяющая амплитудные значения импульсов.

Простейший вариант подобного устройства – диодный ДО (рис. 1.5.10). Принцип его действия заключается в периодической подзарядке конденсатора C1 до уровня входных импульсов. В течение длительности

одного входного импульса $T_{\text{имп}}$ конденсатор C1 должен успевать зарядиться через открытый диод VD2 до напряжения импульса, то есть $R_{\text{вых}}C1 < T_{\text{имп}}$. Следовательно, его емкость должна быть достаточно малой $C1 < T_{\text{имп}} / R_{\text{вых}}$. Для типичных значений $T_{\text{имп}} = 10$ мкс и $R_{\text{вых}} = 500$ Ом получим ограничение $C1 < 0,00001 / 500 = 0,02$ мкФ. Это ограничение не слишком жесткое, так как можно допустить зарядку конденсатора за несколько периодов, тогда и значение C1 можно несколько увеличить. С другой стороны, значение емкости C1 должно быть достаточно большим, чтобы конденсатор не успевал разряжаться в паузе между импульсами. Поэтому $R1C1 \gg T$ или $C1 \gg T / R1$. И это неравенство должно выполняться строго. Значение сопротивления R1 может быть большим (до 1...20 МОм), но его нельзя исключить полностью, так как при его отсутствии факт внезапного исчезновения импульсов будет долго оставаться незамеченным. Выбрав $R1 = 1$ МОм, для периода следования импульсов $T = 0,002$ с получим $C1 \gg 0,002 / 1000000 = 0,002$ мкФ. В данном случае можно выбрать $C1 = 0,01...0,02$ мкФ, в других случаях ограничения на C1 могут оказаться несовместимыми и потребуются корректировка значений T и $T_{\text{имп}}$. Диод VD1 служит для восстановления постоянной составляющей на выходе схемы, он необходим в том наиболее распространенном случае, когда сигналы на вход диодного ДО поступают через разделительный конденсатор.

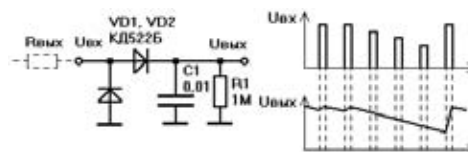


Рис. 1.5.10 Диодный ДО

Схема диодного ДО отличается предельной простотой и дешевизной. Однако, ее параметры не слишком стабильны, не только в связи с наличием конденсатора C1, но и с переменным смещением напряжения на диоде VD2. Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ схемы сравнительно хорошо отслеживает нарастание импульсов, но гораздо хуже – их резкое уменьшение. На получаемой огибающей присутствует постоянное «дрожание». Все это ограничивает возможности применения схемы диодного ДО сравнительно большими значениями рабочей глубины модуляции сигнала $m > 0,1...0,3$.

Наилучшие результаты обеспечивает синхронный ДО (рис. 1.5.11). Он называется синхронным, потому что считывание амплитуды импульсов производится в строго определенные моменты времени, синхронизированные с импульсами, управляющими ИЭ (рис. 1.5.9б, сигналы считывания огибающей). Импульсы синхронизации СИ имеют логические уровни. Они определяют те моменты, когда переходные процессы завершились, уровень излучения стабилизировался и можно произвести считывание амплитуды входных импульсов $U_{\text{вх}}$. По сигналу высокого уровня на входе СИ открывается канал X2-X мультиплексора DD1 и конденсатор C1 заряжается до уровня амплитуды вход-

ного импульса $U_{ВХ}$ (рис. 1.5.11). Сигнал низкого уровня на входе СИ закрывает канал входного сигнала и напряжение на конденсаторе С1 сохраняется почти неизменным до следующего синхроимпульса. Повторитель на микросхеме DA1 обеспечивает независимость параметров ДО от параметров схем последующей обработки сигнала огибающей. Конденсатор С1 должен отличаться стабильностью и малыми токами утечки. Его можно выбрать из числа полиэтилентерефталатных типа К73-16-63В или подобных. В паузе между импульсами синхронизации конденсатор С1 разряжается через резистор R2 и напряжение на нем падает по экспоненциальному закону $u(t) = u_0 \exp(-t/C1R2)$. За период T относительное изменение напряжения составит $(u_0 - u(T)) / u_0 = T / (C1R2)$. Оно должно быть много меньше рабочей глубины модуляции CO m, то есть $(C1R2) \gg T / m$. Из этого условия следует выбирать значения С1 и R2. Например, для рабочей глубины модуляции $D = 0,05$ постоянная времени разряда (C1R2) должна превосходить период следования импульсов T как минимум в 100...200 раз.

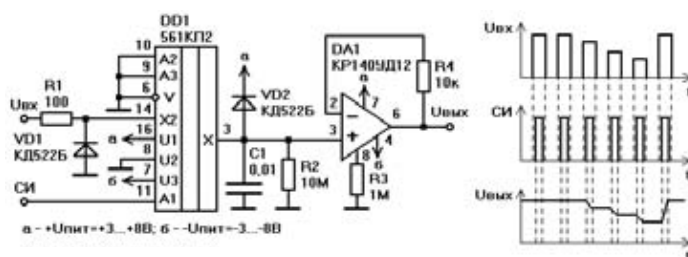


Рис. 1.5.11 Синхронный ДО

Приведенная схема (рис. 1.5.11) представляет собой один из вариантов схем выборки-хранения, которые позволяют в заданные моменты времени (по управляющему сигналу СИ) считывать значение входного сигнала $U_{ВХ}$, а в промежутках между синхроимпульсами — осуществлять его хранение. Они сложнее схемы диодного ДО, но хорошо отслеживают как рост, так и убывание амплитуды входных импульсов. На получаемой огибающей остаются небольшие «ступеньки», на которые можно не обращать внимания или, в крайнем случае, отфильтровать с помощью ФНЧ, имеющего верхнюю граничную частоту среза f_B порядка $1/T$. Схема синхронного ДО, без сомнения, представляет собой наилучший вариант восстановления огибающей, когда доступен исходный импульсный сигнал управления ИЭ.

Если излучатель и приемник выполнены в различных, удаленных друг от друга блоках и их невозможно соединить каналом связи для передачи импульсов взаимной синхронизации, тогда неизбежно использование асинхронных ДО. Синхроимпульсы СИ приходится формировать из самих входных импульсов $U_{ВХ}$, а затем использовать их для выделения огибающей. Принцип действия асинхронного ДО заключается в последовательном выделении фронта принятого импульса $U_{ВХ}$, задержке выделенного сигнала на фикси-

рованный интервал времени Δt ($\Delta t = (0,1...0,5) \times T_{ИМП}$) и выборке огибающей с помощью задержанных импульсов. Синхроимпульсы СИ укорачиваются так, чтобы не выходить за пределы длительности исходных импульсов, поступающих на вход $U_{ВХ}$.

На практике это может выглядеть следующим образом. Предполагается, что длительность импульса излучателя $T_{ИМП}$ известна и равна, скажем, 10 мкс. Схема ДО (точнее, той его части, которая восстанавливает необходимые СИ) приведена на рис. 1.5.12а, а временные диаграммы сигналов — на 1.5.12б. Входная последовательность периодических импульсов различной амплитуды $U_{ВХ}$ поступает прежде всего на усилитель, выполненный на элементах VT1, VD1, C1, R1, R2, R3. Дифференцирующая цепочка C2, R4 совместно с инвертором DD1.1 не только выделяет фронты поступающих импульсов, но и обеспечивает их задержку на $\Delta t = 0,7R4C2 = 3$ мкс, то есть на 30% длительности исходных импульсов. Последующая цепь C3, VD2, R5, DD1.2 формирует синхроимпульсы СИ длительностью 5 мкс и поэтому они не выходят за пределы импульсов излучателя (10 мкс). Подав сигналы $U_{ВХ}$ и СИ со схемы, изображенной на рис. 1.5.12а, на схему рис. 1.5.11, получим полную схему асинхронного ДО.

Входной сигнал, поступающий на ДО, представляет собой последовательность импульсов. Но, как и на любой реальный сигнал, на него накладываются помеховые импульсы. В результате на выходе асинхронного ДО (рис. 1.5.12а) возможно появление дополнительного выброса в ответ на единичный импульс наводки. Неболь-

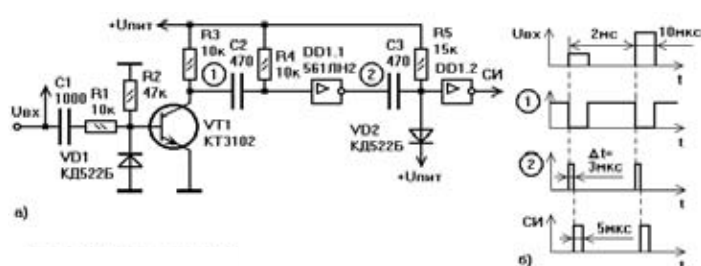


Рис. 1.5.12 Асинхронный ДО

шая группа импульсов в состоянии привести к ложному сигналу тревоги и с этим необходимо бороться. Асинхронный режим ДО является вынужденным. Исходная последовательность импульсов, инициирующая работу ИЭ, недоступна. Тем не менее, подавление лишних помеховых импульсов возможно. Период следования полезных импульсов T известен, поэтому следует игнорировать все сигналы, находящиеся в промежутке длительностью $(0,9...0,999)T$ от предыдущего принятого импульса. Закрывать на время глаза, чтобы не видеть ничего лишнего. Это позволит повысить помехоустойчивость обратно пропорционально времени активного ожидания импульсов, то есть примерно в 10...1000 раз. Для достижения высокой точности отсчета промежутков времени в пределах 0,1...10% потребу-

ется кварцевый генератор и цифровые схемы счетчиков, как на передающей, так и на приемной стороне.

Цифровой вариант асинхронного ДО приведен на рис. 1.5.13. На его вход поступают принятые и усиленные импульсы, огибающую которых необходимо восстановить. Для определенности, как и прежде, будем полагать длительность импульсов $T_{имп} = 10$ мкс, а период их следования $T = 2000$ мкс. Амплитуда входных импульсов $U_{вх}$ — переменная и составляет единицы вольт. Сначала они усиливаются каскадом на элементах C1, R1, R2, R3, VD1, VT1 до уровня напряжения питания. Затем на дифференцирующей цепочке C2, R4 и инверторе DD1.1 происходит выделение фронта принимаемого импульса. На нижнем по схеме входе элемента DD1.1 напряжение низкого уровня, поэтому отрицательный импульс с верхнего входа свободно проходит на его выход. Назначение нижнего входа станет понятно позже.

Фронт импульса, поступая на вход С D-триггера DD2.1, запускает каскад на элементах DD2.1, DD3, DD4.1. Данный каскад осуществляет формирование импульса длительностью ровно 5 мкс с задержкой 3...4 мкс. Точность задания интервалов времени обеспечивается кварцевым генератором на элементах DD5.1, DD5.2, ZQ1, R5. Счетчик DD3 меняет свое состояние по спадам импульсов с выхода инвертора DD5.2. Естественно предполагается, что временные параметры излучаемых импульсов ($T_{имп}$ и T) задаются с высокой точностью кварцевым генератором передающего блока.

На выходе триггера DD4.1 формируются синхроимпульсы СИ, позволяющие восстанавливать сигнал огибающей, например, с помощью схемы, изображенной на рис. 1.5.11. Однако, в таком виде серия помеховых импульсов привела бы к искажению огибающей, достаточному для формирования ложного срабатывания. Причин появления помеховых импульсов много: не только грозовой разряд или пуск коллекторного двигателя, но и передвижение мелких предметов в ЗО, наличие отраженных и эхо-сигналов. Зная, что последующий импульс поступит через период $T = 2000$ мкс после начала предыдущего, можно просто закрыть вход до окончания 90% периода, то есть на 1800 мкс. Этой цели служит каскад на элементах DD6.1, DD6.2, DD7.1, DD8.1, DD8.2, DD4.2. Он формирует сигнал высокого уровня на выходе Q триггера DD4.2, который через нижний вход элемента DD1.1 блокирует прохождение через него импульсов. Работа каскада синхронизируется импульсами с периодом 1 мкс, поступающими с выхода кварцевого генератора на вход CE счетчика DD6.1. Цепочка счетчиков DD6.1, DD6.2, DD7.1 осуществляет

подсчет по спадам импульсов. Начало отсчета времени задает импульс СИ, поступающий на входы сброса R элементов DD6.1, DD6.2, DD7.1, DD8.1, DD8.2 и переводящий их выходные сигналы в состояние низкого уровня. Одновременно импульс СИ устанавливает сигнал высокого уровня на выходе триггера DD4.2. Прохождение входных импульсов прекращается. Цепочка счетчиков DD6.1, DD6.2, DD7.1 осуществляет последовательное деление входной частоты в 2 раза. В результате сигнал высокого уровня на выходе «3» счетчика DD7.1 появится через 1024 мкс после окончания сигнала сброса, а еще через 512 мкс — повторно на его выходе «2», а следовательно, и на выходе Q триггера DD8.1. Еще через 256 мкс по фронту сигнала на выходе «1» элемента DD7.1 сигнал на выходе Q триггера DD8.2 перейдет в состояние высокого уровня. Теперь сигнал на выходе Q триггера DD4.2 возвращается в состояние низкого уровня, а следовательно, элемент DD1.1 вновь открывается для прохождения принимаемых импульсов. Входные «ворота» были закрыты в течение требуемого промежутка времени, равного $((3...4) + 5 + 1024 + 512 + 256)$ мкс = $(1800...1801)$ мкс.

В случае необходимости сужения «ворот» путем расширения запретной зоны до 99% или 99,9%, то есть в данном случае до $2000 \times 0,99 = 1980$ мкс или до $2000 \times 0,999 = 1998$ мкс, схема подвергнется минималь-

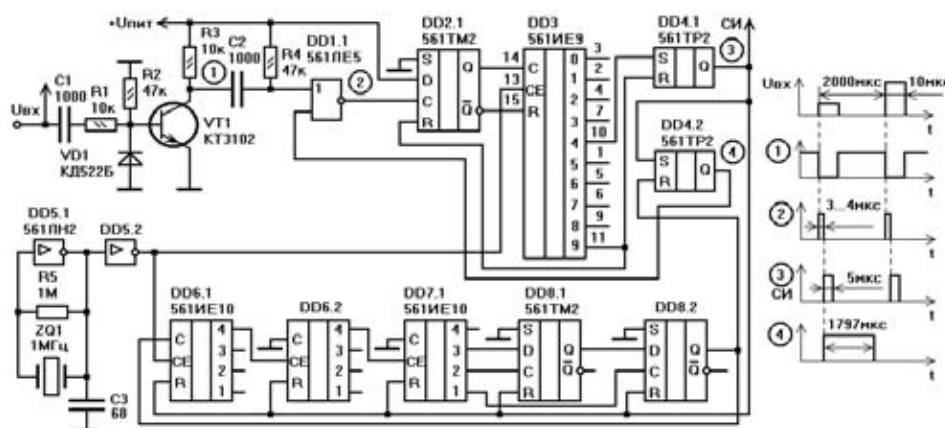


Рис. 1.5.13 Асинхронный ДО (цифровой)

ным изменениям. Цепочка делителей DD6.1, DD6.2, DD7.1 и триггер DD8.2 сохранятся, а элемент DD8.1 заменится комбинационной логической схемой, формирующей логическую единицу в нужный момент времени из выходных сигналов счетчиков DD6.1, DD6.2, DD7.1. Попутно отметим, что в зависимости от конкретного исполнения, на месте DD5 могут использоваться «лишние» элементы из микросхемы DD1 (или из других цифровых микросхем, используемых в полной схеме приемного блока СО), на месте DD4 — из DD2, на месте DD2 или DD8 — из DD7. Поэтому нумерация микросхем на рис. 1.5.13 носит условный характер, а нумерация их выводов не приводится.

Конкретные схемы ДО разнообразны и могут отличаться от приведенных, но принцип их построения всегда реализует один из двух вариантов: восстановле-

ние огибающей синхронно с излучаемыми импульсами (более предпочтительно) или асинхронно. Вариант асинхронного восстановления возможен как без восстановления СИ, так и с восстановлением. Последнее может быть как с входными «воротами», так и без них.

Асинхронные ДО всегда менее помехоустойчивы по сравнению с синхронными ДО, даже при наличии узкого промежутка открытых «ворот». Введение запретной зоны подавляет значительную часть помеховых воздействий, хотя и не может полностью исключить их. Но что гораздо хуже, наличие асинхронного ДО не допускает возможности одновременной работы нескольких однотипных СО вблизи друг от друга. Они будут неминуемо сбиваться со своих импульсов на импульсы соседа. В результате почти всегда — очень высокий уровень ложных тревог. Данный факт особенно важен для лучевых СО, которые часто устанавливаются в одну замкнутую цепочку. Не помогает даже направление смежных лучей в противоположные стороны (два излучателя рядом, а приемники — по разные сто-

роны от них), ведь рубеж — это не бесконечная прямая линия и передатчик одного из несмежных участков может оказаться вблизи от любого из приемников. Как результат, возникает необходимость либо в проводной (или иной) связи излучателя и приемника для передачи «своего» синхросигнала, либо в кодировании излучаемых импульсов с целью их персонификации, чтобы после приема отличать «свои» импульсы от «чужих». Еще один недостаток асинхронных ДО с восстановлением СИ — их неработоспособность при полном отсутствии принимаемых импульсов, хотя для активных СО с отражением этот режим может быть нормальным рабочим режимом.

Проблема восстановления гладкого сигнала по его ряду отсчетов в отдельные моменты времени успешно решается численными методами интерполяции и аппроксимации. Они составляют целый раздел математики. Их реализация требует вычислительных ресурсов и возможна при использовании микропроцессорных блоков обработки сигналов.

2. Средства обнаружения

Относительно любого СО можно встретить множество восторженных откликов, описаний, отзывов и исключительно положительных характеристик. Не надо говорить, что подавляющая их часть – или реклама или самореклама. Как отличить правду от вымысла и получить объективную оценку качества СО? Для этого необходимо сравнивать СО не по количеству красочных эпитетов, а по числовым значениям наиболее важных показателей. Тот или иной тип СО обладает вполне определенным уровнем, вытекающим из его физического принципа действия, и его модификации не могут радикально отличаться друг от друга. Для каждого типа СО имеют важность не только значения показателей, но и многие другие вопросы. Отметим двенадцать главных.

1) История. Чем древнее СО, тем богаче опыт его использования. За долгую историю каждого СО оно наверняка было опробовано при самых различных условиях, обстоятельствах и предназначениях. С другой стороны, новизна – это не только отсутствие опыта, но и благоприятные перспективы развития прогрессивных идей.

2) Распространенность. Широта использования СО определенного типа всегда говорит о его успешности. Высокое качество, подтвержденное богатой практикой, – что может быть лучше. Для любого вида техники, исключая охранную сигнализацию. Замки, сейфы и СО лучше выбирать не из числа продаваемых на каждом углу, а из числа наиболее надежных. Установленное СО должно быть незаметно нарушителю или, по крайней мере, незаметно. Слабая степень распространенности СО определенного типа часто свидетельствует о его нераскрытых способностях, – ведь соответствующий принцип обнаружения существует. В любом случае сведения о распространенности СО – важная информация к размышлению.

3) Тип СО. Под типами СО подразумеваются традиционные группы, к которым они могут быть отнесены: активные или пассивные, точечные, линейные или объемные, внутренние или внешние и т. д. Ряд СО допускает реализацию в рамках строго определенных типов. Объем нельзя защитить точечным СО, а ограду на подходе к фасаду здания – внутренним. Для чего нужны те или иные типы, было описано ранее.

4) Назначение СО. В широком смысле назначение СО известно. Оно состоит в обнаружении нарушителей. Однако, каждая задача имеет свою специфику, например, обнаружение объектов определенного типа. Кому-то важно не пропустить человека разумного, в ином месте объектами обнаружения могут быть и животные, поддающиеся дрессировке, такие как голуби, а в скором времени, благодаря успехам микроэлектроники, – возможно, и мухи. Кроме простого обнаружения, специфика использования может требовать распознавания вида ОО или оценки его параметров.

5) Состав СО. Любое пассивное СО состоит как минимум из ЧЭ, усилителя, фильтра, компаратора и реле тревоги. Все элементы могут размещаться в одном корпусе. Это наиболее удобно со всех точек зрения. Однако, специфика работы может потребовать размещения ЧЭ на удалении от СО или в виде самостоятельной

конструкции. Совместно с ЧЭ может находиться предварительный усилитель. Активное СО сверх того включает в себя хотя бы один излучатель или передатчик. Пассивное может содержать несколько одинаковых или различных ЧЭ. Многопозиционные и многолучевые СО состоят из большого количества различных блоков. Так что вариантов много, а состав СО – далеко не всегда однозначен.

6) Принцип действия. Физический принцип обнаружения представляет собой ту основу, которая отличает СО одного типа от другого. Но даже в рамках одного физического принципа возможно несколько вариантов построения, отличающихся типом датчика, взаимным расположением и ориентацией ЧЭ и излучателей, способом их размещения. Да и каждый вариант построения может иметь тот или иной набор информативных признаков, служащих для обнаружения нарушителя, или значений параметров алгоритма: порогов, длительностей, частот. Наличие детализации принципов действия на высоком уровне подробности связано с многочисленными условиями применения СО – климатическими и погодными – и физическими воздействиями – естественными и искусственными. Многообразие принципов действия и их разновидностей – залог успеха в решении задачи обнаружения.

7) Модель обнаружения. Модель обнаружения оперирует с ОО как с физическим объектом: источником теплового излучения, носителем магнитного момента, обладателем массы или силы веса. Модель рассматривает процесс взаимодействия ЧЭ с ОО и помеховыми объектами и факторами. Она позволяет перевести их на язык уравнений, а в результате – получить числовые оценки физических величин воздействий от человека и от основных помех. Дополняя и уточняя эти оценки подробным изучением ЧЭ различных разновидностей и измерением их чувствительности в «вольтах на единицу физического воздействия», можно выразить все полезные и помеховые сигналы на выходе ЧЭ непосредственно в вольтах. Если физические воздействия от нарушителя и от помехи одинаковы по величине и форме (зависимости амплитуды от времени), то соответствующие электрические сигналы будут идентичны и отличить их друг от друга нельзя. В благоприятном случае полезные и помеховые сигналы отличаются по амплитуде, в менее благоприятных – амплитуды приходится привлекать дополнительные признаки. Зная величины сигналов на выходе ЧЭ, можно определить требуемый коэффициент усиления и значения порогов. Таким образом, физическая модель обнаружения (ФМО) позволяет оценивать отношение сигнал/помеха и получать примерные значения параметров алгоритма обнаружения и главных показателей СО задолго до его изготовления. Именно ей в дальнейшем будет уделяться основное внимание.

8) Основные характеристики. Характеристики СО – это те числовые показатели, которые позволяют сделать объективную оценку его качества или сравнить его с другим СО. Все достоинства и недостатки вытекают из этих числовых значений. Здесь можно встретить

такие параметры как вероятность обнаружения, наработка на ложную тревогу, объект охраны, ОО, ЗО, ее форма, размеры и границы, помеховые факторы, параметры питания, стоимость, надежность, маскируемость, размеры прибора.

9) Применение. Практическое использование СО включает в себя многочисленные вопросы, связанные с его установкой, монтажом, настройкой, юстировкой и последующим обслуживанием.

10) Электронные схемы. Типовые схемные решения для пассивных и активных СО были приведены ранее. Также были описаны и некоторые нетиповые решения. Число различных возможных вариантов принципиальных схем значительно превосходит число присутствующих на рынке моделей СО. Принципиальные схемы СО часто очень сложны и громоздки. В них входит не только собственно схема обнаружения, но и схемы основного питания, резервного питания, ДВ, полного или частичного ДК, грозозащиты, защиты от статических разрядов. Если в алгоритме работы СО используются не только амплитуда и длительность выброса, но и дополнительные информативные признаки сигналов, то количество микросхем в составе СО превосходит несколько десятков. Однако есть типовые фрагменты, применимые для использования в составе любых из них. Многие фрагменты допускают различные варианты конкретной реализации. Поэтому больше пользы дают блок-схемы СО с детализацией до принципиальных схем только простейших СО или кас-

кадов, имеющих принципиальное значение, таких как входные цепи согласования и усиления сигналов с выхода ЧЭ. Приводимые далее электронные схемы представляют собой лишь наиболее важные элементы, составляющие часть СО. Они основаны на проведенных теоретических оценках ФМО и описываются в большей степени для понимания принципа действия СО, чем для их слепого повторения. Любая схема не застрахована от ошибок, неправильного использования или установки дефектных элементов. Важно уметь оперативно находить и устранять возникающие неисправности.

11) Примеры. Бывает так, что один небольшой конкретный пример дает больше для понимания вопроса, чем множество правильных фраз и умных формул. В конце концов, обобщения нужны для лучшего представления предмета, но охрану обеспечивает конкретная, а не отвлеченная аппаратура. Даже одни названия наиболее распространенных или типичных изделий с указанием основных свойств позволяют заложить ту основу, на которую можно в дальнейшем накладывать дополнительные знания.

12) Перспективы. Основные направления развития и варианты усовершенствования СО определенного типа дают возможность смотреть вперед и обеспечивать прогрессивные решения.

Определив круг интересующих нас вопросов, можно перейти к более подробному рассмотрению СО различных типов.

2.1. Электромеханические СО

Электромеханические СО – самые древние из средств охранной сигнализации. Их ЧЭ преобразует механическую энергию в электрическую. Обнаружение замыкания или размыкания электрической цепи за счет непосредственного воздействия нарушителя имеет наиболее простую реализацию, не требующую ни диодов, ни транзисторов. Электромеханические СО по дополнительным конструктивным признакам делятся на три типа: электроконтактные, магнитоcontactные и электрообрывные. Электроконтактные СО содержат стандартные радиоэлементы – кнопки или переключатели, непосредственно воспринимающие механические воздействия и управляющие электрической цепью внешнего источника питания. Магнитоcontactные СО принципиально не отличаются от электроконтактных; но управляющий элемент выполнен в виде геркона, а переключение осуществляется за счет воздействия магнитного поля, изменяющегося при приближении или удалении постоянного магнита. Геркон обеспечивает повышенную надежность СО. В электрообрывных СО внешнее механическое воздействие нарушает целостность проводной электрической цепи. Иногда все электромеханические СО называются электроконтактными, поскольку в основе работы каждого из них ле-

жит появление или исчезновение электрического контакта в контролируемой цепи.

Электромеханические СО относятся к числу пассивных. Они могут работать как внутри помещений, так и на улице. Электроконтактные и магнитоcontactные являются точечными, а электрообрывные – линейными или площадными. В силу своей дешевизны электромеханические СО наиболее широко распространены среди всех прочих СО, причем почти исключительно за счет магнитоcontactных СО. Электроконтактные не дешевле, но менее надежны. Электрообрывные требуют замены ЧЭ после каждого срабатывания (в том числе – ложного). Все электромеханические СО настолько просты, что рука не поднимается назвать их (ведь в данный момент я говорю рукой) более чем датчиками или извещателями.

2.1.1 Электроконтактные СО

Электроконтактные СО отслеживают положение и реагируют на смещение различных подвижных элементов внутреннего устройства помещений: дверей, окон, люков, решеток, задвижек и других, находящихся на

пути нарушителя. Обычно они не входят в непосредственный механический контакт с ОО. Сейчас уже никому не придет в голову мысль о самостоятельном изготовлении электроконтактного ЧЭ. Номенклатура кнопочных переключателей и концевых выключателей широка и перекрывает любые требования по их размерам, массе, типу, рабочей температуре и другим условиям эксплуатации. Надежность самодельного переключателя не может сравниться с технологически отработанными и проверенными изделиями. Стоимость кнопочных переключателей также невелика. ЧЭ электроконтактного СО — чаще всего кнопочный переключатель — устанавливается между подвижным элементом (дверью) и неподвижным (дверной коробкой). ЧЭ вместе с оконечным резистором образует завершенное СО. Вся сложность (относительная) обработки сигналов ложится на контрольный пульт.

Основные варианты использования электроконтактных СО — в качестве кнопок тревоги и в составе автомобильной противоугонной сигнализации. СО для установки на автомобиль просто используют имеющиеся кнопочные выключатели освещения, установленные на дверях, капоте, крышке багажника. В остальных сферах применения электроконтактные СО почти полностью вытеснены магнитоконтактными СО.

Кнопка тревоги — важный элемент системы охраны. Она приводится в действие персоналом в случае неожиданного нападения или угрозы со стороны грабителей или других нежелательных элементов. Кнопки тревоги или тревожные кнопки называются также охранными извещателями нажимного действия (ручными или ножными — в зависимости от активирующего их человеческого органа). Прослеживается тенденция к вытеснению электроконтактных кнопок магнитоконтактными (герконовыми). Сопротивление замкнутого контакта обычно находится в пределах 0,1...1 Ом; меньшие значения вряд ли целесообразны, так как сопротивление подводящих проводов составляет не менее нескольких ом. Контакты рассчитаны на типичные напряжения до 60 В и токи 0,001...1 А. Чаще всего контакт является нормально замкнутым (НЗ), то есть его размыкание свидетельствует о переходе в состояние тревоги. Большую гибкость в использовании обеспечивают переключаемые контактные группы из трех контактов, которые можно использовать и в качестве нормально замкнутых, и в качестве нормально разомкнутых. Тревожная кнопка представляет собой самостоятельную законченную конструкцию, поэтому ее цена несколько превышает стоимость микропереключателя и составляет 300...1200 руб.

Электроконтактное СО при необходимости легко сделать из стандартного концевой переключателя, например, МП9-Р1, SM5-01N (стоимостью около 15 рублей) или подобных. На какие параметры переключателя следует прежде всего обратить внимание при его выборе в качестве ЧЭ электроконтактного СО? В данном случае понятия ЧЭ и СО близки друг к другу по смыслу, так что требования к их параметрам почти идентичны. Перечислим эти требования:

- главный параметр — число и тип контактных групп; минимальное требование — один нормальнозамкнутый контакт (НЗ), которого вполне достаточно, чтобы передать по двум проводам два состояния: наличия и отсутствия состояния тревоги; несколько большую гибкость обеспечивает наличие одной переключающей контактной группы (1П), так как ею можно не только размыкать сигнальную цепь, но и замыкать ее; полезно иметь один дополнительный свободный контакт для подсоединения оконечного резистора, впрочем, для случая 1П их можно объединить (рис. 2.1.1); если кроме коммутации сигнальной линии необходимо включать какую-либо дополнительную аппаратуру, то контактных групп должно быть две;
- усилие переключения не должно быть слишком малым, иначе неизбежны ложные тревоги; противостоять случайным нажатиям позволяет порог срабатывания около 3...5 Н; рычаг между предметом, смещаемым нарушителем, и кнопочным переключателем дает возможность согласовать передаваемые усилия; в случае кнопки тревоги порог срабатывания может быть увеличен до 50 Н, если нажатие производится не пальцем, а рукой, ногой или коленом;
- рабочий ход или величина перемещения кнопки из начального положения в состояние срабатывания имеет небольшую величину — 1...5 мм, так как важно зафиксировать всего лишь сам факт смещения; по этой же причине наилучшее место установки переключателя на двери или окне находится в районе петель, где смещения минимальны, а усилия максимальны; кнопка должна быть оборудована ограничителем (его имеют концевые переключатели) против разрушения усилием закрывания двери;
- количество коммутаций (включений/выключений) среднего кнопочного переключателя составляет 10000; подсчитав количество открываний входной двери любого офиса, можно убедиться, что ресурса электроконтактного СО едва ли хватит на несколько месяцев; допустимое количество коммутаций является в данном случае показателем надежности, определяющим срок безотказной работы СО; если дверь, окно или решетка открываются не так часто, то противопоказание установки электроконтактного датчика снимается;
- сопротивление замкнутых контактов определяется материалом их покрытия и прижимающей силой; обычное значение сопротивления — 0,05...1 Ом; по сравнению с сопротивлением сигнальной линии (до сотен ом) оно настолько мало, что для использования в охранной сигнализации подойдет любой кнопочный переключатель;
- диапазоны коммутируемых напряжений и токов должны лежать в пределах до 30 В (максимальное напряжение питания) и до 0,1 А (30 В /

300 Ом); этим требованиям удовлетворяют почти все кнопочные переключатели; следует обратить внимание на наличие нижнего предела силы тока, пропускаемого через замкнутые контакты, которая часто ограничивается величиной не менее 0,5 мА; это означает, что нельзя подавать на контакты напряжение 10 В через токоограничительный резистор сопротивлением более 20 кОм; в погоне за низким энергопотреблением не следует уменьшать ток через механически замыкаемые/размыкаемые контакты ниже допустимых пределов; иногда требования к коммутируемым напряжениям и токам могут быть более жесткими — при необходимости включения телевизионных камер, прожекторов или сирен; тогда могут потребоваться напряжения до 220 В и токи до нескольких ампер;

- средняя масса кнопочного переключателя равна 10...20 г, средний размер — 10...20 мм; носить его не тяжело и монтировать не сложно;
- рабочая температура стандартного кнопочного переключателя — от минус 60 до плюс 100 °С; внутри него нет элементов, страдающих от изменений температуры;
- обычное сопротивление изоляции — 100 МОм, хотя для электроконтактного СО хватило бы и 1 МОм; последние три параметра всегда бывают удовлетворительными как бы сами собой, но их нельзя упускать из виду.

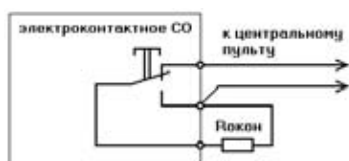


Рис. 2.1.1 Электроконтактное СО

Основное достоинство электроконтактных СО — простота. В их принципиальной схеме полностью отсутствует БО. Им не нужен источник питания, а это еще и два дополнительных провода к каждому датчику. Главный недостаток — низкая надежность, связанная с окислением и засаливанием открытых контактов, износом и обгоранием их поверхностей, деформацией и ослаблением пружин или других упругих элементов. Продлить жизнь кнопки позволяют частичная герметизация (или хотя бы защита от пыли и влаги) и установка цепей искрогашения (даже для малых коммутируемых токов и напряжений).

Электроконтактное СО недолговечно, но работоспособно и дешево. Его возможности не исчерпаны. В вариантах использования электроконтактных СО не следует ограничивать фантазию открывающимися окнами и дверями. По ходу движения нарушителя переминая многие другие предметы: дверные ручки, щеколды, язычки замков, половицы, — все, что стоит на пути.

Совсем не сложно изготовить электроконтактный коврик из двух листов металлической фольги, разде-

ленных дырчатым листом поролона. Надежность контакта при срабатывании датчика обеспечивается большим весом ОО. Можно использовать для этого старую компьютерную клавиатуру (дешевую — из двух тонких контактных листов, упрочнив их снаружи слоем пластика). Такой «коврик» в состоянии обнаружить человека, вставшего на подоконник, на определенный участок пола (перед дверью), перелезающего через забор — в зависимости от места его установки. Время изготовления такого датчика не превышает 10 минут, уходящих в основном на разборку клавиатуры.

Надежность электроконтактного СО может быть повышена, если проверку наличия контакта между листами фольги заменить на измерение емкости между ними. Физический принцип работы такого СО не становится емкостным, поскольку главное — это механическое взаимодействие ЧЭ с ОО, а не внутреннее устройство ЧЭ. Именно оно определяет уровни полезных и помеховых сигналов, а вместе с ними — основные показатели СО. И все же основное усовершенствование электроконтактного СО — это магнитоcontactное СО.

2.1.2 Магнитоcontactные СО

Магнитоcontactные СО служат для обнаружения открывания дверей, окон, решеток, люков, крышек и т. п. Они состоят из постоянного магнита и геркона — широко распространенного радиоэлемента, представляющего собой герметичный контакт, управляемый магнитным полем (рис. 2.1.2). Геркон размещается на неподвижной части дверной коробки, а магнит — в двери. При закрытой двери геркон находится вблизи от магнита, его контакты под действием магнитного поля замыкаются. Когда дверь открывается, магнит удаляется от геркона, и его контакты размыкаются.

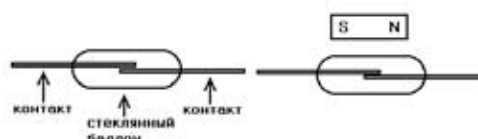


Рис. 2.1.2 Геркон

Геркон — центральный элемент магнитоcontactного СО. Он представляет собой два упругих контакта из ферромагнитного материала, находящихся внутри стеклянного баллона (рис. 2.1.2). В обычном состоянии между контактами имеется небольшой зазор. В достаточно сильном продольном магнитном поле контакты стремятся занять положение вдоль его силовых линий. Они притягиваются друг к другу и замыкаются. Внутри баллона находится инертный газ или азот для обеспечения стабильных характеристик контактов. Основные параметры герконов (небольших размеров) в значительной мере определяют параметры магнитоcontactных СО и имеют в среднем следующие значения:

- магнитодвижущая сила (МДС) срабатывания — 5...200 ампер-витков; чем больше размеры геркона, тем больше и МДС; например, для герко-

- на КЭМ-3 его МДС равна 30...100 А, то есть намотав на него обмотку из одного витка и пропустив по ней ток $I = 100$ А (или 100 витков и 1 А), можно добиться его срабатывания;
- число срабатываний составляет в среднем 10^6 ; в зависимости от величины и характера нагрузки оно может меняться от 10^5 до 10^9 ; последнее число относится к коммутации активной высокоомной нагрузки;
 - коммутируемые напряжения и токи почти для всех герконов превышают 30 В и 0,1 А; для герконов основную роль играют не напряжения и токи, а допустимая коммутируемая мощность, которая для небольших герконов равна 1...30 Вт (в зависимости от размеров геркона);
 - сопротивление замкнутых контактов составляет 0,03...0,3 Ом, то есть гораздо меньше, чем сопротивление подключаемой к ним сигнальной линии;
 - время непрерывного нахождения геркона в замкнутом состоянии — не более нескольких тысяч часов; при больших временах проявляется склонность герконов к залипанию контактов; если магнитоконтактное СО установлено на редко используемой вентиляционной решетке, то как минимум раз в квартал необходимо проводить ее пробное открывание с проверкой срабатывания;
 - размеры герконов невелики; длина баллона миниатюрного геркона находится в пределах от 10 мм до 20 мм;
 - диапазон рабочих температур составляет от $(-45...-60)^\circ\text{C}$ до $(+85...+125)^\circ\text{C}$;
 - время срабатывания находится в пределах от 0,8 мс (для небольших герконов) до 8 мс (для крупных); в течение части этого времени — времени вибрации — контакты то замыкаются, то вновь размыкаются; время вибрации равно 0,1...1,2 мс; его необходимо учитывать при установлении факта размыкания.

Наибольшее распространение имеют герконы с одной нормально разомкнутой (вне поля магнита) контактной группой. Однако имеются и другие: с одной переключающей контактной группой и с одной нормально замкнутой. Особое место среди герконов занимают так называемые ртутные герконы. Они представляют собой переключающие герконы с каплей ртути внутри баллона. Ртуть смачивает контакты, поэтому данные герконы отличаются малым сопротивлением контактов (<0,03 Ом), стабильными характеристиками, коротким временем дребезга контактов. Недостатками ртутных герконов являются возможность работы только в вертикальном положении (капля ртути внизу), высокая цена, замерзание ртути при температуре минус 39°C , наличие ядовитого вещества. Представьте, сколько мороки свалится на голову, если разобьется ртутный геркон. Придется очень быстро найти серу, истолочь ее в порошок, посыпать им место разлива ртути, собрать все и утилизировать, не смешивая с бытовыми отходами. О данном виде герконов не стоило

бы упоминать, если бы не одна особенность: ртутные герконы (в особенности, крупные, как например, МКДР-45281) в слегка наклонном положении являются хорошими датчиками вибрации.

Обычно магнитоконтактное СО содержит геркон, управляемый приближением или удалением постоянного магнита. На самом деле способов управления больше — их три: продольным магнитным полем подвижного постоянного магнита, подвижным магнитным экраном между неподвижными герконом и магнитом, подачей тока в обмотку вокруг геркона. Два последних нетрадиционны и позволяют повысить эффективность использования магнитоконтактных СО.

По способу установки магнитоконтактные СО делятся на накладные и врезные. Накладные крепятся сверху на поверхность двери, врезные — внутрь двери и дверной коробки. Первые — дешевле, вторые — практически незаметны, если спрятаны провода, подходящие к геркону. Конструктивно магнитоконтактные СО делятся на устанавливаемые на деревянные двери и на металлические. Последние имеют специальный ферромагнитный экран, исключающий влияние намагничивания близлежащих стальных предметов. Поэтому магнитоконтактные СО для металлических дверей дороже обычных.

Геркон магнитоконтактного СО устанавливается на неподвижной части, а магнит — на подвижной. В основном это связано с удобством прокладки проводов. По этой же причине магнитоконтактное СО устанавливается в верхней части двери или окна, поскольку кабели прокладываются преимущественно за фальш-потолком. Кроме того, большая высота делает СО максимально недоступным для внешнего вмешательства. Из этих же соображений все кабели и само СО устанавливаются с внутренней стороны помещения. Расстояние срабатывания между магнитом и герконом (рабочий зазор) составляет в среднем 2...3 см. Располагая их на дальнем от петли конце двери (или окна), обеспечивается срабатывание при минимальном угле открывания двери.

Средняя МДС срабатывания не крупного геркона, характерного для использования в составе магнитоконтактного СО, составляет 50 ампер-витков. Однако, не ампер-витки заставляют замыкаться контакты геркона. Делает это магнитное поле, величина которого характеризуется напряженностью H или индукцией $B = \mu\mu_0 H$, где μ — относительная магнитная проницаемость (для вакуума и большинства немагнитных материалов $\mu = 1$), μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость, равная в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1,257 \times 10^{-6} \text{ В} \times \text{с} / \text{А} \times \text{м}$. В системе СИ напряженность H измеряется в единицах «ампер на метр» (А/м), а магнитная индукция B — в теслах (Тл). Напряженность магнитного поля H в центре контура с током I , количеством витков N и диаметром витка d равна $H = IN / d$ при условии, что длина намотки меньше d . В числителе стоят ампер-витки, а в знаменателе — диаметр витка. Если диаметр большой, то и число ампер-витков придется увеличить.

Небольшой геркон имеет диаметр $d = 3$ мм. Наматываем обмотку (дающую те же 50 ампер-витков) прямо на

геркон, получим, что напряженность магнитного поля, приводящая к его срабатыванию, равна $H = 50/0,003 = 17000 \text{ А/м}$. Надежное замыкание контактов геркона требует напряженности, примерно в полтора раза большей, то есть $H = 26000 \text{ А/м}$. Соответствующее значение магнитной индукции $B = \mu_0 H = 1,257 \times 10^{-6} \times 26000 = 0,03 \text{ Тл}$. Именно на эти значения следует ориентироваться при оценке условий срабатывания геркона. Для сравнения сильный магнит вблизи от своей поверхности обладает магнитной индукцией до 1,1...1,3 Тл. С увеличением расстояния от магнита g индукция убывает обратно пропорционально кубу расстояния.

Причинами наиболее сильных магнитных воздействий являются магнитное поле Земли и наводки от электрических разрядов. Напряженность магнитного поля Земли не превышает $H = 52 \text{ А/м}$. Ей соответствует индукция $B = \mu_0 H = 0,07 \text{ мТл}$, которая более чем на два порядка ниже уровня срабатывания геркона. Напряженность очень сильного грозового разряда с током $I = 600000 \text{ А}$ на расстоянии $l = 100 \text{ м}$ не превышает $H = I / 2\pi l = 600000 / (2\pi \times 100) = 1000 \text{ А/м}$. Соответствующая индукция $B = \mu_0 H = 0,001 \text{ Тл}$, что также гораздо ниже уровня срабатывания. Благодаря этому достигается высокая помехоустойчивость магнитоcontactных СО.

Основные достоинства магнитоcontactных СО состоят в следующем:

- дешевизна; готовое СО можно купить менее чем за половину доллара;
- высокая надежность; магнитоcontactные СО могут работать в условиях низких и высоких температур, повышенной влажности;
- высокая помехоустойчивость и стабильность срабатывания;
- отсутствие необходимости в источнике питания;
- малое сопротивление замкнутых контактов и большое сопротивление разомкнутых контактов;
- удобство монтажа; после установки не требуется настройка или юстировка.

Главный недостаток магнитоcontactного СО — отсутствие автоматической проверки его работоспособности. Контроль исправности СО проводится во время открывания/закрывания дверей или окон, хотя это не всегда и не везде удобно. На отсутствие ДК можно было бы не обращать внимания, если бы не одно обстоятельство — наличие так называемых внезапных отказов герконов. Они заключаются в залипании контактов после длительного нахождения их в замкнутом состоянии в связи с намагничиванием и диффузными явлениями в материале контактов. К счастью они происходят не часто.

Один из интересных вариантов магнитоcontactного СО — сбалансированный магнитоcontactный датчик. Обычный переключающий геркон содержит три контакта. При отсутствии магнитного поля контакты 1 и 2 замкнуты, а 1 и 3 — разомкнуты. При увеличении напряженности магнитного поля в определенный момент происходит размыкание контактов 1 и 2 и одновременно — замыкание 1 и 3. При дальнейшем возрастании на-

пряженности магнитного поля состояние геркона не меняется. В сбалансированном герконе — специально разработанном для этой цели — процесс переключения происходит в два этапа. При определенной напряженности магнитного поля H_1 контакты 1 и 2 размыкаются, но замыкание контактов 1 и 3 происходит не сразу, а при дальнейшем росте напряженности сверх значения H_2 . Дежурным состоянием датчика является промежуточное состояние контактов, которое устанавливается регулировкой величины напряженности продольного магнитного поля. Схема подключения геркона (рис. 2.1.3а) обеспечивает в дежурном режиме сопротивление сигнальной линии, равное оконечному $R_{\text{ОКОН}}$. В случае открывания двери магнитное поле ослабевает, и геркон срабатывает, замыкая сигнальную линию. То же произойдет и в случае усиления магнитного поля.

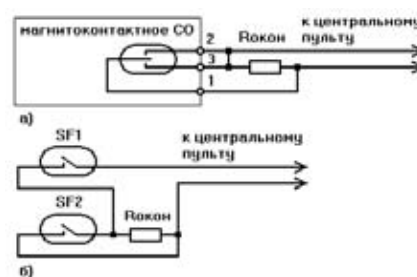


Рис. 2.1.3 Сбалансированное магнитоcontactное СО

Другой вариант сбалансированного магнитоcontactного СО позволяет обойтись без дорогостоящего специального геркона. Он состоит из одного магнита и двух герконов различной чувствительности: более чувствительного SF1 и менее чувствительного SF2 (рис. 2.1.3б). Магнит устанавливается так, чтобы в дежурном состоянии SF1 был замкнут, а SF2 — разомкнут. Если магнитное поле ослабевает, сигнальная линия размыкается герконом SF1, если усиливается — замыкается герконом SF2. Оба геркона могут иметь и одинаковую чувствительность; тогда SF1 размещается ближе к магниту, чем SF2.

Сбалансированное магнитоcontactное СО может иметь в своем составе и один обычный нормальнозамкнутый (без магнитного поля) геркон. Тогда для его балансировки потребуется два магнита: один на двери, другой — на дверной коробке рядом с герконом. Магниты устанавливаются встречно-параллельно, а процесс балансировки состоит в смещении или повороте магнитов до тех пор, пока оба поля не скомпенсируют друг друга. Дежурное состояние геркона будет нормальнозамкнутым. Его контакты будут размыкаться как при открывании двери, так и при любой попытке изменения магнитного поля.

Типичные представители магнитоcontactных СО отличаются простотой и низкой стоимостью. Они состоят из геркона и магнита, находящихся в отдельных корпусах. Основную массу магнитоcontactных СО, представленных на рынке, составляют накладные, нормальнозамкнутые (в магнитном поле), для обычных деревянных или металлических дверей с расстоянием срабатывания 2...3 см. Их стоимость находится в

пределах 0,5...4 \$. Герконы для деревянных дверей обходятся дешевле, чем для металлических. Главная часть стоимости оборудования помещения магнитоcontactными СО приходится на монтажные работы.

Если магнитоcontactное СО работает совместно с контрольным пультом, то функция СО заключается в размыкании контактов на время открывания двери. После ее закрывания сигнальная линия вновь замыкается, а вся ответственность за принятие решения об активации сигнала тревоги ложится на контрольный пульт. Он должен селективировать сигналы по длительности, так как слишком короткие (менее 0,1 с) представляют собой импульсы наводки, а полезные сигналы приобретают опасность, начиная с десятых долей секунды.

Если нормальнозамкнутое магнитоcontactное СО работает автономно, то оно требует независимого БО, который должен проводить анализ длительностей и самостоятельно формировать сигнал тревоги (рис. 2.1.4). В дежурном режиме контакты геркона SF1 замкнуты, на обоих выходах ОУ DA1.1 и DA1.2 напряжения вы-

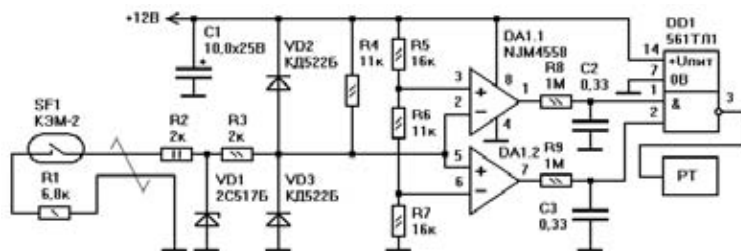


Рис. 2.1.4 Магнитоcontactное СО

сокого уровня, на выходе DD1.1 сигнал низкого уровня. Делитель R1, R2, R3, R4 обеспечивает ток через SF1 не менее 0,5 мА, а напряжение на входах 2 и 5 ОУ DA1 – около половины напряжения питания. Элементы R2, R3, VD1, VD2, VD3 осуществляют защиту от импульсных наводок в длинной проводной линии и от разрядов статического электричества при случайном касании человека. Импульсный стабилитрон VD1 выдерживает кратковременные разряды до 49 А, следовательно цепь R2, VD1 защищает от коротких импульсов перенапряжения до ста киловольт.

Делитель R5, R6, R7 поддерживает опорные напряжения на входах ОУ DA1. Они определяют размеры ворот, в пределах которых должно находиться напряжение на делителе SF1, R1, соединительная линия, R2, R3, R4. Размер ворот не должен быть слишком узким, так как в них должны уместиться и неопределенные падения напряжений на проводах соединительной линии, и разброс сопротивлений резисторов. В случае открывания двери контакты SF1 размыкаются, сигнал на выходе DA1.1 падает до нуля, а элементы R8, C2 подавляют импульсы короче $0,7 \times R8 \times C2 = 0,2$ с. В результате на выходе DD1 формируется сигнал высокого уровня, который инициирует PT. То же самое происходит и в случае замыкания проводов соединительной линии, но через элементы DA1.2, R9, C3.

2.1.3. Электрообрывные СО

Принцип действия электрообрывного СО, как ясно из названия, заключается в размыкании электрической цепи в результате механического воздействия на нее нарушителя. Реализация принципа возможна в четырех отличающихся по назначению вариантах применения: обнаружение разбивания стекла, разрушения стены или перегородки, перекусывания нитей забора или обрыва тонкого провода.

Для обнаружения разбивания стекла, на него по периметру наклеивается тонкая полоска фольги. Фольга образует замкнутый электрический контур, который обрывается вместе с разрушением стекла. Стандартная алюминиевая фольга имеет толщину от 0,008 до 0,04 мм и ширину от 5 до 12 мм. Погонное сопротивление фольги – от 0,06 до 0,7 Ом/м. Для удобства монтажа фольга имеет клеевой слой, а для повышения жесткости – специальную пропитку. При отсутствии фольги ее можно заменить медным эмалированным проводом диаметром 0,1...0,15 мм, приклеив его любым клеем.

Фольга или проволока может наклеиваться не только на оконное стекло, но и на стены или перегородки (с внутренней стороны). Сверху их можно покрасить или покрыть обоями. Можно даже установить изолированный провод во время ремонта квартиры внутрь стены под штукатурку. Он наклеивается на всю площадь стены и имеет форму сетки с размером ячейки $b = 0,1...0,2$ м (рис. 2.1.5). Диаметр провода – от 0,15 до 0,3 мм, так как провода меньшего диаметра подвержены обрывам от внутренних напряжений в стене, а большего – оказываются слишком прочными.

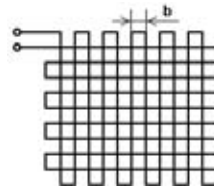


Рис. 2.1.5 Электрообрывное СО

Популярной разновидностью электрообрывных СО является СО с кассетой из тонкого двухжильного микропровода (например, ПЭЦ-2). В процессе установки провод разматывается со сменной кассеты и раскладывается вокруг охраняемого объекта: на траве, кустах, заборе, отдельных предметах, а если положить не на что (гладкий пол или земля без растительности) – на специальных стойках. Конец провода оплачивается на пламени спички или зажигалки, и таким образом замыкаются оба его проводника. Пара проводников образует непрерывную электрическую цепь, так что обрыв провода при движении нарушителя вызывает ее размыкание и формирование сигнала тревоги.

Диаметр провода составляет 0,1 мм, поэтому он не обрывается от продольных усилий сматывания с кассеты, и допускает высокую скорость установки – до

3 м/с (бегом). В то же время поперечная сила обрыва невелика и практически незаметна для человека. Стандартный провод выпускается двух цветов — зеленого и белого, — благодаря чему он визуальным образом незаметен в любое время года.

Электрообрывные быстроразвертываемые СО с двойным микропроводом могут использоваться и в помещениях, и на улице. Проводом можно окружить садовый участок, автомобиль или палатку на ночь. Рубеж не обязательно должен быть замкнутым: можно охранять входную калитку или тропинку. СО данного типа являются автономными, поэтому используют в качестве источников питания низковольтные батареи или аккумуляторы. Применение двухжильного микропрово-

да позволяет дополнительно оценивать расстояние до точки обрыва, например, путем измерения емкости двухпроводной линии.

Типичные электрообрывные СО имеют длину рубежа 100...500 м. Питание осуществляется от батарей или аккумуляторов напряжением 1,5...4,5 В. Одного комплекта хватает на несколько месяцев работы. При небольших размерах около 100×100×50 мм масса СО находится в пределах 0,2...0,8 кг. Рабочая температура составляет от минус 10...50°С до плюс 40...50°С. Стоимость СО — от 1500 до 7000 рублей. Сменные кассеты с проводом обеспечивают возможность многократного использования электрообрывных СО.

2.2. Тензометрические СО

Тензометрические СО по степени сложности стоят на одну ступеньку выше электромеханических. Измеряемой физической величиной для них является не смещение, а сила. Тензометрические СО называются также весовыми датчиками или весочувствительными датчиками. Выходной сигнал ЧЭ — обычно непрерывный аналоговый (а не бинарный, как у электроконтактных), его величина пропорциональна приложенной силе. Если сила воздействия, вес ОО или их изменение превышают установленный порог, формируется сигнал тревоги. Все тензометрические СО являются пассивными. Измерение силы в целях обнаружения не требует высокой точности. Наиболее просто измерить ее величину одним из четырех способов: с помощью тензорезистора, пьезоэлектрического датчика, датчика натяжения струны или датчика давления.

Тензорезисторы известны более ста лет и находят широкое распространение в различных приборах измерения веса. Технология их изготовления и применения отработана, а стоимость невелика (порядка ста рублей). Они работоспособны в широком диапазоне температур и внешних воздействий, поэтому вполне подходят в качестве ЧЭ. СО на основе тензорезисторов — точечные, но могут применяться как в помещениях, так и на открытом воздухе.

Пьезоэлектрический ЧЭ представляет собой небольшой кристалл, размещаемый между двумя проводящими обкладками. Материалом кристалла является кварц, сегнетова соль или более распространенная сейчас пьезокерамика, например, титанат бария. При воздействии силы кристалл генерирует заряд, величина которого пропорциональна силе. Пьезоэлектрические ЧЭ широко распространены, благодаря их надежности, компактности и дешевизне. Они применяются не только в качестве датчиков силы, но и в качестве датчиков вибрации, звуковых и сейсмических колебаний. В силу своей физической природы пьезоэлектрический кристалл реагирует только на изменение силы. С одной стороны это плохо, так как невозможно отличить непод-

вижно стоящего на датчике слона от мертвой мухи. С другой — хорошо, поскольку повышает достоверность обнаружения движущихся объектов. Тензометрическое СО с пьезоэлементом может быть как точечным, так и линейным, благодаря наличию специальных распределенных пьезокабелей.

Датчики натяжения или датчики натяжения струны известны также под названиями извещателей натяжного типа или натяжных систем охраны. ЧЭ в них — тот же тензочувствительный преобразователь, который контролирует силу натяжения тонкого стального троса (струны). Коснувшись тросика, человек изменяет силу натяжения, а это, в свою очередь, приводит к изменению сигнала на выходе ЧЭ и затем к срабатыванию датчика. Тросик должен быть натянут с большой силой (до 50...100 кГ), чтобы не было его провисания. СО данного типа может устанавливаться как на улице — на полотне или по верху забора, так и в помещениях — на небольшой высоте над полом или перилами. На улице при установке над землей его работе сильно мешают снег и обледенение. На заборе тросики натягиваются в несколько рядов параллельно друг другу с разносом в 10...20 см. Часто используется компенсационный метод установки двух одинаковых по длине струн в противоположные стороны от одного ЧЭ. Сравнение сил натяжения двух флангов позволяет исключить срабатывания от погодных воздействий, а в особенности от перепадов температуры, влияющих одновременно на обе струны.

Датчик давления обнаруживает вставшего на него человека за счет восприятия силы веса. Он может иметь вид небольшого коврика. Это точечный комнатный датчик. Его распространению мешают домашние животные и неудобства с уборкой помещений. Он может быть выполнен из двух листов металлической фольги, разделенных слоем поролона. При наступании на него человека листы сближаются и меняется емкость этого своеобразного конденсатора. Изменение емкости пропорционально весу объекта и без труда фиксируется

измерительной цепью. Подобный датчик называется емкостным ковриком, но он является средством обнаружения тензометрического, а не емкостного принципа действия. Ясно, что в нем сначала происходит преобразование воздействующей силы F (веса) в изменение емкости ΔC с коэффициентом преобразования $K_1 = \Delta C / F$, а затем – изменения емкости ΔC в изменение электрического сигнала ΔU с коэффициентом преобразования $K_2 = \Delta U / \Delta C$. Результирующее преобразование – преобразование силы F в электрический сигнал ΔU с коэффициентом преобразования $K = K_1 \times K_2 = \Delta U / F$ – не зависит от значений C и ΔC . Величина емкости остается внутри преобразователя и не оказывает принципиального влияния на алгоритм обнаружения. Значение выходного электрического сигнала (полезного или помехового) полностью определяется действующими на ЧЭ силами, вибрацией, ударами, а емкость C нужна только для удобства преобразования силы в электрический сигнал.

Различных реализаций тензометрических СО может быть много, но принцип всегда один: измерение силы воздействия (или веса) и сравнение измеренного значения с пороговым. Рассмотрим возможности создания СО данного типа на основе использования наиболее дешевого и доступного чувствительного элемента – тензорезистора.

В качестве тензорезистора можно использовать любой проводник. Отрезок проволоки под действием продольной силы растяжения увеличивает свою длину и уменьшает площадь поперечного сечения. В результате его сопротивление уменьшается пропорционально приложенной силе. Для удобства измерения сопротивление датчика не должно быть слишком малым. Подав напряжение порядка 1...10 В, через него должен протекать ток никак не более 10 мА, то есть сопротивление тензорезистора должно составлять 100...1000 Ом. Необходимость относительно больших значений сопротивления при малых размерах приводит к обычной конструкции тензорезистора, представляющей собой длинный тонкий проводник, уложенный «змейкой» вдоль направления измеряемой силы F (рис. 2.2.1а). Перпендикулярные к данному направлению участки проводника имеют увеличенную ширину, чтобы снизить чувствительность датчика в поперечном направлении. Проводник прочно нанесен на подложку и имеет два контакта (или гибких провода) для подсоединения к измерительной схеме. Он настолько тонок, что даже небольшая сила, воздействуя на него непосредственно, разорвала бы его. Поэтому измерительная конструкция в простейшем случае выглядит следующим образом (рис. 2.2.1б). На жесткой опоре закреплена пластина, воспринимающая воздействие контролируемой силы F . Силой может быть вес картины, охраняемой от снятия, или вес человека при его появлении. Пластина, имеющая площадь поперечного сечения S , под действием силы F испытывает относительное удлинение $\epsilon = \Delta l / l = F / (SE)$, где l – длина пластины, Δl – изменение длины, E – модуль упругости (модуль Юнга). Тензорезистор прочно приклеен к пластине. Он настолько тонок, что испытывает то же самое удлинение ϵ .

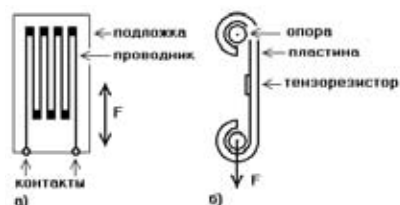


Рис. 2.2.1 Тензорезистор

Главный показатель тензорезистора – его коэффициент тензочувствительности $K_T = \delta / \epsilon$, который представляет собой коэффициент пропорциональности между относительным удлинением ϵ и относительным изменением сопротивления $\delta = \Delta R / R$ в результате удлинения. Для различных металлов и сплавов K_T изменяется в пределах от 0,9 до 3,6.

Большинство тензорезисторов изготавливается из константана, обладающего $K_T \approx 2,0$. Длина датчика (подложки) находится в пределах 5...20 мм, сопротивление – 50...800 Ом. Основная трудность применения тензорезисторов – значительная зависимость сопротивления от температуры, связанная как с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) датчика, так и с температурным коэффициентом расширения (ТКР) датчика и преобразователя (той воспринимающей деформацию пластины, на которую приклеен тензорезистор). Изменение температуры на несколько десятков градусов приводит к такому же изменению сопротивления тензорезистора, что и воздействие измеряемой силы. В ходе производства константана можно в широких пределах влиять на его ТКС за счет дозированного добавления примесей и изменения температурного процесса обработки. Таким образом изготавливаются тензорезисторы, ТКС которых специально подобран для наклеивания на определенный материал: на сталь с ТКР 12×10^{-6} 1/К, на медь с ТКР 16×10^{-6} 1/К, на алюминий с ТКР 23×10^{-6} 1/К, на титан с ТКР 8×10^{-6} 1/К. Они называются термокомпенсированными тензорезисторами.

Кроме константановых тензорезисторов, имеются полупроводниковые, преимущественно на основе кремния. Они обладают существенно большим коэффициентом тензочувствительности $K_T = 55...200$, небольшой длиной 5...15 мм, высоким сопротивлением до 10 кОм. Полупроводниковые тензорезисторы менее распространены в связи с большей температурной нестабильностью.

Тензорезисторы позволяют регистрировать изменение длины (удлинение или укорочение), силы или давления. Будучи наклеены на элемент конструкции, они могут воспринимать растяжение или сжатие (рис. 2.2.2а), изгиб при консольном воздействии силы (рис. 2.2.2б), изгиб при двухопорной схеме подвеса (рис. 2.2.2в), изгиб на податливом основании (рис. 2.2.2г). Выбор зависит от удобства выполнения решаемой задачи: охрана отдельного предмета, лежащего на витрине или висящего на стене, охрана сейфа, обнаружение подошедшего человека.

Составить общее мнение о типичных тензорезисторах позволяет таблица 2.2.1. В ней представлено семь

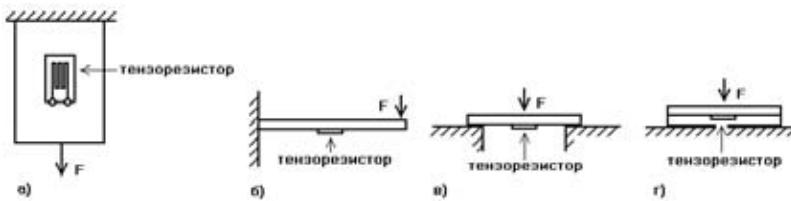


Рис. 2.2.2 Способы измерения силы

константовых тензорезисторов. На самом деле их тысячи. Они отличаются размерами, сопротивлением, ТКС, направлением измеряемых деформаций, количеством тензорезисторов на одной подложке. В таблице под длиной понимается длина подложки тензорезистора, база (длина токопроводящей чувствительной решетки) – в 2...3 раза меньше. Величиной ϵ_0 обозначен диапазон измеряемых относительных удлинений, R – сопротивление тензорезистора, T_{раб} – диапазон рабочих температур, K_T – коэффициент тензочувствительности. Погрешность тензорезистора обычно находится на уровне десятых долей процента и не бывает хуже нескольких процентов. Каждый тип тензорезистора выпускается в модификациях, предназначенных для наклеивания на сталь, алюминий, медь, иногда – на титан. Допускаемый ток через тензорезистор – не более 25 мА. Масса составляет 0,1...0,3 г.

Девять десятых успеха в использовании тензорезисторов зависит от качества его контакта с элементом, воспринимающим силу F. Хорошие результаты дает стандартный клей Z70. Он предназначен специально для этой цели: быстро сохнет, после склеивания сохраняет устойчивость к сдвигу в широком интервале температур и не содержит растворителей, которые могут повредить тензорезистор. Данный клей создан на основе цианакрилата, полимеризующегося под действием давления, не требует нагрева для отвердевания и стоит сравнительно недорого. Кроме него можно воспользоваться двухкомпонентным эпоксидным клеем X280, отверждающимся при комнатной температуре, а также отечественными, специально предназначенными для наклейки тензорезисторов. К ним относятся: ЭО – цианакрилатный (циакриновый) холодного отверждения, УВС-10Т – фенольный однокомпонентный горячего отверждения, БФР-2К – фенолформальдегидный однокомпонентный горячего отверждения. Высокое качество обеспечивает двухкомпонентный клей для тензорезисторов M-BOND 610-K, но стоит он не дешево. Его имеет смысл использовать при изготовлении большого количества тензодатчиков, так как на один датчик уходит не более капли клея. На крайний

случай неплохие результаты даст любой бытовой циакриновый или эпоксидный клей при соблюдении обычных требований: зачистка места приклеивания тонкой наждачной шкуркой и обезжиривание склеиваемых поверхностей. Слой клея должен иметь минимальную толщину, так как во время растяжения или сжатия он будет работать на сдвиг. После приклеивания тензорезистор необходимо просушить и покрыть защитным лаком, не содержащим растворителей, или тем же клеем.

Тензорезистор преобразует изменение силы в изменение сопротивления. Его, в свою очередь, необходимо трансформировать в электрический сигнал. Можно просто включить тензорезистор R2 в цепь делителя R1, R2 (рис. 2.2.3а) и подать на делитель стабилизированное напряжение, например U_{пит} = +8 В. Напряжение на R2 составит 4 В, а его максимальное изменение – $\Delta U = \epsilon_0 K_T U_{пит} / 4 = 0,003 \times 2 \times 8 / 4 = 12$ мВ, изменение при рабочей нагрузке немного меньше – в пределах единиц милливольт. Уровни полезных сигналов вполне обнадеживающие, но есть одно но. Это сильная зависимость R2 от температуры. Поэтому даже для термокомпенсированных тензорезисторов целесообразно пользоваться мостовой схемой измерения (рис. 2.2.3б).

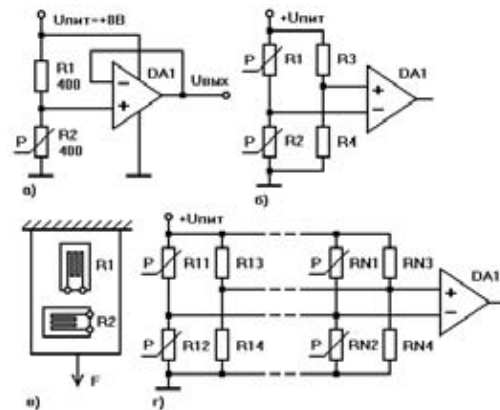


Рис. 2.2.3 Схемы включения тензорезисторов

Мост состоит из четырех резисторов: двух одинаковых тензорезисторов R1, R2 и двух одинаковых стабильных резисторов R3 и R4. Измерительный тензорезистор R1 наклеен вдоль действующей силы F, а точно такой же R2 – рядом, но поперек (рис. 2.2.3в). Снимаемая с диагонали моста разность потенциалов, как и

Таблица 2.2.1 Тензорезисторы

Название	Длина, мм	ϵ_0 , мкм/м	R, Ом	T _{раб} , °C	K _T	Цена, руб.
2ФКП-5×200	11	±3000	200	-50... +70	1,9... 2,3	
2ФКП-5×400	11	±3000	400	-50... +70	1,9... 2,3	
2ФКРВ-3×400	11	±3000	400	-50... +70	1,9... 2,3	
КФ5 П1-1-200	6	±3000	200	-70... +200	1,9... 2,2	96
КФ5П1-3-400	8,3	±3000	400	-70... +200	1,9... 2,2	65
КФ5П1-5-400	11,8	±3000	400	-70... +200	1,9... 2,2	65
Et 286	10	±3000	700	-130... +290		

прежде, составит несколько милливольт в нагруженном состоянии, но она почти не будет зависеть ни от напряжения питания $U_{пит}$, ни от температуры. При нагревании или охлаждении сопротивления тензорезисторов R_1 , R_2 меняются одинаковым образом, а при воздействии силы F — меняется только R_1 . Если обозначить изменение R_1 за ΔR_1 , то соответствующий выходной сигнал моста $\Delta U / U_{пит} = \Delta R_1 / (4 \times R_1)$, где $U_{пит}$ — напряжение питания моста. Оно выбирается таким образом, чтобы ток через терморезисторы не превышал максимально допустимого (обычно 10...25 мА). Сигнал на выходе моста приблизительно равен $\Delta U = U \times \Delta R_1 / (4 \times R_1) = (K_T \times U / 4) \times (\Delta l / l) = (20/4) \times 0,002 = 10$ мВ. Для получения уровней полезных сигналов в несколько вольт необходимо усиление сигнала с коэффициентом $K_{ус}$ в несколько сотен.

Ситуация, когда в непосредственной близости друг от друга находится множество охраняемых предметов, — не редкость. Экспонаты на выставке, оружие на стеллаже, золотые слитки в банке — количество отдельных предметов может достигать сотен. Необходимо ли каждый из них оборудовать самостоятельным СО, состоящим из ЧЭ, БО и РТ, и вести к каждому отдельную сигнальную линию? Значительно упростить схему охраны множества компактно расположенных предметов позволяет метод параллельного соединения мостов (рис. 2.2.3г). Выходной сигнал со всех N мостов будет в этом случае равен среднему значению сигналов отдельных мостов: $\Delta U / U_{пит} = (\Delta U_1 / U_{пит} + \Delta U_2 / U_{пит} + \dots + \Delta U_N / U_{пит}) / N$.

Датчик веса не обязательно делать самому. Можно купить готовый, представляющий собой законченную конструкцию из воспринимающего внешнюю силу измерительного элемента, наклеенных на него тензорезисторов и усилителя сигналов. Выходным сигналом в них может служить напряжение, ток или цифровой логический сигнал. Напряжение усиливается до единиц вольт, ток — до десятков миллиампер, цифровой сигнал представляется либо в параллельном двоичном коде, либо соответствует интерфейсам RS-232 или RS-485. Датчики веса полностью перекрывают диапазон измерения от единиц грамма до сотен тонн. Легко подобрать датчик как для контроля за одной ценной монетой, так и для обнаружения подбегжающего автомобиля. Остается лишь добавить к датчику схему измерения длительности выброса и РТ — и тензометрическое СО готово, причем без значительных усилий.

Имеются разновидности готовых датчиков усилия, работающих на растяжение, на сжатие, на изгиб и т.д. Они называются также весоизмерительными датчиками или нагрузочными ячейками. Погрешность их вполне достаточна для использования в целях обнаружения и составляет обычно не более половины процента, а диапазон рабочих температур — от минус пятидесяти до плюс ста градусов Цельсия. Среди датчиков фирм Honeywell и Куова можно подобрать кандидата на обнаружение веса монеты, человека, сейфа или бульдозера. Правда, цена одного датчи-

ка довольно высока (ведь он предназначен для измерения веса с большой точностью) — от тысячи рублей и выше. Она стимулирует самостоятельное изготовление датчика, тем более что сделать его не сложно.

Прежде всего, необходимо взять пару подходящих тензорезисторов, например, КФ5П1-5-400 (табл. 2.2.1). Предпочтительнее, чтобы они были предназначены для наклеивания на материал выбранной пластины, например, на алюминий. Диапазон измерения данного тензорезистора по относительному удлинению составляет $\epsilon_0 = \Delta l / l = 3000$ мкм/м = 0,003. Если нам нужно фиксировать наличие объектов весом до 1000 Н (картины на стенах), следует установить трехкратный запас с учетом динамической нагрузки и возможных ударов, и определить для максимальной статической нагрузки $F = 1000$ Н удлинение $\epsilon = 0,001$. Модуль упругости (Юнга) для алюминия равен $E = 7 \times 10^{10}$ Па. Поэтому площадь поперечного сечения пластины, воспринимающей вес картины (рис. 2.2.1б), составит $S = F / (E\epsilon) = 1000 / (7 \times 10^{10} \times 0,001) = 14$ мм². При толщине в 2 мм ширина ее будет 7 мм. Независимо от длины пластины, после приложения силы $F = 1000$ Н, ее относительное удлинение составит $\epsilon = 0,001$. В случае максимальной нагрузки механическое напряжение будет $\sigma = F / S = 1000 / (14 \times 10^{-6}) = 70$ МПа, то есть меньше предела прочности и допускаемого напряжения алюминия (таблица 2.2.2). Пластина не повредится под действием силы тяжести картины. Варьируя материал пластины и площадь ее поперечного сечения, можно изготовить ЧЭ для любого веса.

Таблица 2.2.2 Механические характеристики материалов

Материал	Модуль упругости, 10^{10} Па	Предел прочности, МПа	Допускаемые напряжения, МПа
Алюминий	6,9...7,1	180...500	30...150
Медь	11...13	200...600	30...120
Сталь	20...21	340...720	140...250

Вариант реализации электронной схемы для рассматриваемого тензометрического датчика показан на рис. 2.2.4. Резисторы R_1 , R_2 , R_3 , R_4 образуют измерительный мост, все они вместе с элементом DA1 компактно размещаются на измерительной пластине для миниатюризации падений напряжений на соединительных про-

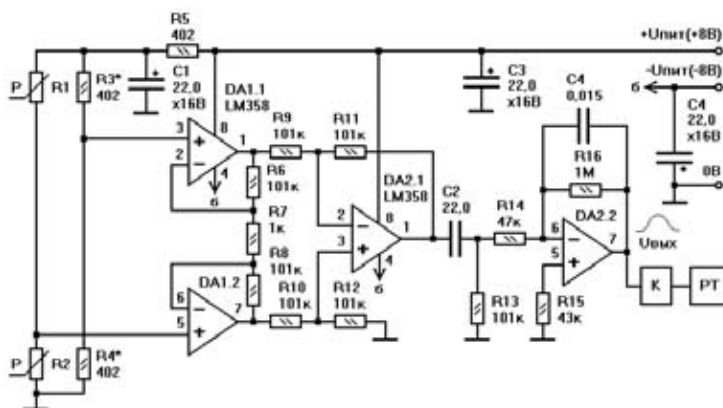


Рис. 2.2.4 Тензометрическое СО

водах. Тензорезисторы R1, R2 могут быть любого типа, в данном случае (КФ5П1-5-400) каждый из них имеет сопротивление 400 Ом. Резисторы R3, R4 – прецизионные (например, типа С2-29), они имеют то же значение сопротивления и должны не только обладать высокой точностью значения сопротивления, но и его стабильностью. Несмотря на то, что $R3 = R4$, разброс R1 и R2 вынуждает провести балансировку моста, то есть корректировку сопротивлений резисторов R3 и R4 до достижения нулевого значения разности потенциалов в диагонали моста (или на выходе DA2.1). Для корректировки удобно устанавливать дополнительные подборные резисторы (сопротивлением 40...1000 кОм) параллельно R3 или R4. Питание моста осуществляется напряжением $U_0 = +4$ В, поступающим через резистор R5. Напряжение питания схемы ± 8 В – стабилизированное. Через тензорезисторы R1, R2 протекает ток около 5 мА.

Каскад на элементах DA1, DA2.1, R6...R12 представляет собой усилитель сигнала, снимаемого с диагонали моста. Коэффициент усиления дифференциального сигнала для данного каскада $K1 = 1 + 2R6 / R7 = 200$, при этом эффективно подавляется синфазная составляющая, а сигнал на выходе DA2.1 отсчитывается от общего вывода. Коэффициент усиления K1 при необходимости может устанавливаться в пределах от 1 до 1000. Должны выполняться условия $R6 = R8 = 50...100$ кОм, $R9 = R10 = R11 = R12$. Резисторы R6, R8...R12 – не хуже, чем 0,5%-ные. Следует отметить, что имеется ряд специализированных микросхем, целиком реализующих данный каскад, иногда без резистора R7, а иногда – с рядом дополнительных элементов и функций. Примером может служить микросхема MAX1452.

Каскад на элементах DA2.2, C2, R13, R14, R15, C4, R16 выполняет функцию дополнительного усиления с коэффициентом усиления $K2 = R16 / R14 = 20$ и фильтрации сигналов в диапазоне от 0,15 до 10 Гц. ФНЧ на элементах R16, C4 эффективно подавляет импульсы длительностью до десятков миллисекунд.

Конденсатор C2 отсекает низкочастотные сигналы вместе с постоянной составляющей. Далее проходит только переменная составляющая сигнала, а датчик в целом будет реагировать только на снятие картины (или любое другое изменение силы F). Элемент C2 (вместе с R13) может быть исключен, это превращает датчик изменения (движения) в датчик наличия (присутствия), так как выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ будет постоянно отслеживать приложенную к ЧЭ силу F. При наличии в схеме элемента C2 балансировка моста (резисторами R3, R4) становится необязательной.

Остается подвести окончательный баланс уровней сигналов. Воздействие силы $F = 1000$ Н вызывает относительное удлинение пластины $\epsilon = F / (ES) = 0,001$, относительное изменение сопротивления тензорезистора $\delta = K_T \epsilon = 0,002$, относительное изменение напряжения в диагонали моста $\Delta U_0 / U_0 = \delta_0 / 4 = 0,0005$, абсолютное изменение напряжения $\Delta U_0 = 0,0005 \times 4 \text{ В} = 2 \text{ мВ}$, изменение напряжения на выходе DA2.1 – $(\Delta U_0 K1) = 0,4 \text{ В}$, на выходе DA2.2 – $U_{\text{вых}} = (0,4 \text{ В}) \times$

$K2 = 8 \text{ В}$. Полный коэффициент преобразования $U_{\text{вых}} / F_{\text{вх}} = 8 \text{ В} / 1000 \text{ Н} = 0,008 \text{ В/Н}$.

Сигнал $U_{\text{вых}}$ (рис. 2.2.4) далее подается на компаратор К и РТ. Если минимальный вес картины составляет 200 Н, то следует установить порог срабатывания компаратора на уровне половины веса (100 Н) или 0,8 В. Снятие нагрузки (картины) вызывает уменьшение сопротивления R2, отрицательный выброс на выходе DA2.1 и положительный выброс $U_{\text{вых}}$ на выходе DA2.2. Если необходимо регистрировать любое изменение нагрузки, компаратор К должен быть двухпороговым.

Тензометрическое СО (рис. 2.2.4) можно использовать для обнаружения любого изменения силы: как ее уменьшения (снятия воздействия), так и увеличения (появления воздействия). Согласование величины силы и результирующего электрического сигнала достигается выбором площади поперечного сечения пластины ЧЭ. СО можно устанавливать под половицы для обнаружения передвижения человека по коридору или его остановки у двери (рис. 2.2.5а). Поскольку здесь сила распределяется на два тензометрических датчика (ТД1, ТД2), необходимо при выборе порога срабатывания рассчитывать не на половину, а на четверть минимального веса человека.

Без каких-либо существенных изменений схема

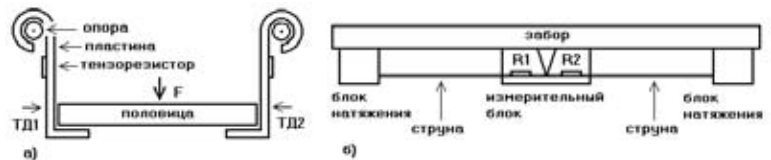


Рис. 2.2.5 Варианты тензометрических СО

(рис. 2.2.4) может применяться в качестве датчика натяжения, используемого для охраны забора от перелаза (рис. 2.2.5б). Вдоль полотна забора натянута (с одинаковой силой) в противоположные стороны две стальные струны. На элементах крепления каждой из них наклеены тензорезисторы R1 и R2. В случае воздействия ветра, температуры или других естественных факторов оба сопротивления меняются на одинаковую величину. При воздействии человека меняется натяжение одной из струн, что приводит к срабатыванию двухпорогового компаратора. Порог срабатывания – 50...500 Н – устанавливается в зависимости от требуемого уровня ложных тревог, времени года, наличия мелких животных и птиц. Установка ряда параллельных струн на расстоянии 0,1...0,2 м друг от друга увеличивает надежность обнаружения.

Измерение силы возможно не только с использованием тензорезисторов. Вообще разновидностей оценки веса – очень много, тем более, когда нет жестких требований к точности. В этом убеждаешься каждый раз, попадая на овощной рынок. Но из доступных, технически легко реализуемых, а следовательно дешевых, необходимо отметить еще один – на основе пьезоэлектрического ЧЭ.

Пьезоэффект заключается в электризации ЧЭ под действием механических напряжений. Пьезоэлектрическими свойствами обладают лишь некоторые веществ-

тва. На практике используются кварц и отдельные виды пьезокерамики – титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца. Разместив пьезоэлектрический элемент между двумя металлическими обкладками наподобие керамического конденсатора, и приложив силу F , получим на обкладках заряд Q (рис. 2.2.6а), величина которого пропорциональна силе, то есть $Q = dF$, где d – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом пьезочувствительности или пьезоэлектрическим модулем.

Сила F наводит заряд только в момент приложения.

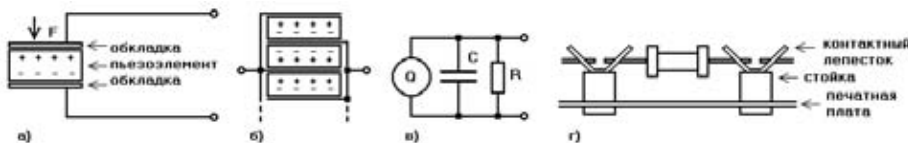


Рис. 2.2.6 Пьезоэлектрический ЧЭ

Затем он стекает и рассасывается. Новая порция заряда возникнет при новом изменении действующей силы, причем знак заряда меняется при изменении направления силы. Пьезоэлемент позволяет измерять различные физические величины: силу, смещение, ускорение, давление. Но он реагирует только на переменные воздействия. Постоянная сила не производит заряда непрерывно, и сигнал будет нулевым после стекания порции заряда, наведенной в момент воздействия силы.

Величина d для кварца составляет $d = 2,31$ пКл/Н, для пьезокерамики – $d = 40...220$ пКл/Н. Значение d может быть увеличено в N раз за счет использования N -слойной структуры (рис. 2.2.6б).

Эквивалентная схема пьезоэлектрического ЧЭ содержит источник заряда Q , емкость C и сопротивление R (рис. 2.2.6в). Емкость C складывается из емкости ЧЭ ($5...1000$ пФ), емкости соединительного кабеля (около 100 пФ/м) и входной емкости измерительного каскада. Сопротивление R – сопротивление параллельно соединенных ЧЭ (100 ГОм), изоляции кабеля (100 ГОм×м) и измерительной цепи (1 ГОм). Величина емкости C имеет важное значение, так как очевидно, что от нее зависит чувствительность в единицах напряжения $U / F = Q / (FC) = d / C$. Например, для кварца и типового значения $C = 1000$ пФ чувствительность составит $U / F = 2,31$ мВ/Н. Вместе с ростом значения C чувствительность падает, но расширяется частотный диапазон сигналов ($f > 1 / (2\pi RC)$), поэтому значения $C = 1000$ пФ и $R = 1$ ГОм обеспечивают компромисс высокого уровня чувствительности (порядка 1 мВ/Н) и широкого диапазона частот ($f > 0,1$ Гц).

Измерение силы пьезодатчиком имеет специфические особенности:

- высокий уровень наводок на большом входном сопротивлении; входные цепи необходимо экранировать;

- возрастание утечек при повышении влажности; все высокоомные цепи (сопротивлением более нескольких мегаом) необходимо защищать лаком от воздействия влаги; элементы в этих цепях следует устанавливать на плату через изолирующие (предпочтительно тефлоновые) стойки (рис. 2.2.6г);

- соединительный кабель между ЧЭ и первым каскадом усиления при деформации меняет емкость и генерирует собственный заряд; необходимо либо применять специальные кабели, либо

располагать первый каскад усиления в непосредственной близости от ЧЭ;

- пьезокерамические ЧЭ подвержены изменению собственной емкости в результате внешних воздействий и старения; для минимизации

погрешностей необходимо, чтобы входная емкость усилителя была стабильной и в несколько раз превосходила емкость ЧЭ;

- ОУ первого каскада должен иметь большое входное сопротивление, то есть иметь на входе полевые транзисторы; например, можно использовать K140УД8, K1409УД1, K544УД1, ОР-42, AD743, AD744, AD745, TL072, TL082.

В первом каскаде для согласования с высоким выходным сопротивлением пьезодатчика используются два типа усилителей: усилители напряжения (рис. 2.2.7) и усилители заряда (рис. 2.2.8).

Усилитель напряжения отличается непосредственным подсоединением пьезоэлемента к прямому входу ОУ DA1 (рис. 2.2.7а). Формируемый ЧЭ заряд преобразуется в напряжение $U = dF / C$, где $C = C_{\text{пьеzo}} + C1$, $C_{\text{пьеzo}}$ – собственная емкость пьезодатчика BQ1 (для кварцевых датчиков $C_{\text{пьеzo}} = 5...50$ пФ, для керамических – до 1000 пФ). Напряжение на BQ1 обратно пропорционально емкости C . Исключив из схемы элемент

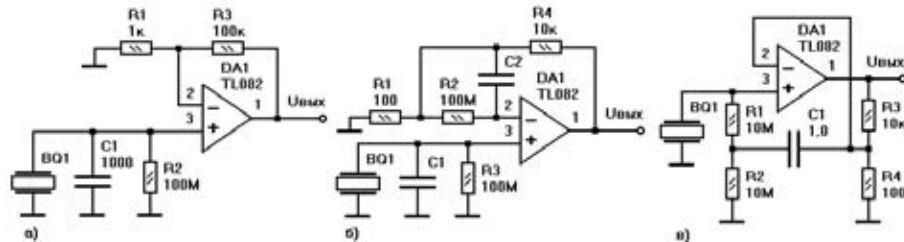


Рис. 2.2.7 Усилители напряжения

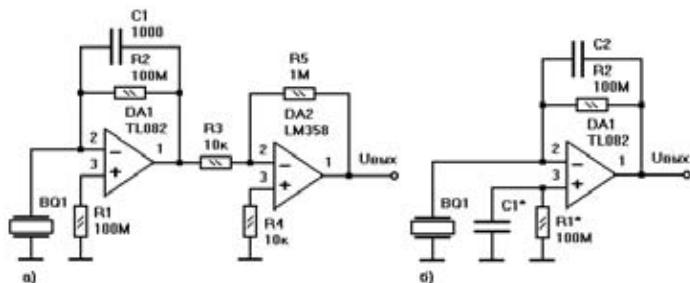


Рис. 2.2.8 Усилители заряда

С1, мы повысим чувствительность, но столкнемся с проблемой сильной зависимости чувствительности от $C_{\text{пьезо}}$. Поэтому в случае стабильности $C_{\text{пьезо}}$ (для некоторых типов пьезокерамики) можно обойтись без С1, а в случае нестабильности (для кварца и ряда типов керамики) необходимо устанавливать конденсатор со стабильной емкостью $C1 = 100 \dots 1000$ пФ. Элемент R2 нужен для стекания заряда с конденсатора С1. Без него конденсатор будет заряжаться токами утечки ОУ и через несколько часов без видимых причин может прозвучать сигнал тревоги. Значение R2 не должно превосходить 1 ГОм. С другой стороны, оно не должно быть менее 10 МОм, так как постоянная времени менее $R2C = (10 \text{ МОм}) \times (1000 \text{ пФ}) = 0,01$ с станет слишком мала и заряд будет стекать быстрее, чем он успеет генерироваться. Напряжение на ЧЭ ВQ1 усиливается ОУ DA1 в $(1 + R3 / R1) = 100$ раз. При установке в качестве ВQ1 двухслойного кварцевого пьезоэлемента (так называемого биморфа) полная чувствительность схемы (рис. 2.2.7а) составит $U_{\text{вых}} / F = d \times (1 + R3 / R1) / C1 = 4,62 \times 10^{-12} \times 100 / 10^{-9} = 0,46$ В/Н. Чтобы зафиксировать изменение силы в 10 Н (1 кГ), достаточно установить на выходе схемы двухпороговый компаратор, сравнивающий $U_{\text{вых}}$ с порогами $\pm 4,6$ В.

Если собственная емкость датчика ВQ1 $C_{\text{пьезо}}$ не превышает нескольких сотен пикофард, полезно балансировать схему усилителя напряжения (рис. 2.2.7б) элементами R2 и C2. Условие балансировки $R2 = R3$, $C2 = C1 + C_{\text{пьезо}}$, $R1 \ll R3$, $R4 \ll R3$. Балансировка позволяет уменьшить смещения и снизить уровень шумов.

Введение емкостной обратной связи (рис. 2.2.7в) способствует стабилизации параметров усилителя напряжения. Коэффициент усиления, как и прежде, равен $(1 + R3 / R4)$.

В усилителе заряда (рис. 2.2.8а) ЧЭ подсоединяется к инверсному входу ОУ DA1. БО на основе зарядового усилителя требует большего количества ОУ, но отличается лучшей стабильностью параметров. Каскад на элементах DA1, C1, R1, R2 преобразует заряд в напряжение. Его чувствительность равна $k = 1 / C1$. Она меняется в пределах от 0,1 до 10 мВ/пКл для $C1 = (10 \dots 0,1)$ нФ. Для получения того же значения полной чувствительности $U_{\text{вых}} / F = 0,462$ В/Н, что и для схемы, приведенной на рис. 2.2.7а, необходим дополнительный каскад усиления на DA2 (рис. 2.2.8а) с усилением $(1 + R5 / R3) = 100$, после которого можно установить К и РТ.

Если емкости конденсатора и ЧЭ в цепи усилителя заряда не превышают нескольких сотен пикофард, желательно сбалансировать входы DA1 с помощью элементов R1, C1 (рис. 2.2.8б). Условия балансировки $R1 = (R2 \times R_{\text{пьезо}}) / (R2 + R_{\text{пьезо}}) \approx R2$, $C1 = C2 + C_{\text{пьезо}}$. Балансировка расширяет диапазон рабочих температур и снижает уровень шумов.

Преимуществом использования пьезоэлементов в тензометрических СО является повышенная стойкость к внешним воздействиям, благодаря монолитной конструкции ЧЭ, широкий диапазон контролируемых значений силы в пределах от нескольких грамм до сотен тонн, а также простота конструкции.

С помощью тензометрических СО можно обнаружить все, что оказывает механическое воздействие на окружающие предметы, то есть любой материальный объект. Сила веса человека составляет не менее 500 Н, а длительность контакта – не менее 0,2...0,5 с. Основные виды помеховых воздействий имеют либо меньшую силу (птицы, мелкие животные, падение случайных предметов, ветер, дождь), либо более короткую продолжительность (удар). Тензометрические СО отличаются большим отношением сигнал/шум (более нескольких десятков), а следовательно, – высокой помехоустойчивостью, и узкой ЗО, ограниченной областью непосредственного контакта с ОО.

Сфера применения тензометрических СО обширна. Она охватывает как охрану отдельных предметов – ювелирных изделий на витринах, фолиантов на стеллажах, картин, шкафов, сейфов, – так и обнаружение открывания дверей, окон, решеток. В первом случае чувствительные датчики устанавливаются непосредственно под охраняемый предмет или под тросики, на которых он висит, и срабатывают при попытке снятия предмета. Во втором – в створки или петли наподобие электроконтактных кнопочных переключателей – и срабатывают при попытке их открывания. Также тензометрические СО могут быть установлены в любом месте маршрута нарушителя – под половицу, под ступеньку лестницы, под коврик, под подоконник или под натянутый тонкий тросик. Они не имеют ограничений на использование внутри помещений или на улице.

Промышленно изготавливаемые тензометрические СО предназначены для охраны либо отдельных предметов (до нескольких десятков штук), либо участков ограждения. Регулировка порога чувствительности в диапазоне 1...1000 Н позволяет фиксировать смещение предметов различного веса в разных условиях. При напряжении питания 10...30 В потребляемый ток лежит в пределах 2...15 мА. Диапазон рабочих температур – 40...+60°C. Средняя стоимость СО в расчете на один охраняемый предмет составляет 600...1500 рублей.

Тензометрические СО отличает ряд достоинств:

- большое отношение сигнал/помеха (внутри помещений – более ста), которое определяет высокие значения вероятности обнаружения и наработки на ложную тревогу;
- простота алгоритма и внутреннего устройства СО; простоте, как и положено, сопутствуют низкая стоимость и высокая повторяемость;
- высокая надежность и стабильность характеристик;
- маскируемость; тензометрические СО не только визуально незаметны, но и являются пассивными СО и не производят каких-либо излучений в окружающее пространство;
- простота монтажа и обслуживания.

Основной недостаток тензометрических СО – сложность автоматической проверки работоспособности, которая вообще характерна для пассивных СО. Поэтому тензометрические СО требуют периодической проверки путем непосредственного воздействия на ЧЭ.

2.3. Протяженные датчики давления

ЧЭ протяженного датчика давления (ПДД) не вступает в непосредственный контакт с ОО. Он представляет собой эластичный резиновый шланг, наполненный незамерзающей жидкостью. Жидкость – это обычный автомобильный тосол. Шланг закапывается в грунт на глубину 0,2...0,3 м и воспринимает давление, возникающее в грунте под действием веса человека. Длина шланга достигает 100 метров. ПДД хорошо работает при плюсовых температурах, но после промерзания грунта теряет чувствительность.

Протяженный датчик давления часто носит другие названия: шланговое СО, инфранизкочастотное (ИНЧ) сейсмическое СО, гидравлическое СО, шланговый датчик давления, гидравлический датчик, гидравлический подземный сенсор, подземный манометрический периметральный извещатель, низкочастотное сейсмическое СО, барометрический датчик, балансный датчик давления. Смысл всех названий практически очевиден, хотя их обилие и вносит определенные трудности в понимании.

ПДД является пассивным СО, так что при аккуратном закапывании его наличие практически ничем не проявляется. После появления первых всходов травы даже хозяин с трудом укажет место его установки. ПДД – это линейное внешнее СО. Его работе не мешает травяной покров или нетолстый слой асфальта.

Оценим значения полезных и помеховых воздействий, исходя из физической модели обнаружения. Представим землю в виде полупространства, на границу которого действует сосредоточенная сила F под прямым углом к поверхности (рис. 2.3.1а). Тогда распределение механических напряжений в различных точках грунта определяется по формулам Буссинеска. Точные их выражения весьма громоздки, но приближенно можно считать, что давление равно $p = 3F\cos^3\phi / (2\pi R^2)$, где F – это вес человека, R – расстояние от точки приложения силы F до точки измерения давления, ϕ – угол между линией приложения силы и направлением на точку измерения. Множитель $\cos^3\phi$ равен 1 для угла $\phi = 0$, с увеличением угла он резко убывает, становясь равным $\cos^3\phi = 0,5$ уже при $\cos\phi = 0,79$ или $\phi = 0,65$ рад = 37 градусов. Можно сказать, что зона эффективного восприятия давления представляет собой конус с вершиной в точке приложения силы и с углом при вершине около 80° . С точки зрения шланга ЗЧ укладывается в те же 80° , направленные от него вверх к поверхности земли. Закопав шланг на большую глубину (метра два), можно было бы рассчитывать на возможность регистрации нескольких шагов человека, вот только величина сигнала обратно пропорциональна квадрату расстояния. Поэтому приходится располагать ЧЭ максимально близко к поверхности земли, но не настолько, чтобы его можно было просто перешагнуть (рис. 2.3.1б). Обозначим ширину ЗЧ за l . В наихудшем случае, когда точки воздействия каждой из ног наиболее удалены от шланга, величина l будет равна максимальной длине шага $l_{\text{ш}}$ минус минимальная длина ступни $l_{\text{ст}}$. При быстром

шаге оценка l составит $l = l_{\text{ш}} - l_{\text{ст}} = 0,8 \text{ м} - 0,25 \text{ м} = 0,55 \text{ м}$. Тогда оптимальная глубина установки шланга $h = l / (2\text{tg}40^\circ) = 0,3 \text{ м}$. При большей глубине уменьшается величина сигнала, при меньшей появляется возможность случайного перешагивания через ЧЭ. Тонкий слой асфальта способствует равномерному распределению нагрузки по большей поверхности, в этом случае глубину установки можно несколько уменьшить.

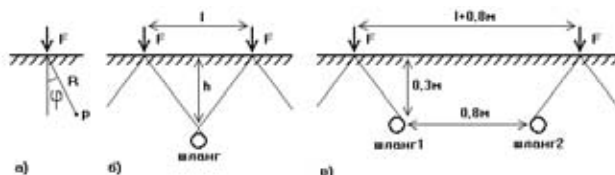


Рис. 2.3.1 Физическая модель ПДД

На открытой местности, без деревьев и естественных препятствий, человек может бежать, тогда длина шага превысит ожидаемые 0,8 м. В этом случае появляется вероятность случайного перепрыгивания одного шланга (рис. 2.3.1б). Поэтому необходимо увеличить ширину ЗЧ, установив второй шланг параллельно первому (рис. 2.3.1в). Очевидно, что расстояние между шлангами должно составлять те же $l + l_{\text{ст}} = 0,8 \text{ м}$ при глубине их размещения 0,3 м. Тогда ширина ЗО двухшлангового СО удваивается и достигает примерно 1,6 м.

На практике лучше взять не два, а четыре шланга, включив их по дифференциальной схеме: к каждому шлангу, идущему налево, следует подключить такой же, идущий направо, а посередине установить датчик разности давлений, что позволит избавиться от медленных естественных флуктуаций, вызванных ветром, намоканием почвы, изменениями температуры или атмосферного давления.

Формула Буссинеска позволяет оценивать величины полезных и помеховых воздействий в единицах давления. В наихудшем случае $F = 500 \text{ Н}$, $h = 0,3 \text{ м}$, $\phi = 40^\circ$. Тогда $R = h / \cos\phi = 0,4 \text{ м}$, а давление $p = 3F\cos^3\phi / (2\pi R^2) = 670 \text{ Па}$. Максимальное измеряемое давление (тяжелый человек, $F = 2000 \text{ Н}$, $\phi = 0^\circ$, $h = R = 0,3 \text{ м}$) может достигать $p = 3F\cos^3\phi / (2\pi R^2) = 10 \text{ кПа}$. Максимальное воздействующее давление (грузовой автомобиль, $F = 100000 \text{ Н}$, $\phi = 0^\circ$, $h = R = 0,3 \text{ м}$) может составить 500 кПа – ЧЭ должен выдерживать такое давление, сохраняя работоспособность.

Основное помеховое воздействие на ПДД – ветровые нагрузки на окружающие предметы. Если в непосредственной близости от шланга находится среднее дерево с площадью кроны около $S = 10 \text{ м}^2$, то во время значительного порыва ветра со скоростью $v = 10 \text{ м/с}$ сила ветровой нагрузки составит примерно $F = \rho v^2 S = 1,3 \times 100 \times 10 = 1300 \text{ Н}$ (ρ – плотность воздуха, равная $1,3 \text{ кг/м}^3$). Сила сравнима по величине с весом ОО, поэтому избавиться от помехового воздействия возможно, лишь удалив его от ЧЭ. Чтобы величина воздействия от дерева не превышала $p = 100 \text{ Па}$, оно должно

быть удалено от шлангов на расстояние не менее $R = (3F / (2\pi r))^{1/2} = 2,5$ м.

Уровень шума ПДД можно оценить величиной ветровой нагрузки, действующей непосредственно на поверхность земли. В случае равномерного воздействия на оба шланга ветровая нагрузка компенсируется, благодаря их дифференциальной схеме включения. Однако наличие порывов ветра, меняющего свое направление, и естественных преград в различных местах на пути ветра приводит к неоднородности воздействия на каждый из шлангов. Данный вид помехи создает непрерывный шум и от него невозможно избавиться никакими ухищрениями. При средней скорости ветра $v = 3,9$ м/с (для средней полосы России) давление ветра на грунт или препятствия не превосходит $p = \rho v^2$, то есть $p < 1,3 \times 3,9 \times 3,9 = 20$ Па. Отношение сигнал/шум в среднем составляет $600/20 = 30$.

Еще одним серьезным источником помех являются транспортные средства. Благодаря большой массе, они производят высокое давление внутри грунта и его сильные колебания. Волны сжатия и растяжения распространяются на значительные расстояния, но производят на ЧЭ не такое сильное действие, как статическое давление. Отстройке от помех данного вида способствует неглубокое расположение ЧЭ, так как статическое давление плохо передается вдоль поверхности земли.

В системе СИ единицей измерения давления является паскаль (Па), равный $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Кроме нее, можно встретить множество других внесистемных единиц: атмосфера (атм), бар и миллибар (мбар), миллиметр ртутного столба (мм рт.ст.), миллиметр водяного столба (мм вод.ст.), дина на квадратный сантиметр (дин/см²), фунт на квадратный дюйм (psi), дюйм ртутного столба (InHg). Перевести любую внесистемную единицу в паскали поможет таблица 2.3.1. В ней же приведены диапазоны измеряемых давлений, требуемые для использования в составе ПДД. Пользуясь таб-

Таблица 2.3.1 Единицы измерения давления

Единица	Перевод в паскали	Диапазон измерения ПДД
Па	1	$\pm 100 \dots \pm 10000$ Па
атм	1 атм = 101325 Па	$\pm 0,001 \dots \pm 0,1$ атм
мбар	1 мбар = 100 Па	$\pm 1 \dots \pm 100$ мбар
мм рт.ст.	1 мм рт.ст. = 133,3 Па	$\pm 0,8 \dots \pm 80$ мм рт.ст.
мм вод.ст.	1 мм вод.ст. = 9,806 Па	$\pm 10 \dots \pm 1000$ мм вод.ст.
дин/см ²	1 дин/см ² = 0,1 Па	$\pm 1000 \dots \pm 100000$ дин/см ²
psi	1 psi = 6895 Па	$\pm 0,015 \dots \pm 1,5$ psi
InHg	1 InHg = 3386 Па	$\pm 0,03 \dots \pm 3$ InHg

лицей, легко подобрать из множества датчиков давления те, которые можно применять в шланговом СО. Знак \pm отмечает тот факт, что давление может повышаться на указанную величину в любом из двух шлангов, подсоединенных к одному датчику давления, а сам датчик должен быть дифференциального типа, то есть сигнал на его выходе пропорционален разности давлений в левом и правом шланге.

Промышленно изготавливаемых датчиков давления очень много. Ограничиваясь требуемым диапазоном измерения и дифференциальным типом, можно подобрать ряд наиболее подходящих (таблица 2.3.2). Все приведенные датчики являются аналоговыми, то есть их выходное напряжение пропорционально измеряемому давлению. В таблице введены следующие обозначения: p_0 – максимальное рабочее давление, U_0 – соответствующее ему выходное напряжение датчика, $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания, $T_{\text{РАБ}}$ – диапазон рабочих температур, $p_{\text{ПРЕД}}$ – предельно допустимое давление. Перечень датчиков далеко не полный, но позволяет выделить основные показатели и их значения. Измерение дифференциальных давлений в диапазоне 1...10 кПа возможно с помощью готовых датчиков, хотя их цена достаточно высока. Почти все датчики изготавливаются на основе тензорезисторов, регистрирующих изгиб мембраны, воспринимающей разность давлений. Датчик без усилителя выдает электрический сигнал непосредственно с диагонали моста, тогда его выходное напряжение составляет порядка десятков милливольт. Датчик с усилителем формирует сигнал порядка единиц вольт. Наличие встроенного усилителя удорожает преобразователь. Датчик измерения давления жидкости отличается от датчика измерения давления воздуха тем, что измерительная мембрана защищена в нем от контакта с жидкостью дополнительной металлической или пластиковой диафрагмой. Гидроизоляция ЧЭ повышает его стоимость до 60...90 у.е. Большая стоимость датчиков связана с тем, что они предназначены для измерения давления с малой погрешностью. Конструкции с использованием тензорезисторов отличаются высокой надежностью, средняя наработка датчика на отказ составляет 2×10^6 часов.

Не все датчики выдерживают большие перегрузки давления, поэтому в конструкцию СО необходимо вводить гидравлический клапан, защищающий ЧЭ от разрушения или необратимых деформаций (рис. 2.3.2). Сила пружины $F_{\text{ПРУЖ}}$ подбирается таким образом, чтобы противостоять невысоким значениям давления до достижения предельного для используемого датчика:

Таблица 2.3.2 Дифференциальные датчики давления

Название	Производитель	p_0 , кПа	U_0 , В	$U_{\text{пит}}$, В	$T_{\text{РАБ}}$, °С	$p_{\text{ПРЕД}}$, кПа
176PC14HD2	Honeywell	3,5	0,035	10	-40...+85	35
MPVZ4006G	Freescale Semiconductor	6	4,6	5		
26PC01SMT	Honeywell	6,9	0,017	10	-40...+85	140
FPG2AP2u5g6a	Honeywell	6,9	0,1	10	-40...+115	28
KPF070D04	КЕС	7	0,075	4,5...9	-40...+125	70
PDS-70GA	KYOWA	7	0,023	9,5...15	-20...+70	100
PDV-70GA	KYOWA	7	5	11...15	-20...+70	100
MIDAS DP 10	JUMO	40	4,5	5	-20...+80	500

$F_{\text{пруж}} = S \times p_{\text{пред}}$, где S — площадь клапана. В случае превышения $p_{\text{пред}}$ давление заставляет клапан закрыться. После снятия давления пружина открывает клапан и СО возвращается в нормальный режим работы. Между объемами шлангов следует предусмотреть тонкое перепускное отверстие (или трубку), необходимое для выравнивания давлений в случае их медленных изменений, неизбежных при намокании или проседании почвы. В конструкции датчика должны быть средства удаления воздуха и поддержания начального избыточного давления жидкости.

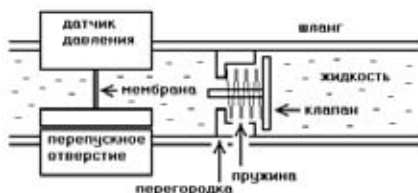


Рис. 2.3.2 Гидравлический клапан

Высокая стоимость промышленных датчиков давления (от одной — двух тысяч рублей) заставляет задуматься об их самостоятельном изготовлении. Конструкция ЧЭ не содержит сложных или особо точных элементов, поэтому при невысоких требованиях к погрешности измерения (10...20%) его можно изготовить из подручных материалов. Основу конструкции составляют два круглых трубных фланца (рис. 2.3.3). К одному из них должна быть приварена или припаяна (в крайнем случае, приклеена) мембрана. Мембрана представляет собой тонкий металлический диск. Она воспринимает давление жидкости, поэтому соединение должно быть надежным, а сам фланец — жестким. Второй фланец прикручивается к первому винтами через резиновую прокладку, которая обеспечивает герметичность соединения. В одном из фланцев (с мембраной) имеется отверстие для вывода проводов от измерительного элемента. Шланги надеваются на трубные части фланцев.

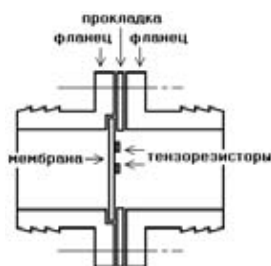


Рис. 2.3.3 Датчик давления

Под действием давления мембрана изгибается. Величина изгиба может быть измерена одним из трех способов: микроперемещений, емкостным или с помощью тензорезисторов. Первый заключается в измерении малых смещений центра мембраны. Он весьма трудоемок, так как требует механической передачи смещения от мембраны сквозь фланец наружу, где и производятся измерения. Емкостной способ состоит в измерении емкости между мембраной и неподвижным

электродом, размещаемым параллельно мембране. Ее изгиб меняет емкость конденсатора. Способ работает эффективно, если решить ряд чисто технических вопросов, к которым относятся: электрическая изоляция мембраны при сохранении жесткости ее крепления, борьба с электролизом жидкости на обкладках конденсатора (мембране и неподвижном электроде), поляризация и электрохимическое разрушение обкладок.

Наиболее простое и надежное решение — измерение изгиба мембраны с помощью тензорезисторов. Оно дешево и не требует сложных механических операций при изготовлении ЧЭ. Тензорезисторы наклеиваются на одну из сторон мембраны и измеряют ее относительное удлинение в местах наклеивания. Естественно, после наклеивания их необходимо защитить от контакта с жидкостью, покрыв лаком или эластичной пленкой. В промышленности пространство между защитной полимерной пленкой и мембраной заполняется тонким слоем нейтрального силиконового геля.

Связь между давлением жидкости p и относительным удлинением $\epsilon_r(r)$ в радиальном (вдоль радиуса) направлении на расстоянии r от центра круглой мембраны определяется соотношением: $\epsilon_r(r) = (3/8)(1-\mu^2)(R/h)^2(p/E)(1-3(r/R)^2)$, где μ и E — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала мембраны, R и h — радиус и толщина мембраны (рис. 2.3.4). Данное соотношение позволяет рассчитывать значения размеров R и h мембраны и определять относительное удлинение $\epsilon = \Delta l/l$ в точке наклеивания тензорезистора.

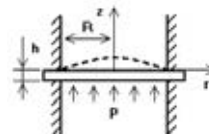


Рис. 2.3.4 Изгиб мембраны

Относительное удлинение мембраны в тангенциальном (вдоль окружности, перпендикулярно к радиусу) направлении равно $\epsilon_t(r) = (3/8)(1-\mu^2)(R/h)^2(p/E)(1-(r/R)^2)$. Оно отличается от радиального $\epsilon_r(r)$ и также может быть использовано для измерения давления p , хотя предпочтение обычно отдается именно радиальному.

Полезно знать соотношения для механических напряжений, действующих в мембране вдоль радиуса $\sigma_r(r) = (3/8)(1-\mu)(R/h)^2(1-((3+\mu)/(1+\mu))(r/R)^2)p$ и вдоль окружности $\sigma_t(r) = (3/8)(1-\mu)(R/h)^2(1-((3\mu+1)/(\mu+1))(r/R)^2)p$. Они позволяют проверить мембрану на прочность, сравнивая максимальные значения напряжений с допустимыми. Представляет интерес и величина прогиба мембраны (смещения $z(r)$ в направлении, перпендикулярном к плоскости мембраны) $z(r) = (3/16)(1-\mu^2)(R/h)^4(p/E)(1-(r/R)^2)^2h$ (рис. 2.3.4).

Измерение деформации круглой плоской мембраны может производиться с помощью специальных тензорезисторов мембранного типа (рис. 2.3.5). Они имеют сравнительно крупные размеры и наклеиваются на центр мембраны. По своему внутреннему устройству они делятся на полумостовые (рис. 2.3.5а) и мостовые (рис. 2.3.5б).

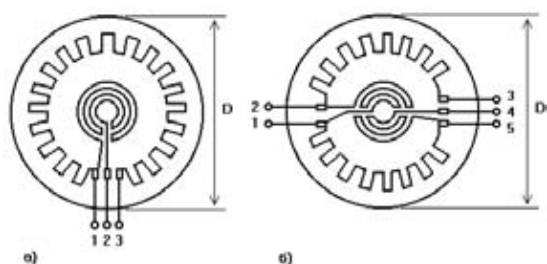


Рис. 2.3.5 Мембранные тензорезисторы

Центральная часть полумостового тензорезистора (между контактами 1 и 2) измеряет окружное удлинение, а периферийная (между контактами 1 и 3) – радиальное. Под действием давления p центральная часть мембраны испытывает растяжение, а периферийная – сжатие. Точные соотношения между давлением p и результирующими удлинениями можно получить для конкретных размеров мембраны и тензорезистора, используя приведенные выше выражения для $\epsilon_R(r)$ и $\epsilon_T(r)$. На контакты 2 и 3 подается напряжение питания моста. Оно подается также на другой аналогичный полумост (или на резисторный делитель напряжения из двух постоянных резисторов). С контактов 1 двух полумостов, образующих диагональ моста, снимается выходной сигнал.

Мостовой мембранный тензорезистор (рис. 2.3.5б) состоит из двух полумостов и представляет собой законченную измерительную цепь. На контакты 1 и 3 (после соединения контактов 3 и 4) подается напряжение питания моста. Сигнал снимается с контактов 2 и 5, представляющих собой диагональ моста. Контакты 3 и 4 разъединены, так как между ними, а также между ними и контактом 5 могут устанавливаться дополнительные подборные постоянные резисторы для точной балансировки моста. Балансировка заключается в получении начального нулевого сигнала в диагонали. В одной половине моста (от контакта 1 к контакту 3) сначала идет тензорезистор с окружной чувствительностью, а затем – с радиальной, а в другой (1-4) – наоборот. Это повышает чувствительность моста в два раза.

Параметры некоторых мембранных тензорезисторов приведены в таблице 2.3.3. Как и для подавляющего большинства константовых тензорезисторов, диапазон измеряемых деформаций составляет от -3000 до $+3000$ мкм/м (или от $-0,003$ до $+0,003$), тензочувствительность $K_T = 1,9 \dots 2,2$, масса – менее $0,3$ г, максимальный ток питания – 20 мА.

Таблица 2.3.3 Мембранные тензорезисторы

Название	Тип	Сопротивление, Ом	Размер D, мм
КФ5М1-3-100	полумост	100	5,5
КФ5М1-5-200	полумост	200	7,3
КФ5М-5-200	мост	200	7,3
КФ5М-10-200	мост	200	12

Размещение нескольких резисторов на одной подложке мембранного типа фиксированного размера (рис. 2.3.5) упрощает изготовление датчика, но сковывает сво-

боду выбора способа измерения и его чувствительности. Размер мембраны должен соответствовать размерам мембранного тензорезистора. Поэтому иногда бывает проще использовать обычные линейные тензорезисторы, наклеивая их в определенные заранее выбранные точки мембраны. Анализируя зависимость $\epsilon_R(r)$, можно заметить, что относительное растяжение в центре $\epsilon_R(0)$ совпадает по величине с относительным сжатием в точке, удаленной от центра на $r_0 = (2/3)^{1/2}R = 0,816R$, то есть $\epsilon_R(0) = -\epsilon_R(0,816R)$. Наклеив на мембрану два тензорезистора в радиальном направлении, один – в центре, другой – на расстоянии $0,816R$ от центра, отаается подсоединить их в схему измерительного моста (рис. 2.3.6). Выражение для относительного удлинения преобразуется в этом случае к виду $\epsilon_T(r) = (3/8)(1-\mu^2)(R/h)^2(p/E)$. Чувствительность моста повышается в два раза и составляет $1/2$, благодаря тому, что в результате действия давления p сопротивление $R1$ уменьшается настолько же, насколько увеличивается $R2$ (то есть $\Delta R1 / R1 = -\Delta R2 / R2$). Чувствительность моста при постоянных $R3$ и $R4$ равна $\Delta U / U = 0,5 \times \Delta R2 / R2 = 0,5 \times K_T \times \epsilon_R(0) = \epsilon_R(0)$. Необходимо иметь в виду, что на расстояниях $r_1 = (1/3)^{1/2}R = 0,577R$ от центра мембраны радиальное удлинение отсутствует $\epsilon_R(0,577R) = 0$; сюда не следует наклеивать измерительные тензорезисторы, но можно наклеивать опорные, служащие для термокомпенсации.

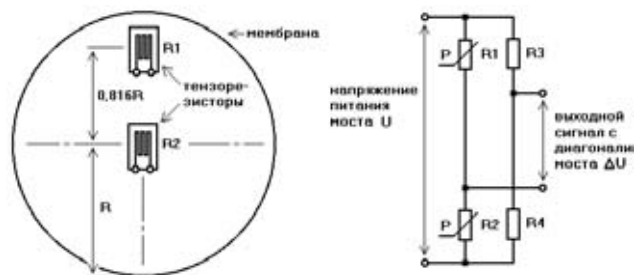


Рис. 2.3.6 Размещение тензорезисторов на мембране

Проведем расчет размеров мембраны и параметров усилителя для ПДД. Чтобы не работать на пределе возможностей и принимая во внимание необходимый трехкратный запас для динамической нагрузки, следует установить для максимального измеряемого давления $p_{\max} = 10$ кПа соответствующее относительное изменение длины тензорезистора $R1$ или $R2$ (рис. 2.3.6) $\epsilon_{\max} = 0,001$. Для определения значений R и h воспользуемся соотношением $\epsilon_R(0) = (3/8)(1-\mu^2)(R/h)^2(p/E)$, выбрав в качестве материала мембраны латунь. Коэффициент Пуассона $\mu = 0,36$, а модуль упругости $E = 0,95 \times 10^{11}$ Па, так что $0,001 = 0,375(1-0,36^2)(R/h)^2(10^4/0,95 \times 10^{11})$, откуда $R/h = 171$. Выбрав толщину мембраны $h = 0,2$ мм, получаем для ее радиуса $R = 34,2$ мм. Центр одного тензорезистора располагается в центре мембраны, центр другого – на расстоянии $0,816R = 28$ мм от центра мембраны, база каждого тензорезистора – не более $3 \dots 4$ мм. При этом максимальное напряжение $\sigma_{\max} = (3/8)(1-\mu)(R/h)^2 p = 0,375 \times (1-0,36) \times 171^2 \times 2 \times 10^4 = 140$ МПа, что не превосходит предел прочности латуни ($320 \dots 600$ МПа) и укладывается в границы допустимых напряжений.

Подводя промежуточный итог, давление в шланге $p_{\max} = 10$ кПа дает относительное удлинение в центре мембраны $\epsilon_{\max} = 0,001$, и относительный электрический сигнал на выходе моста $\Delta U_{\max} / U = 0,5K_T \epsilon_{\max}$, где U — напряжение питания моста (рис. 2.3.6). Для тензорезисторов сопротивлением $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 400$ Ом при токе около 5 мА напряжение питания моста должно составлять $U = 4$ В. Тогда максимальный сигнал на выходе моста $\Delta U_{\max} = U \epsilon_{\max} = 4 \times 0,001 = 4$ мВ и чувствительность датчика до выхода моста $\Delta U_{\max} / p_{\max} = 4 \times 10^{-7}$ В/Па, то есть при повышении давления на 1 Па напряжение в диагонали моста возрастает на 4×10^{-7} В = 0,4 мкВ.

Сигнал с выхода моста необходимо усилить в 2000 раз, чтобы максимальное измеряемое давление $p_{\max} = 10$ кПа давало на выходе усилителя сигнал $U_{\text{Вых}} = 8$ В (напряжение питания). Здесь можно воспользоваться схемой мостового усилителя, знакомой нам по тензометрическому СО (п. 2.2).

В состав ПДД входит, прежде всего, сам измерительный мост из элементов R_1, R_2, R_3, R_4 (рис. 2.3.7). Небольшие тензорезисторы R_1, R_2 типа КФ5П1-3-400 (или подобные, табл. 2.2.1) сопротивлением 400 Ом наклеиваются на мембрану как показано на рис. 2.3.6. Напряжение питания моста — 4 В, через тензорезисторы протекает ток 5 мА. Усилитель сигнала с диагонали моста выполнен на элементах $DA1, DA2.1, R_6 \dots R_{12}$. Его коэффициент усиления $K_1 = 1 + 2R_6 / R_7 = 200$. Следующий каскад на $DA2.2$ усиливает сигнал еще в $R_{16} / R_{14} = 10$ раз. Конденсатор C_4 отфильтровывает высокочастотные шумы и короткие помеховые импульсы. Конденсатор C_2 подавляет медленные флуктуационные шумы.

С выхода $DA2.2$ снимается усиленный сигнал, готовый для подачи на компаратор. Чувствительность в

данной точке составляет $4 \times 10^{-7} \times 2000 = 8 \times 10^{-4}$ В/Па. Давление в шланге при появлении среднего человека — не менее 600...1000 Па, а уровень помех — до 20...100 Па, поэтому величина порога компаратора должна регулироваться в пределах $(200 \dots 1000) \times 8 \times 10^{-4} = 0,16 \dots 0,8$ В в зависимости от условий размещения, близости деревьев и глубины закапывания шлангов.

Компаратор реализован на микросхеме $DA3$. Значения порогов устанавливаются делителем $R_{17}, R_{18}, R_{19}, R_{20}, R_{21}$ в пределах от 0,14 В до 0,8 В. Они определяют четыре уровня чувствительности СО. Резисторы R_{22}, R_{24} обеспечивают небольшой (в пределах 0,01 В) гистерезис компаратора. Элементы R_{25}, C_5 селективируют выбросы по длительности и пропускают их только при превышении порогового значения $0,7R_{25}C_5 = 0,15$ с. Одновибратор на $DD1.3, R_{26}, C_6$ формирует сигнал срабатывания высокого уровня продолжительностью $0,7R_{26}C_6 = 7$ с. Все неиспользуемые входы микросхем $DD1, DD2$ необходимо соединить с цепью 0 В.

Регулировку чувствительности (порога срабатывания компаратора $DA3$) можно было бы реализовать на переменном резисторе или механическом переключателе. Однако, в данном случае из соображений надежности она организована электронными средствами. Напряжение порога срабатывания с делителя $R_{17} \dots R_{21}$ подается на опорный вход 2 $DA3$ через микросхему коммутатора $DD3$. Она подсоединяет к своему выходу X одну из четырех точек делителя (входы X_1, X_2, X_3, X_4) в зависимости от показания счетчика $DD2.1$. Показание счетчика циклически увеличивается на единицу при каждом нажатии на кнопку $SB1$. Оно же индицируется на семисегментном индикаторе $HG1$ через дешифратор двоичного кода $DD4$. Показание «0» на индикаторе (00 на выходе $DD2.1$) соответствует ми-

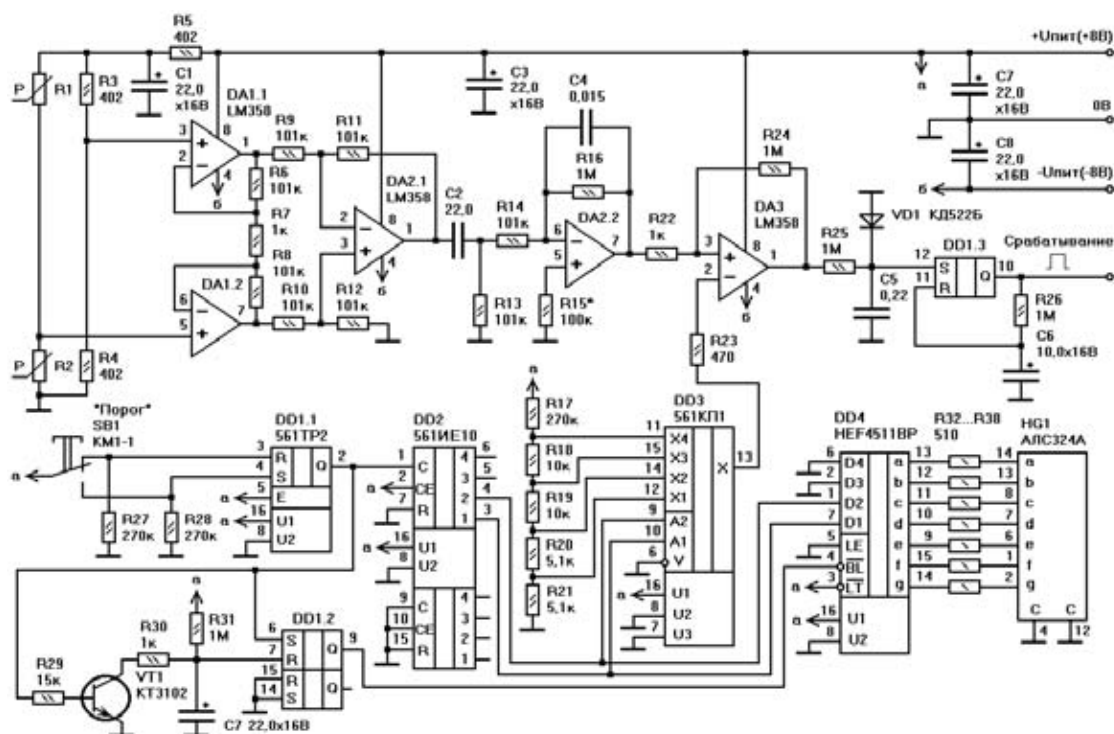


Рис. 2.3.7 ПДД

нимальному порогу чувствительности, для которого достигается максимальная вероятность обнаружения, но и максимальная же частота ложных тревог. Порог «3» обеспечивает наивысшую помехоустойчивость, но и наименьшую чувствительность. Показания «1» и «2» соответствуют промежуточным уровням. Элементы DD1.2, VT1, C7, R29...R31 обеспечивают включение индикатора HG1 только на время установки порога кнопкой SB1. В остальное время индикатор выключен для уменьшения энергопотребления.

Нельзя допустить, чтобы диаметр шланга был слишком большим; на его заполнение уйдет много жидкости, а наличие в грунте крупного включения искажит результаты измерения. Но нельзя допустить и установки слишком тонкого шланга; малый объем выданной жидкости не сможет сдвинуть мембрану. Оценим минимальную величину диаметра шланга. Зная зависимость смещения точек мембраны от координат $z(r) = (3/16)(1-\mu^2)(R^4/h^3)(p/E)(1-(r/R)^2)^2$, легко определить объем жидкости, необходимый для данного смещения:

$$V_{MEM}(p) = \frac{3}{16}(1-\mu^2) \frac{R^4 p}{h^3 E} \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 2\pi r dr = \frac{\pi}{16}(1-\mu^2) \frac{R^6 p}{h^3 E}$$

Оценим объем жидкости $V_{шл}$, выдавливаемой из шланга при наступании на него, для случая, когда его площадь сечения уменьшается вдвое. Тогда $V_{шл} = (\pi(R_{шл})^2/2)l_{СТ}$, где $R_{шл}$ – радиус шланга, $l_{СТ} = 0,1$ м – средняя ширина стопы человека. Половинная площадь сечения соответствует критической точке, после прохождения которой шланг теряет эластичность и может схлопнуться. Чтобы не доводить оборудование до необратимых последствий, следует выполнять условие $V_{MEM}(p_{max}) \ll V_{шл}$ или

$$R_{шл} > \left(\frac{1,25(1-\mu^2)p_{max}}{h^3 E l_{СТ}} \right)^{1/2} R^3$$

При невыполнении данного условия датчик давления превратится в датчик объема жидкости, выдавленной из шланга. Для описанной ранее мембраны ($\mu = 0,36$; $p_{max} = 10000$ Па; $h = 0,0002$ м; $E = 0,95 \times 10^{11}$ Па; $R = 0,034$ м) получим $R_{шл} > 0,0149$ м, то есть минимальный диаметр шланга – 30 мм. Чтобы воспользоваться шлангом меньшего диаметра, необходимо уменьшить радиус мембраны R или увеличить ее толщину h . Стенки шланга не должны быть жестким, иначе он просто не будет воспринимать давление со стороны грунта. Поливочный шланг с армированными или гофрированными стенками имеет повышенную жесткость против повреждения при случайном наступании на него. Он не обладает эластичностью в поперечном сечении и не может использоваться в качестве ЧЭ ПДД. Мягкий податливый шланг не слишком удобен для полива огорода, но он наиболее подходит для ПДД.

ПДД идеально вписывается в охрану короткого участка, например, садовой дорожки или пяткачка перед калиткой. Можно считать удачным совпадением то, что ПДД особенно эффективно работает в тот пери-

од времени, когда мы отдыхаем на даче. На первый взгляд кажется трудоемким изготовление всех этих мембран, работа с фланцами, клеем, тосолом. В принципе конструкцию для охраны дачной тропинки можно существенно упростить за счет некоторой потери изящества и долговечности СО.

Свой первый ПДД я сделал из обычной клизмы. Он проработал на даче не один год и показал высокую надежность. Правильнее назвать его точечным датчиком давления. Изготовление подобного датчика занимает не более одного дня.

Прежде всего приобретем в аптеке мягкую спринцовку (резиновую грушу) стоимостью около 30 рублей. На носик спринцовки надеваем кембрик длиной около 3 м с внутренним диаметром не менее 6...8 мм, затем герметизируем место соединения термоусадочной трубкой. Кембрик можно заменить любым гибким шлангом или трубкой такого же диаметра. Из трубки меньшего диаметра будет сложно удалить воздушные пузыри. Расположив всю конструкцию вертикально (грушей вниз), опускаем открытый конец трубки в емкость со слегка подсоленной водой (1 грамм соли на литр воды). Надавливая на грушу и отпуская ее, а затем слегка потряхивая трубку, можно быстро заполнить будущую гидравлическую систему водой и освободить ее от воздуха. Затем надеваем на открытый конец кембрика тонкую жесткую прозрачную стеклянную (или пластмассовую) трубку и также заполняем ее водой, предварительно загерметизировав место соединения. Внутренний диаметр прозрачной трубки – не более 2...3 мм, а длина – не менее 100 мм; это может быть, скажем, отработанный стержень от гелевой ручки.

Закопаем грушу на глубину 0,2...0,3 м под серединой дорожки на расстоянии 0,3...0,4 м от калитки с ее внешней стороны. Гибкий кембрик расположим вертикально и прикрепим к забору (с внутренней стороны). Теперь груша – это ЧЭ, а прозрачная трубка – средство наблюдения за давлением (рис. 2.3.8). Сверху все сооружение довершает раструб (воронка или подходящий по размерам пластиковый флакон с вырезанным дном). Он необходим для того, чтобы излишки жидкости не выливались из верхней трубки при значительном повышении ее уровня.

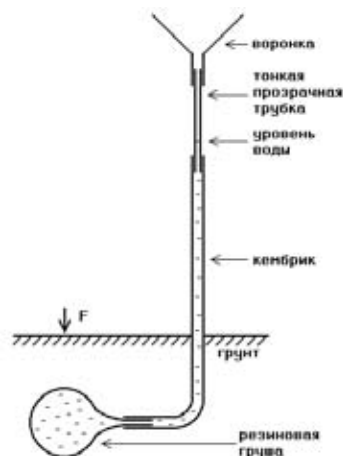


Рис. 2.3.8 ЧЭ простейшего ПДД

Пройдя по дорожке туда-сюда, воочию наблюдаем импульсы давления по периодическому (в такт с шагами) подъему уровня жидкости в прозрачной трубке и возврату его к исходному уровню после ухода человека. Добавляя и отбирая воду, установим начальный уровень жидкости (без воздействия силы F) по нижнему краю тонкой трубки.

Будем вставлять в различные точки на дорожку вокруг места установки груши и отмечать величину подъема жидкости h относительно начального уровня. Максимальное значение h соответствует наступанию на грунт непосредственно над грушей. Скорее всего, оно превысит 100...150 мм и излишки воды заполнят воронку на время воздействия силы. Минимальное значение составит примерно $h_{\min} = 50...70$ мм при наступании на край дорожки.

Остается сделать два шага к превращению ЧЭ в СО. Первый – преобразование изменения уровня жидкости h в электрический сигнал, второй – формирование сигнала срабатывания в случае превышения электрическим сигналом заданного порога.

На первом шаге возьмем две тонкие (диаметром 0,5...1 мм) проволоочки из титана, нержавеющей стали или латуни. Длина каждой из них должна несколько превышать длину тонкой трубки. Вставим проволочки-электроды с помощью распорок сверху в тонкую трубку так, чтобы они заняли диаметрально противоположные точки внутри сечения трубки, а нижний край проволочек был выше начального уровня жидкости на $h_{\min} / 2 = 25...35$ мм.

Вот теперь нам пригодится тот факт, что мы не забыли посолить воду. Проводимость обычной сырой воды невелика, но она повышается с ростом концентрации соли. Для концентрации 1 г/л она составляет около $0,001 \text{ 1}/(\text{Ом}\times\text{см})$. Сопротивление между проволочками при погружении их на 1 см в раствор соли будет не более $R = (0,3 \text{ см}) / (0,001 \times (1 \text{ см}) \times (0,2 \text{ см})) = 1,5 \text{ кОм}$. Проводимость растворов в сильной степени зависит от их концентрации и температуры, а полное сопротивление – еще и от состояния электродов. Поэтому в качестве порогового значения следует принять сопротивление, равное 3...4 кОм.

В результате мы приходим к следующей несложной схеме БО (рис. 2.3.9). В исходном дежурном состоянии сопротивление между электродами велико, сигнал на выходе DD1.2 – высокого уровня, транзистор VT1 закрыт, сигнальная цепь разомкнута. В случае подхода человека к калитке уровень воды в тонкой трубке повышается, сопротивление между электродами уменьшается, и конденсатор C1 начинает разряжаться через резистор R2. Если электроды будут замкнуты в течение времени, превышающего $0,7R2C1 = 0,3$ с, сигнал

на выходе DD1.1 переходит в состояние высокого уровня. Конденсатор C1 служит для защиты от кратковременных импульсных помех. Сигнал высокого уровня на выходе DD1.1 быстро заряжает конденсатор C2 через цепь VD1, R4. После возврата сигнала на выходе DD1.1 в состояние низкого уровня конденсатор C2 разряжается через резистор R3. За счет этого импульс низкого уровня на выходе DD1.2 имеет длительность не менее $0,7C2R3 = 3$ с. По данному сигналу открывается транзистор VT1, срабатывает реле K1 и его контактами 2 и 3 замыкается сигнальная линия. Используется реле типа РЭС49 паспорт РС4.569.421-01. Свободные входы микросхемы DD1 следует соединить с общим выводом.

Все элементы БО (рис. 2.3.9) размещаются на небольшой плате внутри коробки, находящейся на заборе рядом с тонкой трубкой ЧЭ. К БО подходит четырехпроводная линия. По двум проводам подается напряжение питания +10...15 В, по двум другим – снимается сигнал замыкания линии. Эти провода управляют включением небольшого звонка-пищалки, установленного на кухне садового домика. Там же располагается источник питания СО и звонка. Его звук предупреждает о появлении людей вблизи от калитки. Выглянув в окно, можно увидеть, кто это, и соответствующим образом подготовиться к приходу гостей.

Стабильной работе устройства будут способствовать дополнительные рекомендации:

- следует устанавливать уровень воды примерно на 1,5 м выше закопанной груши; в рабочем органе должно быть постоянное избыточное давление;
- надеть на грушу и подземную часть кембрика тонкую латунную сетку; она защитит нежную податливую оболочку от острых зубов хищных подземных жителей;
- капнуть сверху в тонкую прозрачную трубку несколько капель растительного масла; вода из датчика почти не будет испаряться в атмосферу;
- если имеется вероятность замерзания жидкости, заменить воду тосолом или водкой (надо-то всего стакан) с соответствующей корректировкой входной цепи БО;
- насыпать под грушу слой песка (дренаж).

Когда вода покрывает электроды, через нее протекает ток 1...4 мА, который вызывает электролиз воды. Факт электролиза неприятен не потерей воды – за год ее разложится не больше капли – и не разрушением электродов – нержавейка прослужит не один год, – а возможностью поляризации электродов. Появление на их поверхности потенциального барьера уменьшает проводимость ЧЭ. Вероятность поляризации с течением времени возрастает, так как

открытая поверхность воды поглощает примеси и загрязнения из воздуха. Еще один неприятный фактор – нестабильность электропроводности растворов, в связи с чем дат-

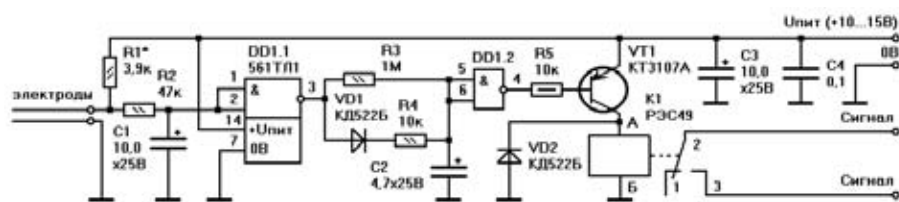


Рис. 2.3.9 БО точечного датчика давления

чик будет срабатывать при различных уровнях подъема жидкости.

Частично избавиться от недостатков контактного способа измерения уровня воды позволяет емкостной бесконтактный способ (рис. 2.3.10). Прикрепим на стеклянную трубку с внешним диаметром около 6 мм и внутренним диаметром 3 мм две пластинки из латунной фольги размером 7×50 мм. Эти пластинки образуют обкладки конденсатора. Они располагаются чуть выше начального уровня воды. При повышении уровня емкость конденсатора будет возрастать от единиц пикофард до десятков пикофард. Бесконтактный способ измерения дает более стабильный результат, да и воду солить уже не надо.

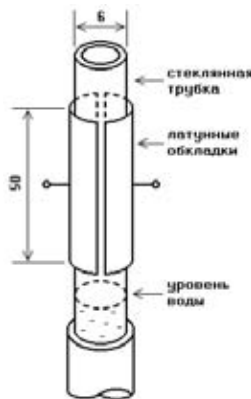


Рис. 2.3.10 Емкостной способ измерения уровня жидкости

Система с измерением давления жидкости по ее уровню проста, но не лишена недостатков. Основная их часть связана с тем, что измерительная система — открытая и не дифференциальная. В ней необходимо постоянно следить за начальным уровнем жидкости, при необходимости доливая или отбирая воду. Этот уровень может медленно дрейфовать в связи с изменением давления, просадкой грунта. Возможны ложные срабатывания от сотрясений земли или смещения начального уровня. К тому же торчащие наружу трубки снижают надежность СО из-за риска их случайного повреждения. В первые дни работы с измерителем уровня бывает интересно подходить к нему каждое утро, поить водой и топтать вокруг, наблюдая за радостными скачками жидкости. Но потом это надоедает и приходится задуматься о герметичной конструкции датчика, не требующей столь активного и

частого внимания. И тогда на смену измерителям уровня приходит рассмотренный ранее мембранный датчик.

Средний ПДД можно представить себе следующим образом: состав — два одинаковых шланга, включенных по дифференциальной схеме; длина участка — 2×100 м; ширина ЗО — 1 м; напряжение питания — 10...15 В; потребляемый ток — 10...20 мА. ПДД с четырьмя шлангами состоит из пары двухшланговых, располагаемых параллельно друг другу. Он обладает дополнительной способностью определения направления движения ОО по последовательности срабатывания каждой из пар.

Основные достоинства ПДД:

- высокая помехоустойчивость, благодаря большому отношению сигнал/шум; немногие силы, локально воздействующие на грунт, могут достигать величины веса человека;
- узкая ЗЧ, идущая вдоль шланга; ЧЭ можно укладывать вдоль многолюдных тротуаров;
- абсолютная маскируемость; ПДД относится к пассивным СО и никак не проявляет себя — ни визуально, ни путем каких-либо излучений; его не берет даже металлоискатель;
- произвольная линия рубежа; шланг может быть уложен вдоль забора или на открытой местности по прямой, ломаной или кривой линии любой необходимой формы.

Главные недостатки ПДД:

- ухудшение работоспособности при промерзании грунта; мерзлый грунт становится жестким и монолитным; он плохо передает давление и вибрирует всей массой;
- высокая трудоемкость монтажа; она складывается из рытья траншей, заполнения шлангов тосолом, освобождения их от воздуха — это вам не тормозную систему "Жигулей" прокатать;
- наличие ядовитой жидкости; ПДД дихлорэтана в воздухе равно 10 мг/м³, он опасен при попадании в организм через кожу; для коротких отрезков шланга можно заменить тосол более дорогими жидкостями: водкой (температура замерзания минус 30°С при крепости 40°) или водным раствором спирта-денатурата (температура замерзания минус 40°С при крепости 60°); спиртовые растворы, как и тосол, при замерзании образуют не монолит, а подобие каши, не способной повредить шланг.

2.4. Наклонометрические СО

Принцип действия наклонометрического СО основан на измерении угла наклона ЧЭ, жестко связанного с грунтом, дорожным полотном или полом помещения, относительно начального уровня. При появлении ОО грунт прогибается, измеряемый угол наклона изменяется на небольшую величину. В случае превышения за-

данного порогового значения угла формируется сигнал срабатывания.

Приборы для измерения малых углов отклонения от вертикали — наклономеры или наклонометры — широко используются в буровом деле как во время прохождения глубоких скважин, так и в период их эксплуата-

ции. В последнее время они устанавливаются в высотных домах для контроля осадки зданий и устойчивости грунта. Наклонометрия иногда именуется на иностранный манер инклинометрией.

Буровые штольневые наклонометры имеют измерительную систему маятникового типа. Ориентировочные значения основных технических характеристик буровых наклонометров: диапазон измерения угла наклона 100 угловых секунд; чувствительность по уровню помех 10^{-4} угловых секунд; масса до 10 кг; размер 0,3 м; потребляемая мощность 1 Вт. Маятник бурового наклонометра часто демпфируется для измерения медленных изменений угла наклона за время порядка сотен секунд, чтобы исключить воздействие помех от быстрых случайных сотрясений. В охранной сигнализации требуется отслеживать изменения за более короткие промежутки времени. Поэтому буровые наклонометры не могут использоваться в качестве чувствительного элемента СО непосредственно без соответствующих доработок.

На рисунке 2.4.1 представлена общая схема наклонометрического ЧЭ. Цилиндрический металлический груз массой M вместе с металлической нитью подвеса образуют вертикальный маятник. При наклоне корпуса груз перемещается относительно двух обкладок (электродов), неподвижно закрепленных на противоположных сторонах корпуса. В результате емкость маятника относительно одной из обкладок увеличивается, а относительно другой – уменьшается. Соответствующие емкости $C1$ и $C2$ преобразуются в сигналы двух частот $f1$ и $f2$ двумя идентичными LC-генераторами. После вычитания частот получаем на выходе сигнал с частотой, пропорциональной смещению груза. Применение разностной схемы измерения обеспечивает высокую стабильность выходного сигнала к изменению внешних условий, таких как температура, давление, напряжение питания, время. Подобный ЧЭ имеет следующие примерные параметры: масса груза 0,1 кг; величина зазора между грузом и обкладкой 1 мм; частота LC-генератора 10 МГц; крутизна преобразования (1...10) кГц/угл.сек. Описанный датчик чувствителен к наклонам только в одной вертикальной плоскости и имеет ЗО, вытянутую в соответствующем горизонтальном направлении. При необходимости формирования круговой зоны он может быть дополнен еще двумя обкладками, перпендикулярными к имеющимся.

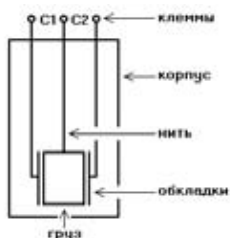


Рис. 2.4.1 Наклонометрический ЧЭ

Оценим параметры полезного сигнала с помощью следующей модели (рис. 2.4.2). Пусть на горизонтальной поверхности грунта (или другой подстилающей

поверхности) лежит вдоль оси Ox балка с жесткостью G . Ширина основания балки равна b . В точке с координатой $x=0$ на балку в вертикальном направлении действует сосредоточенная сила F . Модель рассматривается в предположении широко распространенной гипотезы Фусса-Винклера. Она заключается в том, что величина вертикального смещения (просадки) элемента поверхности грунта прямо пропорциональна действующему на данный элемент давлению. Коэффициент пропорциональности между давлением и смещением определяется экспериментально. Он называется коэффициентом жесткости или коэффициентом постели. Его величина k измеряется в единицах Па/м.

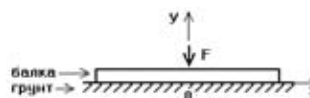


Рис. 2.4.2 Физическая модель образования сигналов для наклонометрического СО

В этом случае зависимость вертикального смещения балки y от координаты x и зависимость угла наклона балки θ от x описываются следующими уравнениями:

$$y = -F / (8\beta^3 \times G) \times \exp(-\beta x) \times (\cos(\beta x) + \sin(\beta x)),$$

$$\theta = F / (4\beta^2 \times G) \times \exp(-\beta x) \times \sin(\beta x),$$

где $\beta = (kb / (4G))^{1/4}$, $G = E \times J$, E – модуль упругости материала балки, Па, J – момент инерции поперечного сечения балки относительно центральной оси, m^4 , x – координата точки, в которой измеряется вертикальное смещение балки y и угол наклона θ .

Данные уравнения справедливы при любой длине балки и при расстояниях от края балки не менее $4,5/\beta$. Из них видно, что угол наклона максимален на расстоянии $x_{max} = \pi / (4\beta)$ от точки воздействия силы F и имеет значение $\theta_{max} = F / (4\beta^2 \times G) \times 0,32$. Размер ЗО примерно равен $(\pi / (2\beta))$. Приведенные соотношения позволяют оценивать значения углов наклона датчика для различных видов воздействий, расстояний и других параметров модели.

Пример. Значения коэффициента жесткости k зависят от типа грунта (табл. 2.4.1). Они меняются в широких пределах. Если балка – это стандартный стальной рельс Р65 ($E = 2 \times 10^5$ МПа, $J = 0,36 \times 10^{-4}$ m^4 , $b = 0,15$ м), а воздействует на него сосредоточенная сила $F = 1,1 \times 10^5 / 24$ Н (одно из 24-х колес небольшого теплового), то на грунте средней жесткости ($k = 200$ МПа/м)

Таблица 2.4.1 Значения коэффициента жесткости k

Материал грунта	k , МПа/м
Свежий песок, мокрая глина	1...5
Слежавшийся песок, влажная глина	5...50
Плотный песок, гравий, сухая глина	50...100
Утрамбованный песчано-глинистый грунт	100...200
Известняк, мерзлый грунт	200...1000
Скальный грунт	1000...15000
Кирпич	4000...5000
Бетон, железобетон	8000...15000

получим: $\beta = (kb / (4G))^{1/4} = 1,0 \text{ м}^{-1}$; $x_{\max} = 0,79 \text{ м}$; $\theta_{\max} = 0,51 \times 10^{-4} = 11 \text{ угл.сек.}$ Угол наклона достаточно велик для его надежной регистрации датчиком.

Понятно, почему в качестве примера был выбран многотонный ОО. Аналогичные оценки для менее массивных объектов не будут столь же радужными. Из выражения для θ следует, что обнаружение ОО массой до 100 кг возможно на грунтах или подстилающих поверхностях с небольшим коэффициентом постели k в случае их покрытия слоем материала с малой жесткостью G . Тем не менее, наклономерические СО оказываются весьма полезны там, где необходимо охранять отдельные ценные предметы от снятия или кражи. Датчик наклона, закрепленный на картине, статуе, сейфе, колесе автомобиля (в последнем случае следует совместить направление максимума ЗЧ датчика с осью вращения колеса), прореагирует на любую попытку механического воздействия на выбранный предмет. Невозможно перемещать предмет без его продолжительного наклона. Селекция сигнала по длительности определяет высокую помехоустойчивость СО.

Блок-схема наклономерического СО приведена на рис.2.4.3. В ее состав входят два LC-генератора, определитель разности частот, преобразователь частоты в напряжение, ПФ, К и РТ. СО данного типа может

использоваться внутри помещений на полу из дерева или другого податливого материала с небольшой жесткостью.



Рис. 2.4.3 Блок-схема наклономерического СО

Наклономерическое СО обладает потенциально высокой помехоустойчивостью, ввиду отсутствия нежелательных воздействий, способных привести к наклону, сравнимому с наклоном от воздействия ОО. Тем не менее, СО данного вида имеет ряд существенных недостатков:

- громоздкий ЧЭ (для высокоточных измерений);
- необходимость тщательной начальной юстировки;
- малый размер зоны обнаружения;
- повышенная восприимчивость к ударам;
- снижение помехоустойчивости при уменьшении веса ОО;
- большой диапазон амплитуд сигналов при установке на грунтах с различной жесткостью.

2.5. Вибрационные СО

Вибрационные СО формируют сигнал срабатывания за счет измерения и анализа колебаний или вибрации различных предметов. Разнообразные действия человека вызывают удары, смещения, сотрясения от механического инструмента, ножовки, дрели, зубила. ЧЭ вибрационных СО устанавливаются на предметах и препятствиях, которые входят в механический контакт с нарушителем: заборах и оградах, решетках и люках, стенах и перегородках, сейфах и стеллажах. Также возможна установка вибрационных СО в грунте на небольшой глубине в качестве противоподкопных средств. ЧЭ вибрационного СО может измерять амплитуду, скорость или ускорение колебаний, которые называются соответственно вибросмещением, виброскоростью и виброускорением. Обычно датчик реагирует на вибрацию в определенном направлении — горизонтальном поперечном, горизонтальном продольном или вертикальном. Трехкоординатные датчики состоят из трех независимых ЧЭ. Они регистрируют колебания в любом направлении.

Вибрационные СО называются также микрофонными извещателями, микрофонными кабельными извещателями, вибрационными периметральными системами охраны, периметральными инфраакустическими датчиками, датчиками вибрации или датчиками колебаний. Воспринимающий вибрацию ЧЭ может иметь различное исполнение. Вариантов и модифика-

ций существует много, но в основном используется шесть: контактные, пьезоэлектрические, аналоговые, трибоэлектрические, электретные и оптоволоконные. Первые три являются преимущественно точечными СО, последние три — линейными. Хотя, что есть линия, как не множество точек, а точка — часть линии? Точечные ЧЭ легко объединяются в линейное СО, а от длинного ЧЭ всегда можно отрезать небольшой кусочек для охраны отдельного предмета.

Наиболее просто устроен ЧЭ вибрационного контактного СО. В нем имеются подвижные электрические контакты, обычно находящиеся в нормальнозамкнутом состоянии. Под действием вибрации контакты периодически размыкаются. Факт размыкания регистрируется с помощью блока обработки сигналов.

Пьезоэлектрическое вибрационное СО использует в качестве датчика пьезоэлемент. Он генерирует заряд при воздействии на него силы. Преобразовать виброускорение в силу позволяет инертная масса, прикрепляемая к пьезоэлементу.

ЧЭ вибрационного аналогового СО измеряет интенсивность вибрации с помощью микрофона или подобного преобразователя. На его выходе генерируется аналоговый сигнал, величина которого пропорциональна вибросмещению, виброскорости или виброускорению. БО анализирует аналоговый сигнал и определяет интенсивность воздействия. Если она превышает

заданное пороговое значение, инициируется сигнал срабатывания.

Принцип действия трибоэлектрического СО основан на способности некоторых видов кабелей генерировать заряд в результате деформации кабеля. Кабель является своего рода протяженным микрофоном. Свойством преобразования деформации в электрический сигнал в той или иной степени обладает любой кабель, различна лишь величина чувствительности. Существует группа кабелей, проявляющих способность генерировать заряд в наибольшей степени.

В электретных СО применяется специальный коаксиальный электретный кабель. Он также обладает способностью генерировать заряд под действием деформаций. За счет особых условий изготовления кабеля его чувствительность и стабильность характеристик превосходят соответствующие показатели трибоэлектрических кабелей.

Датчиком вибрации оптоволоконного СО, как следует из названия, является обычный оптоволоконный кабель. Вообще применяемые в технике охранной сигнализации датчики часто заимствуются из других областей техники. ЧЭ, созданные специально для целей обнаружения, встречаются редко. При передаче света по оптоволокну его интенсивность слегка изменяется в случае деформации кабеля. Изменения крайне незначительны и в технике связи с ними борются всеми возможными силами, тем не менее, чувствительность методов измерения достаточна для надежной фиксации деформаций.

Еще один кабельный вибрационный ЧЭ — это магнитострикционный кабель. Он выпускается специально для использования в составе СО. Кабель состоит из магнитострикционного сердечника, вокруг которого спирально навита проволока. Сверху кабель покрыт защитной оболочкой. В результате вибрации магнитный момент сердечника меняется, и в обмотке наводится электродвижущая сила (ЭДС), которая регистрируется электронной схемой обработки сигналов.

Все вибрационные СО относятся к пассивным средствам. Они могут быть как внутренними, так и внешними. Внутренние являются преимущественно точечными и устанавливаются на охраняемых предметах. В основном это виброконтактные, вибрационные аналоговые (микрофонные) и пьезоэлектрические СО. Внешние — преимущественно линейные, они монтируются на полотне протяженных заборов различной конструкции, стенах или козырьках и воспринимают сотрясения ограждений. К ним относятся оптоволоконные, пьезоэлектрические, трибоэлектрические и электретные СО.

Оценим величину вибрации (в единицах амплитуды перемещения) от ОО и основных видов помех. Физическая модель обнаружения позволяет, не проводя утомительных измерений, определить потенциальные возможности вибрационного СО, его сильные и слабые стороны. Все основные оценки легко выводятся из законов механики, знакомых нам со школьной скамьи, и уравнений сопромата.

Основное место установки вибрационных СО — это забор. Он колеблется при попытке перелезть через не-

го или сломать. Но разные заборы по-разному воспринимают механические воздействия. Тонкая сетка прогнется, а массивный каменный — не шелохнется. Поэтому все заборы необходимо подразделить хотя бы на несколько типов. Чтобы не погрязнуть в анализе, выделим шесть основных: деревянные, стальные сетчатые, стальные решетчатые, стальные листовые, железобетонные и кирпичные. Все заборы характеризуются своей высотой H , длиной секции или панели L и толщиной B . Будем считать высоту $H = 2...3$ м, так как неразумно ставить сигнализацию, срабатывающую при контакте с забором, на ограждение, которое можно перепрыгнуть, не будучи даже Валерием Брумелем. Длина секции составляет $L = 1,5...4$ м. Секции монтируются на закопанные в землю вертикальные столбы. В качестве опор используются стандартные стальные трубы — либо круглые диаметром от 50 до 100 мм, либо квадратные размером 60×60 , 80×80 или 100×100 мм.

Деревянные заборы имеют наиболее простую конструкцию. Полотно забора набирается из досок толщиной 20...30 мм. Доски чаще всего располагаются вертикально и крепятся на горизонтальные брусья, образуя отдельные секции. Встречается также вариант крепления горизонтальных досок непосредственно на вертикальные опоры.

Стальные сетчатые заборы состоят из полотна, сплетенного из отдельных проволочных нитей. Они отличаются недорогой ценой и простотой установки. Сетка-рабица имеет размер ячейки $50 \times 50 \times 2$ мм, где последняя цифра обозначает диаметр проволоки. Сетка натягивается на стальную раму длиной $L = 2,5$ м и высотой $H = 2$ м. Ввиду небольшой массы секций они устанавливаются на легкие опоры — круглые диаметром 50 мм или квадратные 60×60 мм или даже 60×40 мм.

Стальные решетчатые заборы имеют более прочную конструкцию. Полотном забора является сварная решетка. Материалом решетки может служить либо стальная проволока диаметром около двух миллиметров, либо стальной пруток диаметром 4...5 мм, либо стальные квадратные трубы $20 \times 20 \times 1,5$, $40 \times 20 \times 2$, $40 \times 30 \times 2$ мм. Проволока образует небольшие ячейки $50 \times 50 \times 2$ мм, пруток или трубы — $50 \times 100...50 \times 200$ мм. Сечение столбов выбирается в зависимости от веса секций.

Стальные листовые заборы имеют в качестве полотна стальной оцинкованный лист, часто именуемый профнастилом. Толщина листа составляет 0,4...0,8 мм. Сам лист — обычно гофрированный, а иногда — покрытый пластиком.

Железобетонные заборы изготавливаются или из отдельных готовых панелей, или заливкой бетона в опалубку. Длина панелей или секций находится в пределах $L = 2...4$ м, а толщина полотна $B = 4,5...15$ см.

Кирпичные или каменные заборы наиболее массивны. Размеры стандартного кирпича составляют $250 \times 120 \times 65$ мм, а толщина самого забора (при высоте более двух метров) — $B = 0,25...0,5$ м. Каменные заборы встречаются редко, их толщина примерно та же — $B = 0,3...0,4$ м.

Таблица 2.5.1 Параметры заборов

Тип забора	Н, м	L, м	B, м	E, Па	ρ , кг/м ³	M _L , кг/м
Деревянный	2...3	2...3	0,02...0,03	$0,11 \times 10^{11}$	$(0,4...0,6) \times 10^3$	16...54
Стальной сетчатый	2	2...3	-	$2,1 \times 10^{11}$	$7,8 \times 10^3$	12...33
Стальной решетчатый	2...3	2...3	-	$2,1 \times 10^{11}$	$7,8 \times 10^3$	12...120
Стальной листовой	2...3	2...3	$(4...8) \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{11}$	$7,8 \times 10^3$	16...49
Железобетонный	2...3	2...4	0,045...0,15	$0,2 \times 10^{11}$	$2,2 \times 10^3$	200...1000
Кирпичный	2...3	-	0,25...0,5	$0,03 \times 10^{11}$	$(1,6...1,9) \times 10^3$	900...2600

Приведенные данные позволяют заполнить таблицу 2.5.1, которая понадобится для оценки и сравнения механических свойств различных заборов. В таблице приведены примерные диапазоны изменения высоты забора Н, длины секции L, толщины В; средние значения модуля упругости E и плотности ρ материала забора, а также значения погонной массы забора M_L, то есть массы одного метра, вычисляемой по очевидной формуле $M_L = \rho \times H \times V + M_{CT}$, где M_{CT} – масса столбов или опор (также на единицу длины, но, естественно, без учета их подземной части). Размеры поперечного сечения столбов выбираются пропорционально возлагаемой на них нагрузке.

Заборы могут устанавливаться как непосредственно на землю, так и на железобетонные, кирпичные или каменные цоколи. Цоколи имеют высоту 0,4...0,8 м, именно на эту величину следует уменьшать значение Н при оценках параметров вибрации цокольных заборов. Полотно забора обычно опирается на столбы, но возможна и полная заделка полотна забора в грунт или в цоколь. Данная мера осложняет проведение подкопа под забор и препятствует подъему полотна забора с помощью рычага. Ввиду того, что жесткость опор значительно превышает жесткость полотна забора, механические свойства забора при заделке полотна меняются незначительно. Поверху забора может проходить колючая проволока, колючая лента или спираль Бруно. Их вес мал по сравнению с весом полотна и почти не отражается на механических свойствах заборов. К слову, масса самого тяжелого забора отличается от массы самого легкого более чем в 100 раз; можно предположить, что и остальные их параметры расходятся значительно.

Перейдем к оценке вибрационных свойств заборов. Прежде всего, определим перемещения при воздействии статической силы F. С точки зрения сопромата забор – это консольная балка, неподвижно закрепленная с одной стороны (рис. 2.5.1). В данном случае Н – это полная высота забора и координата точки приложения силы F. Под действием этой силы балка изгибается. Дифференциальное уравнение изогнутой балки $y''(x) = M_x / (EJ)$, где $y(x)$ – смещение от начального положения точки балки с координатой x, M_x – изгибающий момент, E – модуль упругости материала балки, J – осевой момент инерции поперечного сечения балки. Для простой балки $y''(x) = (FH - Fx) / (EJ)$. Интегрируя данное выражение при начальных условиях $y(0) = 0$ и $y'(0) = 0$, получаем зависимость смещения точек балки высоты $y(x) = Fx^2(3H - x) / (6EJ)$. Смещение самой высокой точки составит $y(H) = (FH^3) / (3EJ)$.

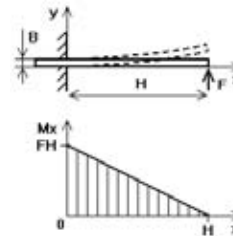


Рис. 2.5.1 Изгиб балки

Из полученных формул следует ряд важных выводов:

- выражение для смещения (то есть амплитуды колебаний) является точным и справедливо всегда в случае медленно меняющейся силы, то есть когда время изменения силы превосходит величину $1/\omega$, где ω – частота собственных колебаний забора;
- величина смещения в сильной степени зависит от высоты Н, поэтому целесообразно фиксировать только воздействия на верхнюю половину забора и в верхней же половине размещать датчики вибрации; при этом амплитуда колебаний будет составлять не менее 1/8 от максимального значения для полной высоты забора Н;
- жесткость забора K, равная коэффициенту пропорциональности между силой F и смещением y, составляет $K = 3EJ / H^3$; если бы балка была невесомой, а на ее конце находилась сосредоточенная масса m, то круговая частота собственных колебаний составила бы $\omega = (K / m)^{1/2}$; для равномерно распределенной массы балки M в формуле будет фигурировать эквивалентная масса (0,236M) и значение собственной частоты будет несколько выше $\omega = (K / 0,236M)^{1/2}$ или $\omega = (3EJ / (0,236MH^3))^{1/2}$.

Кирпичный или железобетонный забор в первом приближении может быть представлен как прямоугольная балка (рис. 2.5.2). Для нее момент инерции $J = LB^3 / 12$, $M = \rho VLN$, и следовательно $\omega = (B / 2H^2) \times (E / 0,236\rho)^{1/2}$.

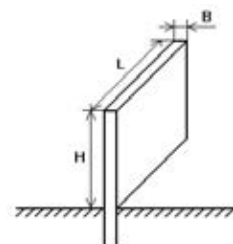


Рис. 2.5.2 Прямоугольная балка

Когда к прямоугольному полотну забора добавляются столбы-опоры, то возрастает не только его масса, стоящая в знаменателе выражения для ω , но и жесткость (EJ), стоящая в числителе. Причем, как массы, так и жесткости отдельных составляющих элементов просто суммируются.

Оценим моменты инерции опор. Толщина стенки стандартной трубы Q составляет около одной десятой от ее поперечного размера. Поэтому для квадратной трубы типоразмера $A \times A$ момент инерции $J = A^4 / 12 - (A - 2Q)^4 / 12 = A^4 \times 0,049$. Момент инерции круглой трубы диаметром D равен $J = \pi D^4 / 64 - \pi(D - 2Q)^4 / 64 = D^4 \times 0,029$. Упомянутая ранее квадратная труба 60×60 мм имеет момент инерции $J_{60} = 56 \times 10^{-8} \text{ м}^4$, размером 80×80 мм — $J_{80} = 200 \times 10^{-8} \text{ м}^4$, размером 100×100 мм — $J_{100} = 490 \times 10^{-8} \text{ м}^4$. Круглая труба диаметром 50 мм имеет момент инерции $J_{D50} = 18 \times 10^{-8} \text{ м}^4$, диаметром 100 мм — $J_{D100} = 290 \times 10^{-8} \text{ м}^4$.

Теперь имеющихся данных достаточно, чтобы вычислить значения жесткостей различных заборов (вместе с опорами) и частот их собственных колебаний (табл. 2.5.2). Кроме круговых частот собственных колебаний ω , в таблице представлены соответствующие частоты f в герцах $f = \omega / 2\pi$. Несмотря на большое разнообразие типов заборов, разброс частот собственных колебаний не так велик, как этого можно было бы ожидать — всего лишь в 20 раз. Данный феномен имеет простое объяснение: для устойчивости забора его жесткость K должна возрастать пропорционально массе M .

Таблица 2.5.2 Механические свойства заборов

Тип забора	ω , 1/с	f , Гц	K_A , м/Н
Деревянный	10...210	1,6...34	$(0,3...90) \times 10^{-6}$
Стальной сетчатый	14...75	2,3...12	$(3...200) \times 10^{-6}$
Стальной решетчатый	30...200	4,8...31	$(0,3...80) \times 10^{-6}$
Стальной листовой	50...140	7,6...23	$(0,3...80) \times 10^{-6}$
Железобетонный	16...120	2,5...19	$(0,02...20) \times 10^{-6}$
Кирпичный	40...170	6...27	$(0,004...0,9) \times 10^{-6}$

Под действием сил различного характера забор испытывает вынужденные колебания. Каждое колебание состоит из двух фаз (рис. 2.5.3). В первой фазе продолжительностью T_1 на забор активно воздействует сила $F(t)$. В этой фазе амплитуда колебаний $A(t)$ повторяет зависимость $F(t)$ в соответствии с найденным ранее соотношением $A = (FN^3) / (3EJ)$, правда при условии, что сама сила меняется не слишком быстро. Данное ограничение означает, что время изменения силы должно быть больше интервала, характеризующего собственные колебания, $1/\omega = 0,005...0,1$ с. Для полезных сигналов изменения силы можно считать медленными. Если продолжительность действия силы $T_1 < 1/\omega$, то фаза 1 может отсутствовать, так как сила не успеет произвести смещение. Значения приведенной амплитуды колебаний K_A (то есть амплитуды в расчете на единичную силу $K_A = A / F$), полученные расчетным путем, записаны в четвертом столбце таблицы 2.5.2. Они характеризуют первую фазу колебаний.

Во второй фазе действие силы прекращается и забор совершает свободные затухающие колебания с

собственной частотой ω по закону $A(t) = A \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \phi)$. Если коэффициент затухания β меньше ω , то в колебаниях наблюдается несколько периодов со спадающей амплитудой. Если же β превосходит ω , то колебания затухают быстрее окончания первого периода и становятся аperiodическими. Колебания во второй фазе определяются конструкцией ограждения, они не несут информации о характере воздействия $F(t)$. Известно, что добротность $Q = \omega / 2\beta$ металлических конструкций (без применения специальных усилителей, только за счет внутреннего трения в металлах) составляет $Q = 8...12$. Следовательно, для металлических заборов можно считать коэффициент затухания равным $\beta = (0,04...0,06)\omega$, а во второй фазе будут наблюдаться до десяти колебательных периодов с убыванием амплитуды до уровня 0,05. Для деревянных, железобетонных или кирпичных заборов коэффициент затухания существенно выше, а затухающие колебания во второй фазе содержат не более двух-трех периодов.

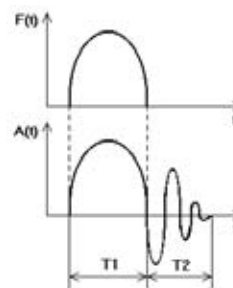


Рис. 2.5.3 Фазы колебаний

Все указанные в табл. 2.5.2 значения амплитуд колебаний забора относятся к его верхней половине. Предполагается, что датчики измерения вибрации устанавливаются выше одного метра. Воздействие силы F также считается приложенным к верхней половине полотна, где оно не только производит максимальный эффект, но и свидетельствует о явных намерениях преодолеть ограждение.

При необходимости оценки значений виброскорости или виброускорения это может быть сделано аналогично проведенным оценкам вибросмещения. Амплитудные параметры колебаний заборов до сих пор связывались с силой воздействия. Иногда оказывается легче оценивать их по энергии воздействия W . Тогда будут полезны очевидные соотношения $A = (2W / (0,236M))^{1/2} / \omega = (2W / K)^{1/2} = (2WN^3 / (3EJ))^{1/2}$.

Фактически в первом приближении были рассмотрены лишь одномерные колебания, причем на основной частоте, когда на балке наблюдается один узел и одна пучность (рис. 2.5.1). Они дают основной вклад в вибрацию, но не являются единственными. Вполне допустимы колебания на более высоких частотах по высоте забора и по его длине. Реальная заделка забора в землю не является абсолютно неподвижной. Снижение жесткости приводит к уменьшению собственных частот. Сетчатый забор состоит из множества отдельных независимых подвижных нитей, поэтому он отличается наличием повышенного уровня шума и мно-

жества различных собственных частот. Построенная физическая модель обнаружения не идеальна, но позволяет выявить основные закономерности для вибрационных СО.

Величина силы полезного воздействия F может меняться от 50 Н до 2000 Н (человек с грузом). Пользуясь таблицей 2.5.2, можно оценить вероятные значения амплитуд виброперемещения $A = K_A \times F$ (табл. 2.5.3) для различных типов заборов. Первый же взгляд на нее убеждает в сложности задачи обнаружения объектов производимой ими вибрации. Максимальная амплитуда 0,48 м отличается от минимальной $0,2 \times 10^{-6}$ м в 2400000 раз. Таблица 2.5.3 дает представление о диапазонах измеряемых величин. Наличие больших динамических диапазонов сигналов приводит к ограничению применения вибрационных СО заборами определенных типов.

Таблица 2.5.3 Диапазоны амплитуд полезных сигналов

Тип забора	A, м
Деревянный	$(16...170000) \times 10^{-6}$
Стальной сетчатый	$(140...480000) \times 10^{-6}$
Стальной решетчатый	$(17...150000) \times 10^{-6}$
Стальной листовой	$(17...150000) \times 10^{-6}$
Железобетонный	$(1,2...48000) \times 10^{-6}$
Кирпичный	$(0,2...1800) \times 10^{-6}$

Основные виды помеховых воздействий для вибрационных СО связаны с механическими воздействиями на ЧЭ. При работе на улице к ним относятся порывы ветра, случайные удары от прохожих, животные, птицы, колебания от проезжающего вблизи транспорта или от деревьев, работа строительных механизмов, раскаты грома, град, интенсивные осадки, а внутри помещений – различные бытовые приборы, производственные механизмы и тот же транспорт.

Оценим уровни сигналов от основных видов помех: ветра и ударов. Сила F давления ветра на преграду с площадью поперечного сечения S равна $F = k\rho v^2 S$, где k – аэродинамический коэффициент, ρ – плотность воздуха ($\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$), v – скорость ветра. Значения аэродинамического коэффициента могут меняться от $k = 0,2$ (сетчатый или решетчатый забор) до $k = 2$ (сплошной забор при наихудшем расположении окружающих предметов). Будем считать скорость порывов ветра равной $v = (5...10) \text{ м/с}$, а его направление – перпендикулярным к полотну. Тогда сила ветра, действующая на верхнюю часть секции забора длиной 2,5 м и высотой (1...2) м, может меняться в пределах от $F_{\min} = 0,2 \times 1,3 \times 25 \times 2,5 \times 1 = 16 \text{ Н}$ до $F_{\max} = 2 \times 1,3 \times 100 \times 2,5 \times 2 = 1300 \text{ Н}$. Отсюда видно, что диапазоны изменения полезных и ветровых помеховых воздействий в значительной мере перекрываются. Длительности отдельных воздействий также могут совпадать.

Будем считать, что удар производится палкой, бутылкой, камнем, кирпичом. Скорость бутылки или небольшого камня (массой $m = 0,2 \text{ кг}$) достигает $v = 20 \text{ м/с}$, а энергия – $W = mv^2/2 = 40 \text{ Дж}$. Скорость кирпича ($m = 3,3 \text{ кг}$) – не более $v = 5 \text{ м/с}$, а энергия – $W = mv^2/2 = 40 \text{ Дж}$. Энергия тяжелого кирпича – та же, что и у более

легкой бутылки, – ведь бросает их одна и та же рука. Исходя из энергии удара, амплитуда колебаний среднего стального решетчатого забора будет равна $A = (2W/K)^{1/2} = (2WH^3/(3EJ))^{1/2} = (2 \times 40 \times 8 / (3 \times 3 \times 10^5))^{1/2} = 0,027 \text{ м}$. Измеряемые параметры довольно сильного удара попадают в диапазон полезных сигналов (табл. 2.5.3).

По своей интенсивности помеховые сигналы от значительных порывов ветра или ударов сравнимы с сигналами вибрации забора при перелазе человека. Это хуже, чем наличие явной разницы в силе воздействия, но лучше, чем измерения за пределами возможностей. Единичный удар не может служить достаточным основанием для активации срабатывания. Отличить полезный сигнал от помехового простыми средствами возможно разве что по продолжительности и периодичности воздействий. Вибрационный сигнал не несет в себе информации о точке приложения силы или направлении на ее источник. Факт перемещения источника снаружи забора вовнутрь остается «за кадром». Так что, применяя чисто вибрационные СО, придется смириться с определенной долей ложных срабатываний. Отчасти спасает ситуацию то, что большинство реальных вибрационных СО фиксирует не одну лишь вибрацию, но также и силовое воздействие на ЧЭ, его смещение или разрушение. Также используется накопление серии импульсов в течение длительного промежутка времени. Забор невозможно перепрыгнуть в одно касание; на его преодоление уходит не менее 10...20 секунд. В результате удается достигнуть приемлемых показателей сигнализационной надежности.

Пересечение множества полезных и помеховых сигналов усложняет алгоритм вибрационных СО (рис. 2.5.4). После усилителя $У$, фильтра Φ и компаратора $К$ необходим накопитель $Н$. Он предназначен для инициации сигнала тревоги только при появлении определенного количества отдельных импульсов (4...20) в течение заданного интервала времени (5...30 с). На металлических заборах может понадобиться детектор огибающей $ДО$. Дальнейшее улучшение сигнализационной надежности требует привлечения дополнительных информативных признаков. Сигналы с частотой собственных колебаний ω во второй фазе не несут информации о характере воздействия на забор, они должны по мере возможностей подавляться. Многообразие видов полезных и помеховых сигналов затрудняет изготовление вибрационных СО, а в случае сложной вибрационной обстановки (внутри города) – от них лучше вообще отказаться.



Рис. 2.5.4 Вибрационное СО

Усредненный портрет линейных вибрационных СО дают обеспечиваемые ими значения основных показателей. Длина охраняемого участка – 100...200 метров (оптоволоконные – до нескольких километров); вероятность обнаружения – около 0,95; наработка на ложное срабатывание – 10...500 часов; цена оборудования в расчете на один метр (без стоимости самого ограждения и монтажа) – от 6 до 30 долларов; рабочая температура

тура — от минус 40...50 °С до плюс 50...60 °С; напряжение питания — 10...30 В; потребляемый ток — 10...40 мА.

Главные достоинства вибрационных СО — это:

- низкая стоимость;
- простота установки; ЧЭ не нуждаются в юстировке или настройке;
- простота обслуживания; при правильной установке ЧЭ не требует периодической очистки или регулировки;
- узкая ЗО; невосприимчивость к воздействиям, не касающимся забора или охраняемого предмета;
- пассивный принцип действия;
- возможность установки на участках произвольной формы — прямолинейных, ломаных, криволинейных.

Основные недостатки вибрационных СО заключаются в следующем:

- невысокая помехоустойчивость для внешних СО;
- возможность пропуска нарушителя при отсутствии механического контакта;
- необходимость надежного крепления кабельного датчика к полотну забора.

Для разных типов заборов часто используются различные вибрационные СО или одно СО, но с разными настройками. На легкие сетчатые заборы устанавливается СО одной модификации, а на жесткие железобетонные — другой. Если забор легкий (масса человека сравнима с массой секции забора), то собственная частота его колебаний существенно уменьшается во время перелазы, и это можно использовать для надежного обнаружения постороннего человека на заборе. Для разных заборов отличаются и способы крепления ЧЭ. Вибрационные СО применяются не только в качестве охраны совместно с ограждениями, но также в качестве противопожарных СО, где кабельный ЧЭ закапывается на небольшую глубину в землю вблизи от забора, в качестве СО разрушения стен, вмуровывая кабельный ЧЭ внутрь перегородок, и в качестве точечных СО.

Точечные вибрационные СО представляют собой самостоятельную группу средств охранной сигнализации. В свою очередь, они делятся на две подгруппы: контактных датчиков разбивания стекла и вибрационных СО для охраны отдельных предметов.

Контактные датчики разбивания стекла (ДРС) называются также поверхностными ударно-контактными извещателями. В отличие от акустических ДРС они устанавливаются непосредственно на поверхность охраняемого стекла. В качестве ЧЭ обычно применяются недорогие компактные пьезоэлементы. ЧЭ вибрационного ДРС размещается в углу стекла на расстоянии нескольких сантиметров от рамы, где он не слишком бросается в глаза, но где амплитуда вибрации при разбивании достаточна для его надежного обнаружения. Один вибрационный ДРС может содержать до нескольких десятков пьезоэлектрических ЧЭ, подсоединенных параллельно к общему БО. Надеж-

ный контакт ЧЭ со стеклом обеспечивает жесткий термовлагодостойкий клей. Не следует забывать об установке на окно магнитоcontactного датчика, так как оно может быть открыто и без разбивания. Контактные вибрационные ДРС уступают акустическим по удобству монтажа и почти полностью вытеснены последними, хотя и имеют преимущества непосредственного контроля стекла.

Основная часть точечных вибрационных СО предназначена для охраны отдельных поверхностей: стен, перегородок, шкафов, сейфов. Их называют также поверхностными вибрационными извещателями. ЧЭ точечного вибрационного СО устанавливается на поверхность охраняемого объекта. В качестве ЧЭ могут использоваться микрофоны — электродинамические или электретные, геофоны, пьезоэлементы, отрезки чувствительного кабеля. Датчик вибрации служит для обнаружения различных попыток механического разрушения: перепиливания, высверливания, пробивания. Каждое из воздействий производит колебания в своем диапазоне частот и характеризуется определенной продолжительностью и периодичностью. Поэтому для реализации СО подойдет та же блок-схема с накоплением (рис. 2.5.4).

Точечное вибрационное СО в среднем выглядит следующим образом: тип ЧЭ — пьезоэлектрический или электродинамический; площадь стены, охраняемой одним датчиком, — 8...20 м²; напряжение питания — 10...30 В; потребляемый ток — 1...20 мА; минимальная рабочая температура — минус (10...40)°С; максимальная рабочая температура — плюс (50...60)°С; масса — 50...200 г; количество ЧЭ в составе одного СО — до 20; цена в расчете на один ЧЭ — 200...2000 рублей.

Интенсивность вибрации по мере распространения по стене или перегородке падает. Колебания от воздействий, близких к месту установки ЧЭ, имеет большую амплитуду, от удаленных — меньшую, постепенно падающую до уровня шумов. В углах и местах соединения элементов стены часть энергии отражается, а часть — теряется. Поэтому отдельный датчик имеет ЗЧ, ограниченную радиусом в несколько метров. По этой причине датчики размещаются по высоте посередине стены, где расстояние до произвольной точки стены минимально, а амплитуда колебаний максимальна. Вдоль стены датчики размещаются на расстоянии 2...3 м друг от друга. Отдельная дверь или окно оборудуется собственным датчиком. Наилучшее место установки — в центре охраняемой поверхности, наихудшее — в углах стен, так как там амплитуда колебаний минимальна. Необходимо учитывать все особенности стен (наличие окон, дверей, проемов), препятствующие свободному распространению вибрации. Монолитные стены хорошо проводят различные колебания, они обладают жесткостью, а СО на них эффективны. Стены из мягких материалов или небольших секций гасят колебания и мало приспособлены для использования точечных вибрационных СО.

Основные виды помех для точечных вибрационных СО — это вибрация от транспорта, станков, механизмов, лифтов, насосов, вентиляции, кондиционеров. При установке вибрационных СО на шкафах или сей-

фах снижению уровня внешних помех способствуют мягкие прокладки, подложенные под ножки.

Точечные вибрационные СО, несмотря на небольшие размеры ЗО, имеют ряд достоинств:

- простота установки; одна небольшая коробочка защищает всю площадь поверхности целой стены, окна или сейфа;
- СО не теряет работоспособности после разрушения стены, как например, электрообрывное СО с ЧЭ, вмурованным в стену;
- высокая помехоустойчивость при установке вне промзон;
- простота конструкции, высокая надежность и низкая стоимость — здесь одно следует из другого.

2.5.1 Виброконтактные СО

Из всего многообразия вибрационных СО наиболее простыми являются виброконтактные. Они называются также вибрационными электроконтактными извещателями. Их ЧЭ содержит инертную массу, воспринимающую внешние механические воздействия. Он преобразует колебания в замыкание и размыкание электрических контактов. Датчик может закрепляться на любой охраняемый предмет: сейф, шкаф, полотно забора, стену или перегородку. В случае установки на оконное стекло СО сигнализирует о его разбивании. Тогда оно может носить название ударно-контактного или удароконтактного извещателя. Собственно ЧЭ закрепляется на контролируемый объект с помощью винтов, клея или магнита.

Виброконтактное СО представляет собой механическую систему в состоянии слабой устойчивости. СО является точечным и имеет небольшой радиус ЗО, редко превосходящий 2...3 метра. При установке на забор точечные датчики могут объединяться в одну протяженную линию путем последовательного соединения нормальнозамкнутых датчиков или параллельного соединения нормальноразомкнутых. Устанавливая их на расстоянии 2...3 м, длина гирлянды наращивается до 100...150 м.

ЧЭ виброконтактных СО бывают четырех основных типов:

- герконовые; они используют герконы определенных типов, например, массивные ртутные, наиболее восприимчивые к вибрации, в частности, типа МКАР-15101 или МКДР-45281;
- шариковые; они состоят из небольшого металлического незакрепленного шарика, который свободно покоится в центре горизонтальной опоры, имеющей форму кольца; металлическое кольцо разрезано на два или три одинаковых сектора, изолированных друг от друга; в исходном состоянии все сектора замкнуты через шарик, во время вибрации происходит кратковременное размыкание отдельных секторов; чувствительность датчика повышается с увеличением отношения диаметра шарика к диаметру кольца;
- ртутные; капля ртути, находящаяся на дне стеклянной ампулы, замыкает нижний центральный контакт с рядом радиальных верхних контактов, едва касающихся капли; любое сотрясение капли или наклон ампулы сопровождаются размыканием центрального контакта и одного из радиальных;
- пружинные; здесь небольшой металлический груз закреплен на пластинчатой или спиральной пружине; он едва касается точечного контакта; при сотрясениях электрическая цепь «пружина-груз-контакт» кратковременно размыкается; форма и расположение контактов определяют чувствительность датчика к вибрации в различных направлениях.

ЧЭ виброконтактного СО обычно нормальнозамкнутый. Собрав датчик из шарика, покоящегося на трех контактах, установим его на дачный забор. Перелез человек будет сопровождаться многочисленными частыми колебаниями забора из стороны в сторону и серией коротких импульсов размыкания. Длительность отдельного импульса — 0,001...0,005 с. При воздействии ветра — основного вида помех — забор отклоняется от положения равновесия, возвращаясь затем назад.

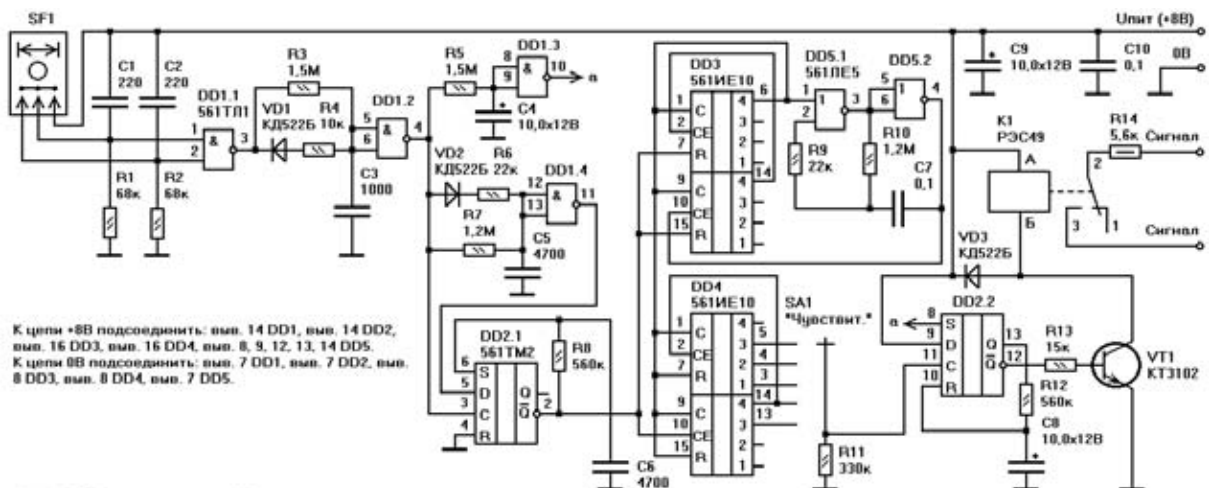


Рис. 2.5.5 Виброконтактное СО

Импульсы будут иметь в основном более значительную длительность.

Исходя из этого, алгоритм обнаружения должен состоять из следующих операций: селекция импульсов по длительности, накопление импульсов заданной длительности и формирование сигнала тревоги. Схема, реализующая данный алгоритм, приведена на рис. 2.5.5. Чувствительный элемент SF1 – шариковый, на трех проводящих опорах. Он воспринимает горизонтальную вибрацию независимо от ее направления; данная особенность обеспечивает удобство установки ЧЭ, который не надо определенным образом ориентировать по отношению к полотну забора (но нужно сохранять его вертикальность). Датчик содержит ограничители, не позволяющие ему скатиться с опор, что отмечается на схеме SF1 черточками, в которые упираются стрелки, обозначающие чувствительность к вибрации.

В дежурном режиме при отсутствии колебаний все три контакта датчика замкнуты через шарик, а на выходе DD1.1 – сигнал низкого уровня. Любое смещение шарика от положения равновесия приводит к размыканию одного из трех контактов от двух других, а следовательно, к появлению положительного импульса на выходе DD1.1. Элементы R3, VD1, R4, C3, DD1.2 блокируют прохождение импульсов короче $0,7R3C3 = 0,001$ с. Более длительные сигналы поступают на выход DD1.2 в виде импульсов отрицательной полярности, при этом они укорачиваются на $0,001$ с, а их спад имеет качество цифрового сигнала. Элементы VD2, R6, R7, C5, DD1.4 селектируют импульсы по верхней границе длительности ($0,005$ с); сигнал низкого уровня на выходе DD1.4 свидетельствует о том, что входной импульс короче $0,005$ с, высокого, – что он длиннее. Элементы DD2.1, R8, C6 вырабатывают счетные импульсы положительной полярности, каждый из которых формируется в ответ на появление входного импульса строго в пределах от $0,001$ до $0,005$ с. Счетный импульс имеет фиксированную длительность, равную $0,7R8C6 = 0,002$ с. Накопление заданного числа счетных импульсов за установленный промежуток времени позволяет активировать сигнал тревоги.

Особенностью алгоритма является наличие цепи, формирующей сигнал тревоги в случае длительного наклона датчика (или его повреждения). Она состоит из элементов R5, C4, DD1.3. В дежурном режиме на выходе DD1.3 постоянно присутствует сигнал низкого уровня. Однако, если шарик скатывается с одной из опор более чем на $0,7R5C4 = 10$ с и не возвращается в исходное устойчивое состояние, то конденсатор C4 разряжается через резистор R5 и на выходе DD1.3 возникает сигнал высокого уровня. Наличие данного сигнала может быть вызвано разрушением забора, повреждением или снятием датчика, но в любом случае по нему следует активировать срабатывание.

Счетные импульсы поступают на входы счетчиков DD3 и DD4. Первый из них совместно с DD5.1, DD5.2, R9, R10, C7 задает временной интервал продолжительностью 20 с, считая от последнего счетного импульса. В исходном состоянии на выходе 6 микросхемы DD3 присутствует сигнал высокого уровня. Он блокирует рабо-

ту генератора на элементах DD5.1, DD5.2, R9, R10, C7 и счетчика импульсов на DD4. Положительный импульс с выхода DD2.1 сбрасывает счетчик DD3, сигнал на его выводе 6 переходит в состояние низкого уровня. В результате запускается генератор импульсов с периодом $1,4R10C7 = 0,17$ с. Сигнал на выводе 6 DD3 будет оставаться в состоянии низкого уровня до тех пор, пока счетчик DD3 не насчитает 128 периодов, то есть примерно в течение 20 с. При этом каждый последующий счетный импульс заставляет вести отсчет времени с нуля.

Сигнал низкого уровня на выводе 6 DD3 задает 20-секундное (или более продолжительное) окно для счетчика DD4, определяющего число счетных импульсов. После прихода четырех импульсов сигнал высокого уровня появится на его выводе 13, после восьми – на выводе 14, после шестнадцати – на выводе 3, после тридцати двух – на выводе 4, после шестидесяти четырех – на выводе 5. Переключатель SA1 устанавливает требуемую чувствительность СО, меняя количество импульсов, подсчитываемых в течение двадцатисекундного интервала.

В исходном дежурном состоянии на выводе 13 D-триггера DD2.2 логический сигнал 0, на выводе 12 – 1, транзистор VT1 открыт, контакты 2 и 3 реле K1 замкнуты. После прихода заданного количества счетных импульсов триггер меняет состояние на противоположное, транзистор закрывается, обмотка реле обесточивается, а сигнальная цепь обрывается. Одновременно начинается зарядка конденсатора C8 через резистор R12. Они задают время выдержки сигнала тревоги, равное $0,7R12C8 = 4$ с. В случае продолжительного наклона датчика сигнал тревоги формируется в течение всего времени наклона через вход S триггера DD2.2. При пропадании питания сигнал тревоги также будет формироваться непрерывно. Приведенная схема (рис. 2.5.5) позволяет легко адаптировать параметры алгоритма (длительности, количество импульсов) под конкретную конструкцию датчика, жесткость забора и внешние условия.

СО с шариковым ЧЭ не обладает высокой надежностью, так как открытые электрические контакты со временем окисляются, засаливаются и теряют проводимость. К тому же, если одно СО объединяет много ЧЭ (как, например, на заборе), то накопление не дает результатов. Импульс размыкания поступает не от одного ЧЭ, то от другого. Редкие вздрагивания различных участков забора приводят к ложным срабатываниям СО и суммарная помехоустойчивость оказывается невысокой.

2.5.2. Пьезоэлектрические СО

Пьезоэлемент представляет собой небольшой кристалл кварца. Он преобразует воздействующую на него силу F в пропорциональную величину заряда $Q = dF$. Коэффициент пропорциональности d называется пьезоэлектрическим модулем, для кварца он равен $d = 2,31$ пКл/Н. Кварц – не единственный материал для

изготовления пьезоэлементов. Различные виды пьезо-керамики обладают более высоким пьезомодулем $d = 40...220$ пКл/Н. Пьезоэффект обратим: подача на пьезоэлемент заряда вызывает его сжатие или расширение в зависимости от знака заряда. Пьезокерамика идет на изготовление излучателей звука и ультразвука, различных «пищалок» и сирен, а также датчиков силы, ускорения и вибрации. Любой излучатель можно превратить в более или менее приличный датчик, а датчик — заставить пищать. Пьезоэлементы, благодаря их монолитной конструкции, отличаются низкой стоимостью и высокой надежностью.

СО на основе пьезоэлементов идут на охрану стен, сейфов, отдельных предметов, дверей, оконного стекла от разбивания, ударного воздействия или механического разрушения. Пьезоэлектрический датчик является точечным с небольшой ЗО, хотя существует и линейный, выпускаемый специально для целей охранной сигнализации чувствительный пьезокабель — коаксиальный кабель, в котором на центральную жилу нанизаны бусины из радиально-чувствительной пьезокерамики.

Типичный пьезодатчик состоит из инерционной массы, закрепленной на основании через пьезоэлемент (рис. 2.5.6). При вертикальных колебаниях основания с амплитудой виброускорения A_w на пьезоэлемент со стороны массы m действует сила $F = mA_w$. Сигнал (в вольтах) на выходе пьезоэлемента пропорционален заряду $U = Q/C = dmA_w/C$, где C — емкость пьезоэлемента. Средняя чувствительность пьезодатчика (для $d = 60$ пКл/Н, $m = 30$ г, $C = 1000$ пФ) равна $K_{\Pi} = U/A_w = dm/C = 60 \times 10^{-12} \times 0,03 / (1000 \times 10^{-12}) = 2$ мВ/(м/с²), то есть при ускорении вибрации 1 м/с² (одна десятая от ускорения свободного падения $g = 9,8$ м/с²) сигнал на выходе датчика составит 2 мВ. Для увеличения чувствительности датчики могут оснащаться встроенными усилителями, требующими внешнего питания. Хотя основная цель встроенного усилителя — избавиться от влияния зарядов, формируемых в соединительных кабелях при их деформации.

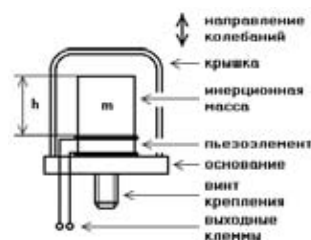


Рис. 2.5.6 Пьезодатчик

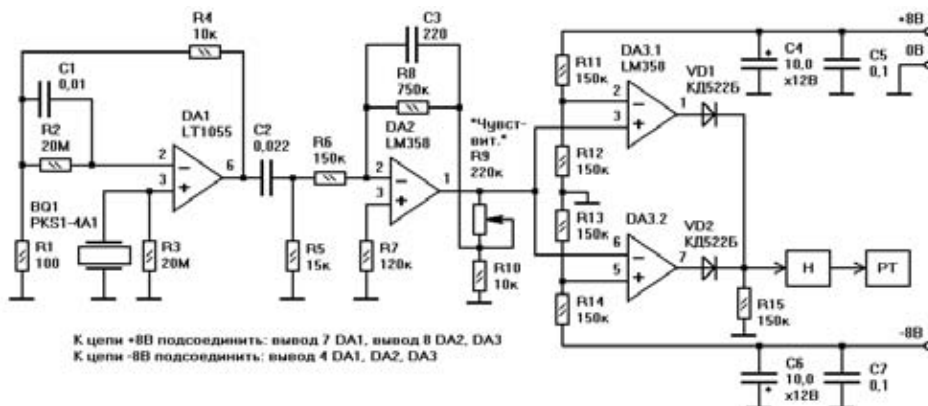


Рис. 2.5.7 Пьезоэлектрическое вибрационное СО

Варьируя параметры пьезодатчика, можно менять его чувствительность в пределах от 0,001 до 1000 пКл/(м/с²), диапазон измерения — $10^{-5}...10^6$ м/с², собственную частоту — до 200 кГц. Устройство пьезодатчика настолько простое, что не составит труда сделать его самому. Так же просто пойти в магазин и купить готовый. Параметры подходящих пьезодатчиков высокой чувствительности приведены в таблице 2.5.4.

Наличие встроенного усилителя удорожает датчик и усложняет его применение. Сконструируем вибрационное СО разрушения стены, перегородки или стекла из компактного и недорогого датчика PKS1-4A1 стоимостью 300 рублей (табл. 2.5.4). Схема вибрационного СО показана на рис. 2.5.7.

Усилитель напряжения на ОУ DA1 усиливает сигнал с выхода датчика BQ1 в $R4/R1 = 100$ раз. Пьезоэлементы отличаются большим выходным сопротивлением. Поэтому и входное сопротивление DA1 должно быть высоким, то есть на входе ОУ должны стоять полевые транзисторы. Например, можно использовать LT1055, TL072, TL082. Усиленный сигнал подвергает-

Таблица 2.5.4 Пьезодатчики высокой чувствительности

Название	Диапазон ускорений, м/с ²	Чувствительность, мВ/(м/с ²)	Диапазон частот, Гц	Напряжение питания, В	Собственный шум	Размеры, мм
MMA2260D (Freescale)	До 15	120	0...50	5	3,5 мВ	11×11×3,5
CXL01LF1 (Crossbow)	До 10	200	0...50	5	0,0007 м/(с ² (Гц) ^{1/2})	45×27×20
AP2050 (Глобал Тест)	До 8	60	0,5...5000	18...30	0,0002 м/с ²	d24×33
AP99 (Глобал Тест)	До 10	50	0,5...5000	18...30	0,0002 м/с ²	d21×26
ОДУ (Элпа)	$10^{-5}...10$	120	1...100	5	0,01 мВ	80×12×8
PKS1-4A1 (Murata)	До 10	4,1	10...1000	нет		d24×4,5
PKS1-4A10 (Murata)	До 10	4,1	10...1000	нет		d24×4,5
ADXL105 (Analog Devices)	0,02...50	20	До 10000	2,7...5	0,002 м/(с ² (Гц) ^{1/2})	11×11×3,5

ся полосовой фильтрации от нижней частоты $f_n = 1/(2\pi R5C2) = 0,1$ кГц до верхней частоты $f_v = 1/(2\pi R8C3) = 3$ кГц и дальнейшему усилению в $(R8/R6) \times (1+R9/R10) = (5...100)$ раз. Регулировка коэффициента усиления с помощью переменного резистора R9 позволяет менять чувствительность СО.

В качестве пояснения оценим продолжительность удара $T_{уд}$. Для этого воспользуемся соотношением $T_{уд} = 2S/v$, где S — путь до остановки предмета, имеющего начальную скорость v . Примерные значения параметров $S = 0,002...0,05$ м (последнее значение относится к стеклу), $v = 4...20$ м/с (более медленный удар бесполезен, более быстрый невозможно произвести рукой) дают величину $T_{уд} = 0,0002...0,025$ с. Полосу фильтрации определяем по сигналам минимальной длительности $f = (0,016...1,6)/0,0002 = 80...8000$ Гц. Применяя в схеме не слишком резкие фильтры первого порядка, и ориентируясь на жесткие материалы, устанавливаем границы фильтрации от 100 Гц до 3000 Гц.

Усиленный сигнал поступает с выхода DA2 на двухпороговый компаратор, выполненный на ОУ DA3. Делитель напряжения на резисторах R11, R12, R13, R14 задает два пороговых напряжения: +4 В и -4 В. Сигнал на выходе 1 DA2 в среднем равен нулю. Он прямо пропорционален ускорению, испытываемому пьезодатчиком BQ1. В случае малых виброускорений, напряжение на R15 составляет 0 В. Если ускорение превышает некоторое значение, то входной сигнал компаратора станет больше 4 В, напряжение на выходе DA3.1 — +8 В, на резисторе R15 — положительный импульс. Такой же импульс наблюдается и в случае отрицательного ускорения достаточной величины — через ОУ DA3.2.

Здесь следует подвести баланс полезных воздействий и сигналов — от ЧЭ до выхода компаратора. Ускорение торможения в точке удара оценивается величиной $a = v^2/2S = (160...100000)$ м/с². Минимальные значения ускорений относятся к стеклу, максимальные — к кирпичным и железобетонным стенам. Масса окна (10...20 кг) превосходит массу камня в $I = 50...200$ раз, масса сейфа (50...200 кг) превышает массу инструмента взлома в $I = 25...400$ раз, масса перегородки или капитальной стены — в $I = 50...1000$ раз. Соответственно и средняя амплитуда колебаний охраняемого предмета будет меньше приведенной величины a в I раз. Виброускорение в точке измерения A_w будет еще в $K = 5...10$ раз меньше среднего и составит $A_w = v^2/(2SKI)$. Таким образом, минимальные регистрируемые значения виброускорений должны составлять: для окна $A_w = 16/(2 \times 0,05 \times K \times 200) = (0,08...0,16)$ м/с², для сейфа $A_w = 16/(2 \times 0,003 \times K \times 400) = (0,67...1,3)$ м/с², для капитальной стены $A_w = 16/(2 \times 0,003 \times K \times 1000) = (0,27...0,54)$ м/с². Подводя итог, получим оценку минимального ускорения, испытываемого датчиком в результате разрушающего удара, $A_w = 0,1...2$ м/с². Оно возрастает с уменьшением площади поверхности и с увеличением жесткости материала. Наше СО должно иметь возможность регулировки порога срабатывания в указанных пределах, чтобы его можно было установить на любую поверхность площадью до нескольких квадратных метров.

Если измеряемое ускорение находится в пределах $0,1...2$ м/с², то соответствующий электрический сигнал на выходе ЧЭ (при его чувствительности $4,1$ мВ/(м/с²) — см. табл. 2.5.4) составит $0,41...8,2$ мВ, на выходе DA1 после усиления в 100 раз — $41...820$ мВ. Коэффициент усиления второго каскада (на DA2) регулируется в пределах от 5 до 100. Установив минимальное его значение, получим, что порог компаратора ± 4 В соответствует величине воздействия 2 м/с². Установив максимальное значение, порог компаратора ± 4 В будет соответствовать величине воздействия $0,1$ м/с². Изменение порога срабатывания позволяет подстраивать параметры СО под конкретный тип поверхности и уровень вибрационных шумов. Для средних условий можно установить среднее значение порога $0,3...0,4$ м/с², заменив переменный резистор R9 на постоянный величиной $39...56$ кОм.

Накопитель Н подсчитывает количество импульсов на выходе компаратора и активирует срабатывание РТ в случае поступления более чем $1...8$ импульсов. Введение накопителя позволяет повысить помехоустойчивость и обеспечить регулировку чувствительности СО в случаях многократного ударного воздействия на охраняемый предмет.

Отдельный удар обычно сопровождается единичным или двойным колебанием и одним-двумя электрическими импульсами. Если колебательный процесс содержит серию выбросов, то сгладить ее и превратить в один непрерывный импульс позволяет детектор огибающей на выходе компаратора. Он реализуется установкой конденсатора емкостью около $0,01$ мкФ параллельно резистору R15.

Основные достоинства пьезоэлектрических датчиков:

- простота монтажа; крепление к стене, двери или сейфу на резьбовой винт, шпильку, клей или магнитное основание;
- высокая чувствительность;
- сохранение работоспособности при высоких температурах (до $+150^\circ\text{C}$); пьезоэлектрический датчик можно установить в подкапотном пространстве автомобиля.

Основной недостаток пьезоэлектрического датчика — высокое выходное сопротивление ЧЭ и необходимость тщательной электроизоляции входных цепей БО и применения специальных соединительных кабелей, нечувствительных к деформациям.

2.5.3 Вибрационные аналоговые СО

Вибрационные аналоговые СО составляют многочисленную группу точечных датчиков. Их объединяет объект охраны — стена, дверь, сейф — и воспринимаемое физическое воздействие — вибрация от воздействия инструмента взлома или разрушения. Данные СО являются преимущественно внутренними. Они называются также поверхностными вибрационными извещателями. Значительная их часть фиксирует колебания катушки в поле неподвижного магнита; такие ЧЭ носят название электродинамических датчиков.

Направление вибрации может быть произвольным: вертикальным или горизонтальным. Максимальная амплитуда колебаний соответствует направлению наибольшей свободы перемещения, обычно проходящему перпендикулярно к охраняемой поверхности. В таком положении датчик формирует максимальный сигнал в ответ на полезные и помеховые воздействия. Хотя это не повышает помехоустойчивость СО, но упрощает его конструкцию и уменьшает количество каскадов усиления в БО.

Преобразование вибрации в электрический сигнал может осуществляться несколькими различными способами и средствами. Основными из них являются:

- пьезоэлектрический преобразователь, благодаря своей распространенности выделенный в отдельную группу и описанный ранее;
- электродинамический принцип; перемещение подвижной катушки в поле неподвижного магнита наводит в катушке ЭДС (рис. 2.5.8а); небольшая пружина фиксирует положение равновесия, около которого колеблется катушка; по данному принципу работает любой электродинамический микрофон или геофон; вариант с неподвижной катушкой и подвижным магнитом обладает несколько худшими показателями;
- электретный; колебания массы, закрепленной на основании через слой электрета, генерируют на обкладках заряд (рис. 2.5.8б); подобный принцип лежит в основе работы электретного микрофона;
- конденсаторный; вибрирующая масса может быть закреплена на одной из обкладок плоского конденсатора (рис. 2.5.8в); колебания массы меняют емкость конденсатора, преобразуемую в электрический сигнал; данный ЧЭ не генерирует электрический сигнал самостоятельно, он требует внешнего источника питания; в принципе так же работает и конденсаторный микрофон; все три преобразователя настолько похожи на датчики, чувствительные к акустическим колебаниям, что они часто объединяются в группу, называемую контактными микрофонами; контактными — потому что ЧЭ имеет непосредственный механический контакт с охраняемым предметом, микрофонами — потому что прослушивают и идентифицируют источник колебаний;
- маятниковый; подвижный магнит в результате колебаний наводит ЭДС в неподвижной катушке; он может закрепляться не на пружине, а на нити наподобие маятника (рис. 2.5.8г); такой датчик прост в изготовлении, но требует установки строго в вертикальном положении и поддержания этого положения;
- сейсмомагнитометрический; в любом проводнике, колеблющемся в магнитном поле Земли, также наводится ЭДС; сигнал с ЧЭ имеет малую амплитуду и требует большого усиления, но отражает все параметры вибрации;
- прочие — это удобное слово для обозначения любых подходящих в голову фантазий; различ-

ных типов датчиков вибрации столько же, сколько существует способов измерения положения, расстояния, скорости, ускорения; к ним относятся тензорезисторные, лазерные, ультразвуковые, оптические и многие другие — всего не перечислить; каждый из них обладает своими преимуществами, но все они имеют общий недостаток — высокую цену.

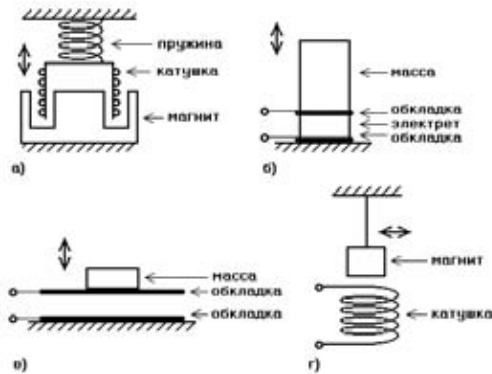


Рис. 2.5.8 Типы вибрационных ЧЭ

В состав конструкции большинства датчиков вибрации входит небольшой груз массой m и пружина, поддерживающая этот груз в состоянии устойчивого равновесия. Основная характеристика спиральной пружины — ее жесткость K — представляет собой коэффициент пропорциональности между смещением грузика x и вызывающей это смещение силой F , то есть $F = Kx$ (рис. 2.5.9а). Резонансная частота механической системы равна $\omega = (K/m)^{1/2}$. Она увеличивается с ростом жесткости системы и с уменьшением массы. На частотах выше резонансной смещение массы относительно основания полностью повторяет смещение самого основания в неподвижной системе координат. Здесь датчик работает как измеритель вибро смещения и имеет наибольшую чувствительность. На частотах ниже резонансной датчик работает как измеритель виброускорения (акселерометр).

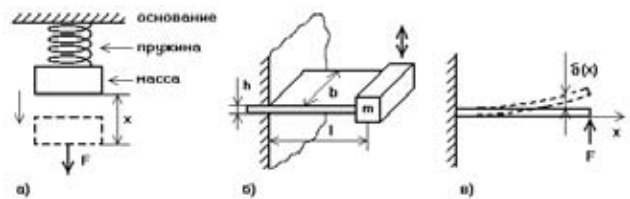


Рис. 2.5.9 Типы пружин

Пластинчатая пружина (рис. 2.5.9б) дает ряд преимуществ в измерении вибрации перед спиральной пружиной. Она строго ограничивает колебания массы m единственным направлением; пластина проста в изготовлении и удобна для размещения на ней преобразователей смещения в электрический сигнал, например, тензорезисторов. Если l — длина пластины, b — ее ширина, h — толщина, то резонансная частота равна $\omega = (h/2l) \times (Ebh/(ml))^{1/2}$, где E — модуль упругости материала пружины. Смещение $\delta(x)$ различных точек пласт-

тины в зависимости от координаты x при приложении силы F (рис. 2.5.9в) составляет $\delta(x) = (2l^3 F / Ebh^3) \times (3 - x/l) \times (x/l)^2$. Относительное удлинение пластины $\epsilon(x) = \sigma(x) / E = 6Fl(1 - x/l) / (Ebh^3)$.

Например, если заданы параметры механической системы $b = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$, $m = 50 \text{ г} = 0,05 \text{ кг}$, и требуется измерение вибрации (смещения) на частотах от $f = 100 \text{ Гц}$, то из приведенных соотношений можно найти остальные параметры. Для стальной пластины квадрат круговой частоты $\omega^2 = (2\pi f)^2 = Ebh^3 / (4ml^3)$, откуда $(l/h)^3 = Eb / (16\pi^2 f^2 m) = 2,1 \times 10^{11} \times 0,01 / (16 \times 3,14 \times 3,14 \times 100 \times 0,05) = 26600$, а отношение $l/h = 30$ (или $l/h > 30$, тогда резонансная частота будет меньше 100 Гц , что не мешает измерению частот в диапазоне выше 100 Гц). Выбрав толщину пластины $h = 0,001 \text{ м}$, получим длину $l = 0,03 \text{ м}$. Соотношение для $\epsilon(x)$ позволяет выбрать места наклеивания тензорезисторов и вычислить чувствительность полученного датчика вибрации.

Конкретизируем задачу, выполняемую вибрационным СО. Скажем, мы получили жилое или офисное помещение на нижнем этаже. На окнах установлены решетки, которые необходимо оборудовать датчиками, срабатывающими при попытке перепиливания. В углу комнаты стоит сейф. На него также следует установить сигнализацию, фиксирующую применение ножовки или другого инструмента вскрытия.

Оценим ожидаемый уровень полезных сигналов. Сила, развиваемая рукой во время пиления достигает $F = 50 \dots 100 \text{ Н}$. На пути до $S = 0,5 \text{ м}$ рука совершает максимальную работу $A = FS = 50 \text{ Дж}$. При скорости полотна до $v_{\pi} = 4 \text{ м/с}$ развиваемая рукой максимальная мощность составит $P = Fv_{\pi} = 400 \text{ Вт}$. Минимальная мощность, казалось бы, может быть сколь угодно малой. На самом деле, если интенсивность работы будет на порядок ниже максимального уровня, нарушитель лучше сразу идти в милицию. Итак, диапазон мощности руки принимаем равным $P = 40 \dots 400 \text{ Вт}$. Для сравнения мощность электроинструмента $P = 100 \dots 1000 \text{ Вт}$.

Колебания распространяются в твердом теле от источника вибрации во все стороны. По мере удаления от источника амплитуда колебаний падает. Плотность потока энергии в вибрационной (звуковой) волне $j = \rho v(A_v)^2 / 2$, где ρ – плотность вещества, A_v – амплитуда скорости вибрации, v – скорость звука в твердом теле, $v = (E/\rho)^{1/2}$, E – модуль упругости. Баланс мощности, преобразуемой в вибрацию во время пиления, дает соотношение $jS = (\rho v(A_v)^2 / 2) \times (2\pi Rb) = \eta P$, где S – площадь, через которую проходит поток энергии, $S = 2\pi Rb$, R – расстояние от источника вибрации до точки измерения, b – толщина стенки, η – коэффициент полезного действия (КПД). Значение КПД меняется в широких пределах в зависимости от состояния инструмента, качества материала стенки, манеры пиления, нежелания производить лишний шум, направления на точку измерения, переизлучения энергии в окружающее пространство. Значения КПД могут составлять $\eta = 0,02 \dots 0,5$. Величина амплитуды вибростороности равна $A_v = (\eta P / (\pi R b \rho v))^{1/2}$; она сравнительно медленно убывает с ростом расстояния R и не зависит от частоты колебаний.

Для обычного стального сейфа $E = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$, $\rho = 7,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, $v = (E/\rho)^{1/2} = 5100 \text{ м/с}$. Приняв диапазон изменения толщины стенки $b = 2 \dots 10 \text{ мм}$, расстояния $R = 1 \dots 3 \text{ м}$, получим минимальное значение вибростороности $A_v = (0,02 \times 40 / (3,14 \times 3 \times 0,01 \times 7700 \times 5100))^{1/2} = 0,46 \text{ мм/с}$ и максимальное значение вибростороности $A_v = (0,5 \times 1000 / (3,14 \times 1 \times 0,002 \times 7700 \times 5100))^{1/2} = 45 \text{ мм/с}$. Таким образом, порог срабатывания вибрационного СО в зависимости от условий функционирования должен устанавливаться в пределах $A_v = 0,46 \dots 45 \text{ мм/с}$.

Используем в качестве датчика вибрации геофон СВ-10. Для этого удалим с него наконечник и закрепим на металлической поверхности за верхнюю крышку. Подсоединим выход геофона ко входу осциллографа и начнем пилить металл ножовкой. На экране осциллографа в такт с движениями ножовки будет возникать синусоида с амплитудой около 100 мВ и периодом около 1 мс .

Средняя скорость полотна во время пиления $v_{\pi} = 1 \text{ м/с}$, а зубцы идут с шагом $\Delta = 1 \text{ мм}$, отсюда получается частота сигнала $f = v_{\pi} / \Delta = 1/0,001 = 1000 \text{ Гц}$. Скорость может меняться от $0,25 \text{ м/с}$ до 4 м/с , соответственно частота сигнала будет составлять $f = v_{\pi} / \Delta = 250 \dots 4000 \text{ Гц}$. Количество периодов в серии равно числу активных зубцов на полотне. При полной длине стандартного полотна $0,3 \text{ м}$, следует ожидать не менее чем $N = 150$ периодов в серии. Продолжительность серии импульсов $\tau = N/f$, соответствующая одному проходу ножовки, находится в пределах $\tau = 38 \dots 1200 \text{ мс}$.

На основании приведенных оценок можно сформировать алгоритм обработки сигналов и соответствующую ему схему (рис. 2.5.10). Полезное воздействие амплитудой $0,45 \dots 45 \text{ мм/с}$ частотой $250 \dots 4000 \text{ Гц}$ преобразуется датчиком В1 типа СВ-10, имеющим чувствительность $18 \text{ В} \times \text{с/м}$, в электрический сигнал синусоидальной формы амплитудой $8 \dots 800 \text{ мВ}$. Первый каскад усиления выполнен на элементах DA1.1, R1, R2, R3, R4, R5. Коэффициент усиления каскада $K_{yc} = (R3 / R1) \times (R4 / R5 + 1) = 50$. Амплитуда полезных сигналов на выводе 1 DA1 достигает соответственно $0,4 \dots 8 \text{ В}$, сохраняя периодичность и двухполярность. ФВЧ на элементах R6, C1 блокирует прохождение помеховых сигналов в диапазоне частот ниже $f = 1/(2\pi R6C1) = 250 \text{ Гц}$.

Второй каскад усиления выполнен на элементах DA1.2, C2, R7, R8, R9, R10, R11. Коэффициент усиления $K_{yc} = R10 / R11 + 1$ можно менять в пределах от 1 до 20, благодаря чему при максимальном $K_{yc} = 20$ до уровня 8 В поднимается амплитуда даже самого слабого полезного сигнала. С другой стороны, уменьшая коэффициент усиления, удастся наилучшим образом подстроить чувствительность СО под размеры и тип охраняемой поверхности, а также снизить вероятность ложных тревог в случае полезных сигналов большой амплитуды. Увеличение коэффициента усиления сверх 20 лишено смысла, так как при этом уровень естественных шумов достигнет порога компаратора.

Компаратор на элементах DA2, R12, R13 завершает аналоговую часть БО и открывает его цифровую часть. Порог компаратора определяется делителем R12, R13 и

составляет 4 В. При максимальном усилении ($50 \times 20 = 1000$) он соответствует амплитуде вибрации около 0,2 мм/с, что близко к естественному уровню вибрации на тихой городской окраине. Сигнал на входе компаратора является симметричным периодическим, поэтому компаратор имеет только положительный порог. В дежурном состоянии на выходе компаратора присутству-

ет постоянный уровень минус 8 В, при появлении полезного сигнала – непрерывная серия положительных импульсов с частотой 250...4000 Гц; длительность серии – 38...1200 мс.

Каскад на элементах DD1.1, VD1, C3, R14, R15 сглаживает отрицательные выбросы полезного сигнала длительностью менее 4 мс. На выходе DD1.1 постоянно присутствует сигнал высокого уровня. Он переходит в непрерывный сигнал низкого уровня в течение каждого пиления.

Элементы DD2.1, DD1.2, DD1.3, R16, R17, C4 служат для селекции отрицательных импульсов длительностью более 38 мс. Сигнал низкого уровня на выходе DD1.1 запускает генератор на элементах DD1.2, DD1.3, R16, R17, C4 и счетчик DD2.1 восьми импульсов генератора. Частота генератора выбрана таким образом, чтобы $38 \text{ мс} = 8 \times 1,4 \times R17 \times C4$. За счет этого каждое отдельное движение ножовки сопровождается положительным импульсом на выходе 6 микросхемы DD2.1.

Одно движение не всегда свидетельствует о попытке вскрытия сейфа. Но нельзя дожидаться и последнего взмаха ножовки, после которого унесут его содержимое. Приемлемый компромисс состоит в формировании сигнала тревоги в результате накопления восьми пилений в течение двадцати секунд. Накопление способствует увеличению наработки на ложную тревогу, хотя и увеличивает время реакции СО на действия нарушителя. Элементы DD3.1, VD2, C5, R18, R19 устанавливают время выдержки, равное $0,7 \times R18 \times C5 = 20 \text{ с}$ от первого импульса. Счетчик DD2.2 инициирует сигнал тревоги импульсом высокого уровня на своем выходе 14.

Одновибратор на DD3.2, R20, C6 определяет длительность сигнала тревоги, равную $0,7 \times R20 \times C6 = 5 \text{ с}$. В дежурном состоянии транзистор VT1 открыт сигналом высокого уровня с выхода 12 D-триггера DD3.2, а контакты 2 и 3 реле K1 замыкают сигнальную линию. Во время срабатывания транзистор VT1 закрывается, обмотка реле K1 обесточивается и его контакты 2 и 3 размыкаются. Реле K1 – типа РЭС49 паспорт РС4.569.421-01.

Приведенная схема допускает простую ее модификацию, как в сторону упрощения, так и в сторону усложнения. Расширение набора регистрируемых инструментов взлома неизбежно приведет к увеличению частоты ложных тревог. Для ее уменьшения необходимо вводить в алгоритм выделения дополнительных информативных признаков, таких как периодичность, двухполярность, прерывистость.

2.5.4 Трибоэлектрические СО

Трибоэлектрический эффект заключается в возникновении заряда при трении металла о диэлектрик. Заряд, как всем хорошо известно, возникает также и при трении двух диэлектриков (например, расчески о волосы), но наличие одного проводника в паре удобно тем, что позволяет доставлять заряд к средствам его измерения. Эффектом генерации заряда в большей или

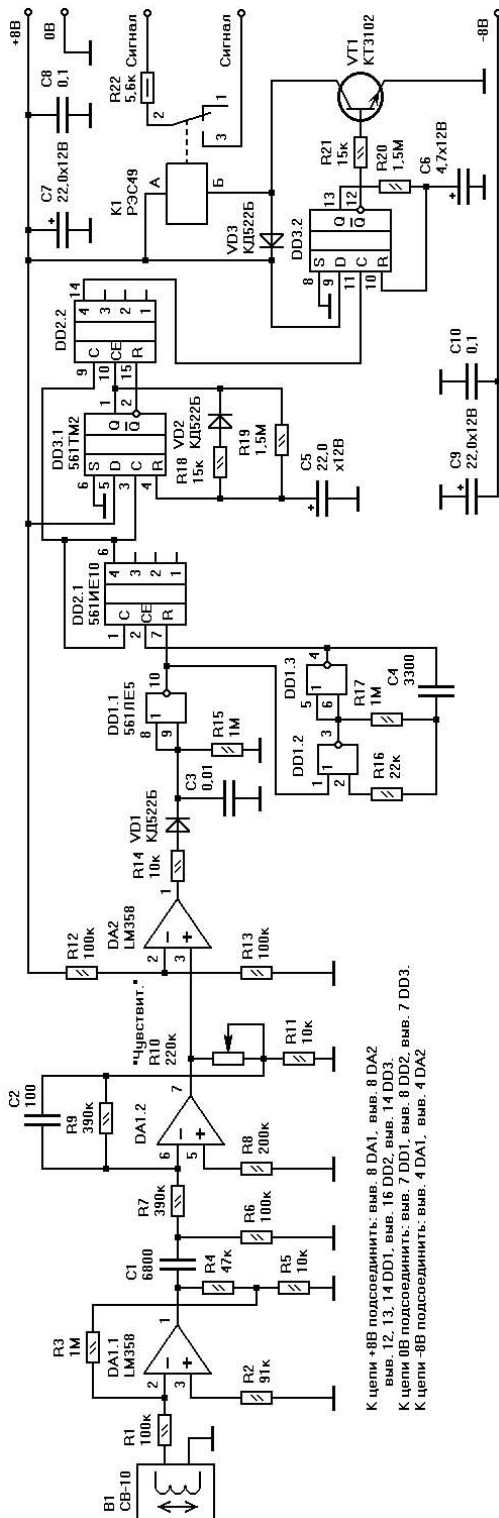


Рис. 2.5.10 Вибрационное СО

меньшей степени обладают все материалы. В результате многочисленных экспериментов был установлен так называемый трибоэлектрический ряд материалов (табл. 2.5.3). Чем дальше друг от друга находятся в данном ряду трущиеся материалы, тем в большей степени проявляется эффект. Например, при одинаковой интенсивности трения пара алюминий-тефлон даст больший заряд, чем пара железо-резина. Приведенный ряд относится к сравнительно чистым материалам; наличие примесей, присадок и красителей может нарушать указанный порядок.

Таблица 2.5.5 Трибоэлектрический ряд материалов

Номер	Название материала
1	Силикон
2	Мех
3	Стекло
4	Слюда
5	Поликарбонат, полиформальдегид
6	Полиметилметакрилат (оргстекло, плексиглас)
7	Нейлон
8	Дерево, шерсть, шелк
9	Цинк, алюминий, свинец
10	Бумага, хлопок
11	Серебро
12	Железо, сталь
13	Медь, никель
14	Резина
15	Полиуретан
16	Полиэтилен, полипропилен
17	Полистирол
18	Поливинилхлорид
19	Лавсан, полиэтилентерефталат
20	Кремний
21	Тефлон (фторопласт)

По сути все материалы в ряду расставлены в порядке возрастания способности к захвату электрона (так называемой работы выхода). Таким образом, таблица 2.5.5 объясняет и механизм возникновения заряда. Он состоит в захвате электронов (электризации) одним из контактирующих материалов от другого. Формируемый заряд будет максимален в том случае, когда один материал легко отдает электроны, а другой – крайне тяжело (или, что то же самое, легко их захватывает). Материалы из верхней части таблицы называются донорами, они преимущественно отдают электроны, заряжаясь положительно. Материалы из нижней части таблицы называются акцепторами, они захватывают электроны, заряжаясь отрицательно. Трибоэлектрические СО иногда называют контактно-электризуемы-

ми СО, что, наверное, более строго соответствует сути эффекта. Однако, в данном случае простота произношения и образования прилагательных вытесняет точность понимания.

Трибоэлектрический ряд (табл. 2.5.5) широко известен в электротехнике. Он помогает создавать кабели с минимальными трибошумами, так как неизбежное трение между проводником и изоляцией создает дополнительные помеховые сигналы. Этот же ряд позволяет подобрать кабель с максимальным трибоэффектом, чтобы использовать его в качестве элемента, чувствительного к механическим воздействиям. Если к требованию наибольшего сигнала добавить необходимость минимальной стоимости, а главное – максимальной податливости, мягкости, восприимчивости кабеля к деформациям, то в результате выбор упадет на алюминиевые или медные провода с полиэтиленовой или лавсановой изоляцией. К ним относятся, например, кабели марок ТПП и ПВЧС.

Основные характеристики некоторых кабелей с выраженным трибоэлектрическим эффектом приведены в таблице 2.5.6. Кроме них ряд трибоэлектрических кабелей выпускается промышленно по индивидуальному заказу специально для использования в качестве ЧЭ вибрационных СО. К ним относятся кабели типов КТМ-1,8, КТДЗ-1,8/3,8, КТВ-Мф, КТВУ-М. Основная отличительная особенность спецкабелей – наличие внешнего (дополнительного к основному, то есть второго) экрана. Он защищает внутренние проводники от электромагнитных наводок, а также препятствует стеканию зарядов через внешнюю оболочку кабеля. Сама внешняя оболочка обладает повышенными защитными свойствами, так как проникновение влаги уменьшает трибоэлектрический эффект в несколько раз за счет окисления проводников. Стоимость спецкабелей в несколько раз превышает стоимость обычных кабелей и составляет 50...100 руб/м.

Величина трибоэффекта в кабеле, изготавливаемом по индивидуальному заказу, является контролируемым параметром. Она находится в определенных пределах. Та же величина для стандартных кабелей (табл. 2.5.6) является заранее неопределенной, она имеет большой разброс и меняется от партии к партии. Однако важно то, что чувствительность является стабильной, для разных образцов она может быть больше или меньше, но для одного образца она не изменится ни через пять, ни через десять лет (при отсутствии повреждений и протечек).

Чувствительный кабель трибоэлектрического СО крепится к забору, обычно к его верхней части с внутренней стороны, где интенсивность полезных воздействий максимальна, а помеховых – минимальна. Тот же кабель можно установить в землю под забором, где он

Таблица 2.5.6 Трибоэлектрические кабели

Тип	Назначение	Изолятор	Внешний диаметр, мм	Погонная масса, кг/м	Погонная емкость, пФ/м	Цена, руб/м
ТППЭп 10×2×0,5	Телефонный	Полиэтилен	11	0,11	45	40
ПВЧС	ВЧ связь	Полиэтилен	5,5	0,034	60	25
КММ 9×0,35	Микрофонный	Полиэтилен	10,5	0,11	60	20
РК75-4	Телевизионный	Полиэтилен	7,3	0,065	60	12

будет выполнять роль противоподкопного СО. В обоих случаях для размещения трибоэлектрического СО необходим забор. Это демаскирует СО и значительно удорожает его, если забора ранее не было.

Трибоэлектрические СО относятся к вибрационным. Но как и многие вибрационные СО, оно реагирует на три фактора. Первым из них является вибрация или деформация полотна забора, характерная для перелазы через забор или для его разрушения. Второй — непосредственное воздействие на кабель. Оба фактора вызывают деформацию кабеля и как следствие — накопление заряда. Они отличаются по величине полезного сигнала и отношению сигнал/помеха. Третий фактор — механическое повреждение или обрыв кабеля. Любой из трех факторов в случае достаточной интенсивности приводит к активации сигнала тревоги.

Усредненное трибоэлектрическое СО имеет следующие характеристики: максимальная длина чувствительного кабеля — 300...500 м (при использовании специального кабеля — до 2000 м); напряжение питания — 10...30 В; потребляемый ток — 1,5...15 мА; порог срабатывания — 50...500 Н; срок службы — 5...10 лет; погонная стоимость аппаратуры (включая стоимость кабеля, но без стоимости забора) — 70...240 руб/м (2,5...8 \$/м), при этом доля стоимости кабеля составляет 20...75%.

Главные достоинства трибоэлектрических СО:

- большая протяженность линии охраны;
- простота конструкции; трибокабель является и ЧЭ и средством передачи электрического сигнала к БО; в связи с этим удешевляется как само СО, так и его монтаж;
- охрана непрямолинейных участков; трибокабель следует за забором, ограждением или стеной, повторяя все изгибы и перепады высот;
- установка чувствительного кабеля в грунте дает возможность обнаруживать подкоп.

Основные недостатки трибоэлектрических СО:

- высокое входное сопротивление зарядовых усилителей; необходимость тщательного экранирования и защиты входных цепей от влаги;
- широкий динамический диапазон сигналов; вибрационные СО необходимо подбирать и настраивать под тип ограждения, его массу и жесткость;
- большой разброс чувствительности стандартных кабелей, используемых в качестве трибоэлектрических датчиков;
- низкая помехоустойчивость во время сильного порывистого ветра, проезда массивного транспорта или при воздействии крупных животных или стаи птиц;
- ослабление трибоэффекта при повреждении кабеля за счет проникновения влаги и окисления поверхности проводников.

Использование трибоэлектрического эффекта для регистрации вибрации и деформации требует понимания некоторых закономерностей, не всегда явных или очевидных. Чтобы наблюдать за ними, соберем простой измерительный зарядовый усилитель (ЗУ) (рис.

2.5.11). К разъемам XS1 и XS2 («крокодилы») будем подсоединять отрезки исследуемого кабеля (экран — к XS2, жилы — к XS1). ЗУ работает следующим образом. Измеряемый заряд Q попадает на конденсатор $C1$ емкостью 1000 пФ, напряжение на котором становится равным $U = Q/C1$. Конденсатор $C1$ разряжается через высокоомный резистор $R4$. Его сопротивление определяет скорость разряда. Оно должно быть не менее 100 МОм, чтобы постоянная времени разряда $\tau = R4C1$ была не менее 0,1 с для возможности наблюдения величины сигнала на экране осциллографа.

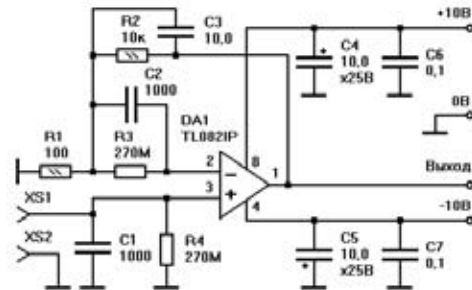


Рис. 2.5.11 Измерительный ЗУ

Необходимость высокого входного сопротивления схемы требует применения в качестве DA1 операционного усилителя с полевыми транзисторами во входных цепях. Конденсатор $C1$ и резистор $R3$ выполняют роль балансирующих, их значения выбираются из условий $C2 = C1$, $R3 = R4$. Коэффициент усиления каскада на DA1 равен $R2/R1 = 100$. Поэтому полный коэффициент преобразования ЗУ составляет $K = U_{\text{вых}} / Q = R2 / (C1R1) = 0,1$ В/пКл.

Четыре узла, соответствующие обоим выводам резисторов $R3$ и $R4$, подвержены повышенному риску стекания заряда. Их необходимо выполнить на четырех стойках. Схема очень чувствительна к наводкам, ее следует тщательно экранировать. Недостаточную экранировку компенсирует конденсатор $C3$, подавляющий помехи промышленной частоты 50 Гц (а вместе с ними — и высокочастотные составляющие полезных сигналов).

На изготовление измерительного ЗУ и последующие эксперименты уйдет не более половины дня, но полученные результаты превзойдут всяческие ожидания. Сначала проведем калибровку ЗУ, то есть проверим значение его коэффициента преобразования. Подадим на вход ЗУ фиксированный заряд в пределах 100 пКл, например, следующим образом. Подсоединим к XS2 один из выводов конденсатора емкостью $C = 10$ пФ, другим выводом коснемся сначала клеммы питания (+10 В или -10 В), а затем — XS1. В результате на вход ЗУ поступает заряд $Q = CU = 10$ пФ \times 10 В = 100 пКл, а на экране осциллографа, подсоединенного к выходу усилителя, наблюдается всплеск величиной около 10 В, что подтверждает значение $K = 10$ В / 100 пКл = 0,1 В/пКл. Наблюдаемое значение может быть чуть меньше, так как острый начальный пик сигнала (а именно он составляет 10 В) фильтруется конденсатором $C3$. Знак сигнала соответствует знаку заряда.

Возьмем несколько отрезков экранированного кабеля различных типов небольшой длины (не более 2...3 метров, удобнее всего – 0,2...0,3 метра). Попробуем все, что найдется под рукой. Чаще всего там оказываются телевизионные (РК-75, RG-6) или микрофонные (КММ, Canare, Belden) кабели, реже – компьютерные (UTP экранированный) или телефонные (ТП-Пэп). Будем поочередно подсоединять ко входу ЗУ кабели различных типов, а затем надавливать на кабель с различной силой (1 Н, 10 Н, 100 Н), изгибать кабель с различной стрелой прогиба (1 мм, 2 мм, 10 мм на длине 0,1...0,3 м), скручивать кабель вокруг оси, растягивать его и сжимать.

Результаты будут примерно следующие. Величина полезного сигнала, приведенная ко входу, лежит в диапазоне 1...200 пКл. Все воздействия удобно соотносить именно с этой единицей заряда. Те кабели, которые генерируют полезный сигнал менее 10 пКл следует признать неперспективными для использования в качестве ЧЭ трибоэлектрического СО. Скорее всего, в эту группу войдут телевизионные кабели RG-6 со вспененным полиэтиленом и лавсановой пленкой в качестве диэлектрика и высококачественные двухпроводные микрофонные кабели. И дело не в том, что они не подходят в принципе; их можно было бы использовать, если бы не было других, более чувствительных.

Вопреки ожиданиям, величина заряда почти не зависит от силы давления на кабель или угла его поворота вокруг оси. Близкой к линейной окажется зависимость генерируемого заряда от стрелы прогиба a (смещения середины кабеля при неподвижных концах). Коэффициент пропорциональности (чувствительность кабеля) составит $K_{КАБ} = Q/a = 1...20$ пКл/мм.

Если под рукой окажется многопроводный кабель, скажем, КММ 5×0,12, состоящий из пяти изолированных друг от друга проводов в общем экране, то интересно проследить зависимость величины сигнала от количества проводников. Для давления она окажется слабовыраженной, а для изгиба или скручивания – почти прямопропорциональной. Поэтому естественно желание использовать многопроводные кабели, соединяя их жилы параллельно.

Таким образом, при измерении смещения кабеля величиной $a = 1...10$ мм следует ожидать значений заряда $Q = K_{КАБ} \times a = 1...200$ пКл. Непрерывный вибрационный сигнал на подвижных деревянных или стальных заборах ($a \approx 0,1$ мм) может достигать 0,1...2 пКл. Для сравнения порог чувствительности лучших зарядовых усилителей (например, РШ2731Э) составляет 0,01 пКл.

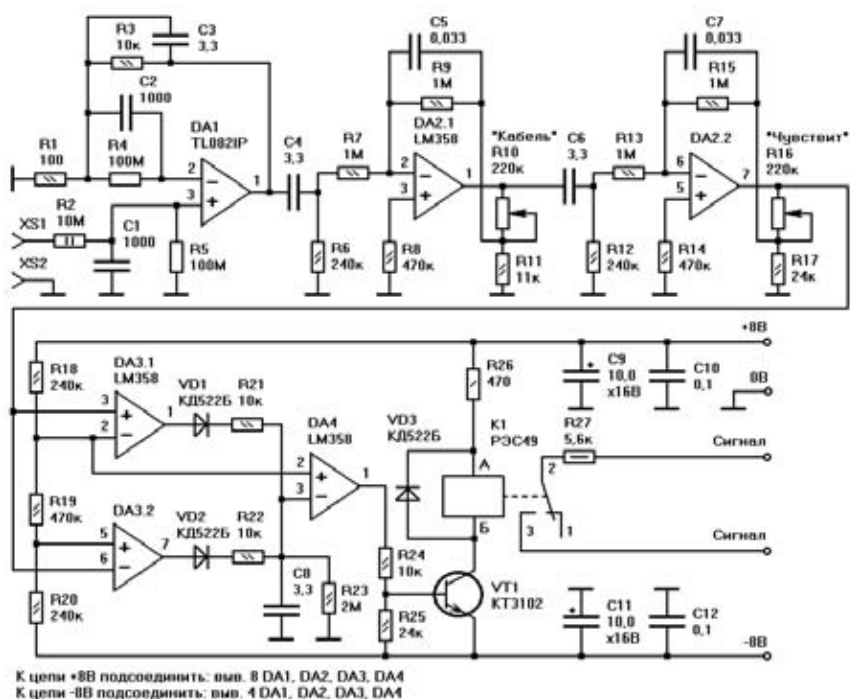


Рис. 2.5.12 Трибоэлектрическое СО

Измерительный ЗУ без труда трансформируется в трибоэлектрическое СО (рис. 2.5.12). К разъемам XS1, XS2 подсоединяется чувствительный кабель. Соединение должно быть разъемным, но надежным, поэтому наилучший выбор – использование клеммников для подключения кабеля «под винт».

Резистор R2 совместно с входной емкостью C1 служит для подавления высокочастотных наводок. Резистор R5 обеспечивает разряд конденсатора C1. Напряжение на конденсаторе C1 усиливается в R3/R1 раз, в результате коэффициент преобразования каскада на DA1 составляет $K = R3 / (R1C1) = 0,1$ В/пКл, то есть сигнал на выходе DA1 равен 0,1 В на каждый пикокулон поступающего на его вход заряда. Конденсатор C3 фильтрует сигналы, имеющие частоту более $f = 1 / (2\pi R3C3) = 5$ Гц, поэтому при изменении входного заряда от 1 пКл до 200 пКл реальная величина сигнала на выходе DA1 находится в пределах 0,05...8 В.

Длина чувствительного кабеля, подключаемого к клеммам XS1 и XS2, должна быть не более нескольких метров, чтобы его емкость не превышала 200...300 пФ. В противном случае заряд с кабеля не будет полностью перетекать на входную емкость C1 и параметры усилителя придется откорректировать. Кабель может быть установлен на дверь или калитку, под охраняемый предмет или половик таким образом, чтобы обеспечивать его смещение или изгиб в ответ на внешнее воздействие. Концы кабеля необходимо загерметизировать против попадания влаги на его проводящие элементы.

Сигнал, возникающий в результате деформации чувствительного кабеля, лежит в диапазоне частот 0,5...2 Гц. ФНЧ на элементах C4, R6 имеет меньшую частоту среза $f = 1 / (2\pi R6C4) = 0,2$ Гц, так как при последовательном соединении нескольких ФНЧ результирующая частота повышается.

Коэффициент усиления каскада на DA2.1, равный $K = (R10 + R11) / R11$, может меняться в пределах 1...20. Данный каскад служит для компенсации различий в чувствительности кабелей $K_{КАБ} = 1...20$ пКл/мм. Одновременно каскад отфильтровывает сигналы с частотами выше $f = 1 / (2\pi R9C5) = 5$ Гц.

Фильтр на элементах С6, R12 идентичен фильтру на С4, R6. Каскад на DA2.2 имеет регулируемый коэффициент усиления $K = (R16 + R17) / R17 = 1...10$. Он служит для изменения чувствительности датчика к изгибу кабеля в пределах 1...10 мм.

Усиленный сигнал поступает на двухпороговый компаратор на DA3. Пороги срабатывания (+4 В и –4 В) задает делитель на резисторах R18, R19, R20. В случае превышения сигналом верхнего порога +4 В на выходе DA4 устанавливается напряжение, близкое к +8 В, которое через резистор R21 быстро заряжает конденсатор С8. То же происходит в случае уменьшения сигнала менее нижнего порога –4 В, благодаря срабатыванию компаратора DA5. Медленный разряд конденсатора С8 через резистор R23 определяет длительность сигнала тревоги, равную $T = 0,7R23C8 = 5$ с.

В дежурном режиме напряжение на выходе DA4 составляет около +8 В, транзистор VT1 открыт, а контакты 2 и 3 реле K1 – замкнуты. Реле имеет паспорт РС4.569.421-01 (сопротивление обмотки 800 Ом). Во время срабатывания СО напряжение на выходе DA4 падает до –8 В, транзистор VT1 закрывается, обмотка реле K1 обесточивается, а сигнальная линия обрывается. Резистор R26 ограничивает ток через обмотку реле. Резистор R27 выполняет роль оконечного.

Схема в целом обеспечивает срабатывание реле при подаче на вход заряда в пределах от 1 пКл до 200 пКл. При необходимости чувствительность может быть откорректирована под другие значения заряда изменением параметров пассивных элементов.

2.5.5. Электретные СО

Плюсом и одновременно минусом электретных СО является тот редкий случай, когда ЧЭ изготавливается специально для решения задач охранной сигнализации. Плюсом – потому что достигаются наилучшие характеристики, минусом – потому что электретный кабель труднодоступен, его невозможно купить в обычных магазинах или на рынке.

Электретный кабель представляет собой коаксиальный кабель с центральным проводником, полиэтиленовым изолятором и экраном, покрытым защитной оболочкой. В процессе производства, после заливки расплавленного изолятора, между центральным проводником и экраном прикладывается электрическое поле большой напряженности. После остывания кабеля поле снимается. В результате изолирующий диэлектрик между центральным проводником и экраном окзывается радиально поляризованным. Он называется электретом. В случае механической деформации электретного кабеля на его центральной жиле и экране появляются заряды противоположного знака.

По сравнению с трибоэлектрическим кабелем электретный обладает преимущественно радиальной чувствительностью, большим коэффициентом преобразования и более стабильными характеристиками. Правда и стоимость его возрастает. В остальном электретное СО почти ничем не отличается от трибоэлектрического.

2.5.6. Опволоконные СО

Опволоконное (или волоконно-оптическое) СО состоит из излучателя (И), оптоволоконна и приемника (П) (рис. 2.5.13). Излучатель направляет в оптоволоконно луч света. Оно закрепляется на контролируемом объекте, например, на полотне забора. В результате вибрации или смещения оптоволоконно деформируется и параметры излучения на приемном конце меняются, что может быть зафиксировано блоком обработки (БО). Иногда, хотя и редко, излучатель и приемник располагаются вместе на одном конце оптоволоконна, тогда на другом его конце устанавливается отражатель.



Рис. 2.5.13 Опволоконное СО

В качестве излучателя используется либо светодиод, либо полупроводниковый лазер. Излучение светодиода непрерывно занимает широкий спектр частот (рис. 2.5.14а). Например, обычный ИК светодиод на основе арсенида галлия имеет максимум интенсивности на длине волны $\lambda = 850...970$ нм, а ширину полосы излучения $\Delta\lambda = 20...50$ нм. Ширина полосы излучения лазера существенно уже и составляет $\Delta\lambda = 2...4$ нм. В спектре излучения лазера обычно одновременно присутствует до нескольких десятков различных, но близких друг к другу, спектральных линий или мод (рис. 2.5.14б). Параметры каждой моды отличаются стабильностью, поэтому полупроводниковый лазер в наибольшей степени подходит для проведения тонких измерений, к которым относится и фиксация незначительных деформаций опволоконного кабеля.

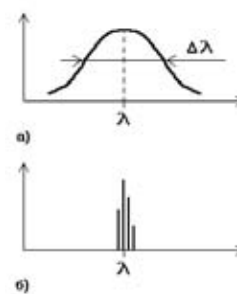


Рис. 2.5.14 Спектр излучения

Типичный полупроводниковый лазер генерирует излучение мощностью в несколько милливатт на длине волны 780 нм, 1310 нм, 1550 нм или 1625 нм. Он обеспечивает работу опволоконной линии длиной 1...2 км. Подъем излучаемой мощности до 10...50 мВт

позволяет увеличить длину чувствительного кабеля до 10...60 км, то есть примерно по одному милливатту на каждый километр дальности.

Приемником, воспринимающим излучение, прошедшее через оптоволокно, является фотодиод или фоторезистор, работающий в соответствующем диапазоне длин волн. При этом приемник может быть точечным или матричным (многоэлементным). Точечный приемник состоит из одного чувствительного элемента, он проще и дешевле, но измеряет интегральную (усредненную по поверхности) интенсивность излучения. Матричный или пространственно-чувствительный приемник дает более детальную информацию об интенсивности излучения в различных точках поверхности ЧЭ. Он формирует на своем выходе (или выходах) более сложный сигнал, требующий более детальной обработки. Естественно, матричный приемник дороже точечного, но он обеспечивает такие же преимущества, какие дает подозрительная труба по сравнению с замочной скважиной.

Каждое отдельное оптоволокно состоит из трех слоев: сердцевины, наружного слоя и защитной оболочки (рис. 2.5.15). Внутренняя сердцевина выполнена на основе кварца, обладающего высоким коэффициентом преломления. По сердцевине распространяется излучение. Наружный слой выполнен из прозрачного материала с меньшим коэффициентом преломления. Он препятствует выходу излучения из сердцевины за счет эффекта полного внутреннего отражения. Внешняя пластиковая оболочка защищает оптоволокно от механических повреждений и проникновения влаги. Оптоволокно называется также световодом. Оптоволоконный кабель состоит из нескольких световодов в общей внешней оболочке.

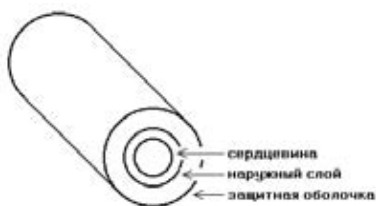


Рис. 2.5.15 Оптоволокно

Оптоволокна бывают двух типов: одномодовые и многомодовые. Многомодовые имеют больший диаметр сердцевины и большее затухание. По ним могут распространяться волны различных мод, в отличие от одномодовых световодов, рассчитанных на преимущественную передачу определенной моды.

Приведем типовые параметры оптоволоконного кабеля. Диаметр сердцевины одномодового световода составляет 7...10 мкм, многомодового — 50...100 мкм (обычно 50 или 62,5 мкм); диаметр оболочки — 125 мкм; число оптических волокон в кабеле — до 84; наружный диаметр кабеля — 4...12 мм; длительно допустимая сила натяжения кабеля — 2...5 кН; коэффициент затухания — 0,2...4,0 дБ/км. Тип световода часто обозначают дробью, в числителе которой стоит диаметр сердцевины, а в знаменателе — диаметр оболочки в микрометрах, например, многомодовое оптоволокно 62,5/125.

Коэффициент затухания в значительной мере зависит от длины волны излучения. Кварцевые световоды имеют три окна прозрачности, в которых затухание минимально: около длин волн 850, 1300 и 1550 нм. Последнее окно занимает диапазон от 1525 нм до 1565 нм. Оно называется основным диапазоном (С-band). В области 1390 нм находится пик поглощения гидроксильного иона OH^- , возникающий вследствие нежелательного попадания воды в ходе производства световода. Указанные ранее длины волн лазеров, используемых в качестве излучателей, выбраны из соответствующих окон прозрачности оптоволоконного кабеля.

Есть еще один важный параметр оптоволоконного кабеля — числовая апертура (ЧА). Она численно равна синусу предельного угла между осью световода и вводимым лучом света, когда все еще обеспечивается условие полного внутреннего отражения. Для одномодовых оптоволокон $\text{ЧА} = 0,12$, для многомодовых — $\text{ЧА} = 0,2...0,3$. Одномодовое волокно требует меньшего отклонения луча света от оси волокна, поэтому оно более чувствительно к деформациям изгиба. Аналогично многомодовое оптоволокно с более тонкой сердцевиной 50/125 оказывается чувствительнее волокна 62,5/125. Кроме того, потери в оптоволоконном кабеле возрастают с увеличением длины волны. Следовательно, для использования в качестве ЧЭ оптоволоконного СО наиболее подходят одномодовые волокна при длине волны излучения 1550 или 1625 нм. Также полезно для повышения чувствительности вводить луч в световод не параллельно его оси, а под небольшим углом (в пределах ЧА). Простое на бумаге, осуществление углового ввода затруднено в связи с необходимостью применения нестандартных оптических разъемов.

И наконец, последнее замечание относительно оптоволоконных кабелей. В технике охранной сигнализации применяются стандартные кабели, используемые в системах передачи информации. Если для первых полезными сигналами являются изменения параметров излучения в результате микродеформации кабеля, то для вторых — те же изменения являются помехой. Постоянное совершенствование кабелей для техники связи может оставить оптоволоконные СО без ЧЭ или, по крайней мере, снизить их чувствительность.

В результате микродеформаций оптоволоконного кабеля может меняться любой из пяти параметров проходящего по нему импульса излучения: амплитуда, частота, фаза, поляризация, длительность. Наиболее подвержены изменениям два из них: амплитуда и фаза.

Луч света летит по прямолинейному оптоволоконному световоду вдоль сердцевины, лишь иногда отражаясь от наружного слоя обратно во внутренний. На каждом отражении, хотя теоретически оно является полным внутренним, теряется незначительная часть энергии луча. В случае изгиба оптоволоконного кабеля количество отражений возрастает, и пропорционально ослабевает интенсивность излучения. Эффект снижения интенсивности весьма незначительный. В этом убеждает само существование оптоволоконной связи, иначе кабель нельзя было бы ни изогнуть, ни повернуть. Даже намотав одномодовое оптоволокно в пять-шесть оборотов на карандаш, уда-

тса ослабить интенсивность проходящего по нему света примерно в 10 раз. Что уж говорить о микродеформациях.

Оценим количество отражений луча на отдельной микродеформации оптоволоконка. Пусть микродеформация представляет собой смещение порядка $a = 1$ мм на длине $l = 10$ см. Обозначим угол поворота за γ , а радиуса поворота — за r . Тогда из геометрических соотношений $r \times \sin(\gamma/2) = l/2$ и $r \times \cos(\gamma/2) + a = r$ нетрудно получить выражения $\gamma = 8a/l - 32/3 \times (a/l)^3 = 0,08$ рад и $r = l^2/8a + a/2 = 1,25$ м (рис. 2.5.16а). Предельный угол α , соответствующий ровно одному отражению в оптоволоконке диаметром d , изогнутом по окружности радиуса r , найдем из соотношения $(r + d) \times \cos(\alpha/2) = r$; он составит $\alpha = (8d/r)^{1/2}$ (рис. 2.5.16б). Ясно, что минимальный радиус изгиба, при котором нарушается условие полного внутреннего отражения, очень мал $r_{\text{ПРЕД}} = 8d / (2 \times \text{ЧА})^2 = 2 \times 0,000009 / 0,12^2 = 1,25$ мм. Путь, проходимый лучом между двумя отражениями, равен $S = \alpha r = (8dr)^{1/2}$. Одна средняя микродеформация добавляет приблизительно n отражений, $n = \gamma/\alpha = (a/d)^{1/2} = (0,001/0,000009)^{1/2} = 11$. В случае малых деформаций ($a \ll l$) число n не зависит от длины l .

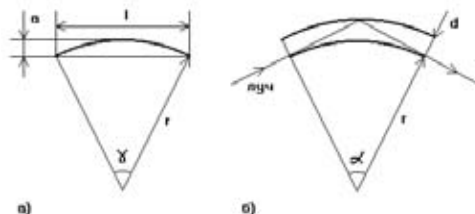


Рис. 2.5.16 Изгиб оптоволоконка

На пяти оборотах оптоволоконка вокруг карандаша луч света испытывает $N = 10\pi/\alpha = 10\pi/(8 \times 0,009/10)^{1/2} = 370$ отражений, теряя 90% энергии. Следовательно, доля энергии, теряемой на каждом отражении, составляет $\delta = \ln 10/N = 0,006$ (так как $(1 - \delta)^N = 0,1$). На микродеформации будет потеряна доля энергии ϵ , равная $\epsilon = 1 - (1 - \delta)^n = 0,07$ от первоначальной. Подобные изменения невелики, но вполне различимы на фоне естественных флуктуаций излучения лазера, наводок или скачков питания. В технике связи они несущественны, поскольку амплитуда сигнала не несет передаваемой информации. Приведенные соотношения носят качественный характер, так как отражение отражению рознь; доля энергии, теряемой на каждом отражении, зависит от угла α , сокращаясь при его уменьшении.

Более эффективно использование в качестве источника информации такого параметра, как фаза колебаний. Излучаемая лазером длина волны $\lambda = 1550$ нм измеряется в вакууме. В кварце она сокращается в n раз (n — коэффициент преломления кварца, $n = 1,5$) и составляет $\lambda_{\text{КВ}} = \lambda/n = 1550/1,5 = 1000$ нм. Удлинение оптоволоконка на средней микродеформации (рис. 2.5.16а) оценивается величиной $\Delta l = \gamma r - l = 8a^2/3l = 27$ мкм. В единицах длины волны $\lambda_{\text{КВ}}$ удлинение составит $\Delta l/\lambda_{\text{КВ}} \approx 30$. Этого более чем достаточно для его фиксации, так как сдвиг фаз всего на половину длины волны $\lambda_{\text{КВ}}/$

2 меняет черное на белое, а белое на черное в интерференционной картине, с помощью которой наблюдается данный сдвиг.

Для измерения разности фаз необходимы два луча, один из которых претерпевает обнаруживаемую задержку, а второй является опорным для получения интерференционной картины. Оба луча могут проходить через чувствительные световоды, лишь бы деформации не были идентичными. Три основных метода обнаружения микродеформаций отличаются способом задания опорного луча. Они носят названия двухлучевой интерференции, межмодовой интерференции и пространственной интерференции.

Метод двухлучевой интерференции (или просто интерференционный) состоит в расщеплении излучения лазера на два идентичных луча (полупрозрачным зеркалом). Оба луча проходят через одинаковые световоды двух кабелей, разнесенных в пространстве. После прохождения световодов лучи направляются на общий фотоприемник, который фиксирует изменение интерференционной картины, связанное с деформацией одного из кабелей относительно другого.

Метод межмодовой интерференции заключается в фиксации изменений интенсивности одних мод излучения относительно других. Все моды генерируются одним лазером и проходят через общий многомодовый оптоволоконный кабель. Метод позволяет отсеивать помехи, проявляющиеся в виде синхронного изменения всех мод, связанные с нестабильностью излучателя или другими факторами общего характера.

Метод пространственной интерференции также использует в качестве опорных и измерительных лучей различные части излучения, прошедшего через многомодовый световод. В ходе распространения по оптоволоконку луч расщепляется на составляющие, которые приходят на фотоприемник по разным траекториям. На выходе оптоволоконка автоматически формируется интерференционная картина, для регистрации которой необходим специальный пространственно-чувствительный фотоприемник (наподобие того, который используется в лазерной мыши).

И все же основной источник помех и ложных срабатываний находится не в лазере и не в оптоволоконке. Он общий для всех вибрационных СО и связан с естественными источниками колебаний — ветром, животными, птицами. В борьбе с ними полезны хорошо зарекомендовавшие себя общеприменимые методы фильтрации электрических сигналов.

Оптоволоконные СО, как и большинство протяженных вибрационных, допускает четыре варианта установки: на полотне забора в несколько рядов в верхней части; на подвижном козырьке или колючей ленте, располагаемых по верху ограждения; в земле под забором против подкопа; в грунте против наступания на землю. В последнем случае кабель закапывается на небольшой глубине около 10 см параллельными линиями через 0,2...0,4 м общей шириной полосы несколько метров, а повышению чувствительности способствуют металлические или пластиковые решетки или сетки, накладываемые снизу и сверху на чувствительный кабель.

Типичное оптоволоконное СО монтируется на забор и характеризуется следующими показателями: длина чувствительного кабеля — 1...5 км (до 30 км); напряжение питания — 10...30 В; потребляемая мощность — 2...3 Вт (на 2 км); наработка на отказ — 70000 часов; время восстановления оптоволоконного кабеля — 1 час; стоимость аппаратуры в расчете на один метр охраняемого забора (при общей длине 1,5...5 км, без стоимости монтажа) — 200...600 (7...20 \$/м); погонная стоимость чувствительного оптического кабеля — 70...140 руб/м.

Основные достоинства оптоволоконных СО:

- абсолютная нечувствительность к любым электромагнитным полям и помехам;
- стойкость к внешним воздействиям, высокой и низкой температуре, ударам, химическим реагентам, повышенной влажности; кварц не подвержен старению или деградации; срок службы стандартного оптоволоконного кабеля составляет более 20 лет; есть кабели, рассчитанные на постоянную работу в морской воде;
- пассивный принцип действия; отсутствие собственного электромагнитного излучения ЧЭ;
- большая длина рубежа в связи со слабым затуханием сигнала в оптическом кабеле;

- произвольная форма рубежа; кабель легко гнется, принимая необходимую форму;
- низкое энергопотребление, удельная стоимость, затраты на обслуживание;
- простота монтажа;
- возможность передачи сигналов от камер видеонаблюдения по свободным световодам в оптоволоконном кабеле, идущем вдоль всего охраняемого забора; система видеонаблюдения интегрируется в систему охранной сигнализации без значительных дополнительных затрат;
- электробезопасность.

Главные недостатки оптоволоконных СО:

- низкая чувствительность на жестких заборах;
- сложность ремонта или восстановления оптоволоконного кабеля в случае его повреждения; сварка кабеля в полевых условиях на ветру и морозе требует не только дорогостоящего оборудования, но и соответствующего опыта и квалификации;
- потеря чувствительности при повреждении защитной оболочки кабеля за счет проникновения влаги.

2.6. Сейсмические СО

В основе работы сейсмического СО лежит фиксация колебаний грунта, возникающих под действием отдельных шагов человека. Сейсмическое СО может называться также сейсмическим датчиком или геофонным извещателем. Оно является полностью пассивным и внешним, так как устанавливается непосредственно в землю.

Типичный чувствительный элемент СО данного типа — сейсмометрический датчик (геофон). Подобные датчики широко используются в сейсморазведке при зондировании недр земли. Они характеризуются высокой чувствительностью, стабильностью параметров и невысокой ценой. Геофон представляет собой небольшой цилиндр диаметром 20...60 мм и высотой 30...70 мм (рис. 2.6.1). На нижнем основании цилиндрического корпуса жестко закреплен заостренный наконечник

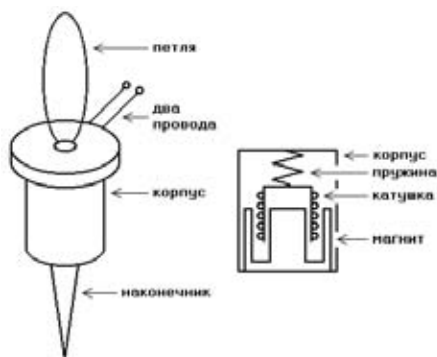


Рис. 2.6.1 Геофон

длиной 40...70 мм, обеспечивающий надежный механический контакт с грунтом. Геофон втыкается в дно вырытой ямки и засыпается землей с последующим легким утрамбовыванием. На корпусе сейсмоматчика имеется проволочная петля, позволяющая при необходимости выдернуть его из земли как морковку.

По своему принципу действия геофон подобен динамическому микрофону. Внутри алюминиевого корпуса находится кольцеобразный магнит. В зазоре между полюсами магнита свободно перемещается легкая катушка, которая воспринимает внешние колебания. Пружина удерживает катушку в начальном равновесном положении. Специальный демпфер гасит собственные колебания катушки, препятствуя возникновению колебаний на резонансной частоте датчика. При движении катушки в постоянном магнитном поле в ней наводится ЭДС, прямо пропорциональная скорости перемещения катушки. Таким образом, геофон является датчиком виброскорости. В зависимости от ориентации катушки внутри датчика он может регистрировать вертикальные или горизонтальные колебания. Датчик с тремя взаимно перпендикулярными катушками воспринимает колебания вдоль каждой из трех координатных осей. Соответствующие сейсмоматчики называются вертикальными, горизонтальными или трехкоординатными. Наиболее распространены геофоны вертикального типа.

Сейсмоматчик является точечным ЧЭ. Он устанавливается в грунт на глубину не менее 0,1 м (против слу-

чайного повреждения) и не более 0,4 м (чтобы избежать излишних земляных работ, не обеспечивающих какого-либо выигрыша). Радиус ЗЧ одного геофона в значительной степени зависит от типа грунта и может составлять от нескольких метров в мягком грунте до нескольких сотен метров в жестком скальном. Множество точечных ЧЭ можно превратить в один линейный, соединив их последовательно и установив на расстоянии менее диаметра ЗЧ (3...10 м) друг от друга. В одну линию (гирлянду или косу) длиной до 120 метров можно объединить до 40 геофонов.

Описание физической модели обнаружения сейсмического СО необходимо начать с анализа сейсмических волн и типов грунтов. Сейсмические волны представляют собой упругие колебания, распространяющиеся в земле от точек ударов, взрывов, землетрясений и тому подобных воздействий. Они характеризуются амплитудой колебаний и скоростью распространения. Сейсмические волны делятся на объемные и поверхностные. Объемные волны распространяются равномерно во все стороны, поверхностные – вдоль границы земли с воздухом. Интенсивность объемных волн убывает пропорционально квадрату расстояния от источника; интенсивность поверхностных – пропорционально первой степени расстояния. Объемные волны, в свою очередь, делятся на продольные (Р) и поперечные (S), а поверхностные – на волны Рэлея (R) и Лява (L).

В продольных волнах частички грунта совершают колебания вдоль направления распространения волны. Скорость волн данного типа составляет $v_p = (E/\rho)^{1/2}$, где E – модуль упругости среды, ρ – ее плотность. В поперечных волнах частички грунта совершают колебания перпендикулярно направлению распространения волны. Скорость поперечных волн равна $v_s = (G/\rho)^{1/2}$, где G – модуль сдвига. Она всегда меньше скорости v_p . Отношение v_p/v_s составляет в среднем 2 и может меняться от 1,5 для плотных скальных пород до 3 для рыхлых песчаных. Объемные волны распространяются от очагов землетрясений или взрывов.

От мест воздействия различных объектов на грунт распространяются поверхностные волны – Рэлея и

Лява. Волна Лява – поперечная горизонтальная; ее скорость v_L меньше, чем скорость объемных продольных и поперечных. В волнах Рэлея частицы грунта совершают колебания в вертикальной плоскости, проходящей вдоль направления распространения волны. Траектория колебания представляет собой эллипс, большая полуось которого вертикальна, а малая – горизонтальна. Скорость волны Рэлея v_R меньше скоростей волн всех других типов: продольных, поперечных и Лява. Она составляет $v_R = 0,92v_L$. Амплитуда поверхностных волн весьма быстро убывает с глубиной, поэтому они и распространяются вдоль границы земли и воздуха. Глубина их проникновения составляет $l = (0,3...0,5)\lambda$, где λ – длина волны. Таким образом, значительная часть энергии колебаний, производимых идущим человеком, сосредоточена в узком поверхностном слое земли. Реальные сейсмические волны обычно представляют собой сложную комбинацию элементарных объемных и поверхностных волн, с трудом выделяемых в чистом виде, поэтому далее возможен чисто качественный анализ ситуации.

Основные сейсмические свойства грунтов представлены в таблице 2.6.1. Здесь же для сравнения приведены свойства других сред – воздуха, воды и льда. Грунты характеризуются широким разбросом плотностей и скоростей распространения сейсмических волн.

Амплитуда колебаний по мере распространения поверхностной волны убывает пропорционально корню квадратному из расстояния, в связи с распределением энергии волны по окружности возрастающего радиуса. Однако, кроме этого, часть энергии необратимо рассеивается на деформацию грунта, что учитывается коэффициентом поглощения γ . При этом амплитуда колебаний при прохождении расстояния x пропорциональна $\exp(-\gamma x)$. Коэффициент поглощения возрастает с ростом пористости и влажности грунтов. Плотные скальные породы обладают $\gamma = (10^{-5}...10^{-3})$ 1/м, рыхлые осадочные – $\gamma = (10^{-3}...0,5)$ 1/м. Это означает, что амплитуда колебаний в болотистой почве может уменьшаться в $e = 2,7$ раз при прохождении всего двух метров.

Таблица 2.6.1 Сейсмические свойства грунтов

Тип грунта (среды)	ρ , кг/м ³	E , Па	v_p , м/с	v_s , м/с
Воздух			300...360	0
Вода			1430...1590	0
Лед			3000...4000	
Почвенный слой	$(1,2...1,8) \times 10^3$		200...800	
Песок, гравий, щебень	$(1,4...2,0) \times 10^3$		100...1000	
Глина	$(1,6...2,4) \times 10^3$		1200...2500	
Осадочные породы	$(1,9...2,9) \times 10^3$	$(2,5...12) \times 10^{10}$	1500...6000	500...3000
Средний супесчано-суглинистый	$(1,7...1,8) \times 10^3$		500...700	250...350
Известняк	около $2,5 \times 10^3$	около 4×10^{10}	3000...6000	
Песчаник	$(2,2...2,7) \times 10^3$	около $1,8 \times 10^{10}$	1500...4000	
Средний скальный	$(2,1...2,3) \times 10^3$		2000...2800	1000...1400
Магматические породы	$(2,5...3,3) \times 10^3$	$(5...30) \times 10^{10}$	4900...10000	
Гранит	$2,7 \times 10^3$	около 5×10^{10}	4500...6500	3000
Базальт	3×10^3		5000...7000	

Таблица 2.6.2 Максимальные значения шума

Тип шума	Смещение A , мм	Скорость A_v , мм/с	Ускорение A_w , мм/с ²
В черте города, на удалении от транспорта	0,04	0,1	0,5
Землетрясение 4 балла, 4 марта 1977 г.	0,17	0,42	1,9
На шестом этаже (городская квартира)		1,0	60

Приведенные данные позволяют провести оценку амплитуды колебаний, производимых в грунте от шагов человека. На каждом шаге центр тяжести поднимается на высоту $h = 0,05...0,15$ м (в среднем – на 0,1 м). Энергия, передаваемая на каждом шаге в грунт, составляет $W_{ш} = mgh$, где m – масса человека ($m = 50...200$ кг), g – ускорение свободного падения ($g = 9,8$ м/с²). Средняя плотность энергии волны равна $w = 0,5\rho(A_v)^2$, где A_v – амплитуда скорости колебаний. Полная энергия волны на расстоянии R от места наступания без учета поглощения энергии грунтом составит $W(R) = 2\pi RlvT \times 0,5\rho(A_v)^2$, где T – продолжительность активного контакта ноги с грунтом ($T = 0,1...1,3$ с). Приравняв оба выражения с учетом КПД η ($\eta = 0,02...0,5$ – в зависимости от типа грунта, обуви, наличия травы и т. п.), а также учитывая коэффициент поглощения γ , получим выражение для амплитуды скорости колебаний $A_v = (\eta mgh / (\pi RlvT\rho))^{1/2} \times \exp(-\gamma R)$. Степень убывания амплитуды от R не слишком сильная, что определяет широкую ЗО сейсмического СО и высокий уровень помех от удаленных источников. Полезный сигнал на расстоянии $R = 3$ м имеет среднее значение $A_v = (0,1 \times 70 \times 9,8 \times 0,1 / (3,14 \times 3 \times 3 \times 200 \times 0,4 \times 1700))^{1/2} \times \exp(-0,05 \times 3) = 1,1$ мм/с. Оно вполне может быть измерено доступными средствами. Однако, диапазон изменения полезных сигналов (на том же расстоянии $R = 3$ м) велик; амплитуда может меняться в мягком влажном грунте от $A_v = (0,02 \times 50 \times 9,8 \times 0,05 / (3,14 \times 3 \times 3 \times 100 \times 1 \times 1700))^{1/2} \times \exp(-0,5 \times 3) = 0,07$ мм/с до $A_v = (0,1 \times 200 \times 9,8 \times 0,15 / (3,14 \times 3 \times 1 \times 50 \times 0,1 \times 1500))^{1/2} \times \exp(-0,01 \times 3) = 20$ мм/с, а в плотном скальном грунте от $A_v = (0,02 \times 50 \times 9,8 \times 0,05 / (3,14 \times 3 \times 50 \times 2000 \times 1 \times 2300))^{1/2} \times \exp(-0,001 \times 3) = 0,014$ мм/с до $A_v = (0,5 \times 200 \times 9,8 \times 0,15 / (3,14 \times 3 \times 10 \times 1000 \times 0,1 \times 2100))^{1/2} \times \exp(-0,00001 \times 3) = 2,7$ мм/с.

Столь же велик и диапазон изменения помеховых воздействий. Наиболее точное представление о нем дают сейсмограммы – графические записи колебаний земли, получаемые в ходе контроля за землетрясениями. Подобные записи ведутся в течение длительного времени во многих местах; по ним накоплен большой

опыт. Помеховые колебания земли называются микросейсмами. Их спектр (5...100 Гц) лежит в полосе полезных сигналов. В таблице 2.6.2 представлены типичные данные для максимальных значений шума в течение нескольких минут, взятые из записей, проведенных в Москве. Землетрясение в 4 балла отчетливо выделяется на сейсмограмме, хотя многие люди его даже не заметили. Записи проводятся с целью обнаружения землетрясений, поэтому для них выбираются тихие места, удаленные от транспортных потоков и других источников сейсмических помех. Близкие значения будут характерны и для других городов. Сравнение оценок амплитуд колебаний от полезных и помеховых воздействий показывает, что удовлетворительные значения отношения сигнал/шум могут быть достигнуты только вне города.

Датчики вибрации весьма разнообразны. Они применяются для изучения и прогнозирования землетрясений, сейсморазведки, контроля сотрясений мостов, зданий, плотин, измерения вибрации различных механизмов. Из всего их многообразия можно подобрать те, которые наиболее подходят для использования в составе сейсмического СО. Такие ЧЭ должны обладать чувствительностью, достаточной для измерения колебаний в диапазонах амплитуды $A = 0,01...10$ мм или скорости $A_v = 0,02...20$ мм/с или ускорения $A_w = 0,2...200$ мм/с². Параметры некоторых близких по характеристикам датчиков приведены в таблицах 2.6.3 (пьезоэлектрические) и 2.6.4 (электродинамические). Пьезоэлектрические датчики по сравнению с электродинамическими работают в более широком диапазоне частот (0,15...10000 Гц), но они менее чувствительны (без усилителя – 0,1...1 мВ/(м/с²)) и обладают большим уровнем собственных шумов. Наиболее подходящие ЧЭ – электродинамические СВ-5 или СВ-10. При сравнительно небольшой цене (около 600 рублей) они обладают удовлетворительными характеристиками. Коэффициент затухания 0,5...0,6 обеспечивает гранично апериодическое затухание собственных колебаний, то есть выходной сигнал геофона не имеет «хвостов» на резонансной частоте датчика.

Таблица 2.6.3 Пьезоэлектрические датчики вибрации

Название	Диапазон A_w , мм/с ²	Диапазон частот, Гц	Чувствительность	Напряжение питания, В	Размеры, мм
DVA-1-1-1 (НПП «ТИК»)	0,2...160	3...6300	0,05 мА/(м/с ²)	10...24	61×42×56
AP99 (ЗАО «ЗЭТ»)	до 10000	1...5000	50 мВ/(м/с ²)	18...30	d21×26
AP46 (ЗАО «ЗЭТ»)	до 10000	5...700	110 мВ/(м/с ²)		d66×78
AP2050 (ГлобалТест)	до 8000	0,5...5000	62 мВ/(м/с ²); шум 0,012 мВ	18...30	d24×33
AP99 (ГлобалТест)	до 10000	0,5...5000	50 мВ/(м/с ²)	18...30	d21×26
ОДУ (Элпа)	0,01...10000	1...100	120 мВ/(м/с ²); шум 0,01 мВ	5	80×12×8

Таблица 2.6.4 Электродинамические датчики вибрации (геофоны)

Название	Резонансная частота, Гц	Коэффициент затухания	Чувствительность, В/(м/с)	Сопротивление, Ом	Размеры, мм
Classic 2000	14	0,18	19	300	d29×100
GS-20DX (г.Уфа)	10	0,7	28		d25,4
СВ-5	5	0,55	32	280	d52×145
СВ-10	10	0,55	18	285	d54×116
СВ-20	20	0,55	18	280	d42×102
СГ-10	10	0,55	20	260	50×52×95

Зная примерные уровни колебаний земли от различных источников, можно оценить значения сигналов на выходе сейсмодатчика. Возьмем в качестве ЧЭ геофон СВ-10. При чувствительности 18 В/(м/с) на его выходе будут присутствовать электрические сигналы следующей величины: средний сигнал от человека на расстоянии 3 м составит $U = 0,0011 \times 18 = 0,02$ В; диапазон изменения полезных сигналов на расстоянии 3 м – $(0,00007...0,02) \times 18 = (0,0013...0,36)$ В; уровень помех – до 0,0018 В. Закопав датчик в землю острием вниз, подключим его ко входу осциллографа и сделаем несколько шагов. Будем наблюдать сигналы на выходе геофона. Форма сигнала от отдельного удара по поверхности грунта имеет следующий вид (рис. 2.6.2). Сначала идет резкое нарастание до максимального значения, называемое атакой; затем – медленное колебательное убывание. Период колебаний составляет 0,03...0,05 с. Их наличие связано не с собственными колебаниями датчика (10 Гц), а с фильтрующими свойствами грунта. Собственная частота почвенного слоя составляет 20...30 Гц; в мягком влажном болотистом грунте она уменьшается до 5...10 Гц; в жестком плотном скальном – увеличивается до 100...200 Гц. Полная длительность сейсмоимпульса составит 0,1...0,3 с (3...10 периодов). Амплитуда импульсов по мере приближения человека к геофону возрастает, но не монотонно, а хаотически: амплитуда может сначала увеличиваться, затем слегка уменьшаться и далее вновь продолжать расти.

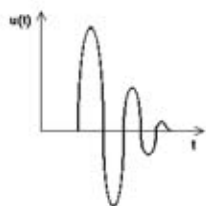


Рис. 2.6.2 Форма сейсмосигнала

Полученные данные позволяют сформировать алгоритм работы сейсмического СО (рис. 2.6.3). Прежде всего, резонансная частота ЧЭ не должна превышать 10...20 Гц. Сигнал с выхода ЧЭ необходимо усилить примерно в 10000 раз (для обнаружения на расстояниях 3...5 м). Этой цели служит усилитель У. Сигнал с его выхода поступает на фильтр Ф с полосой пропускания от 5...10 до 40...100 Гц. Сохранять более высокие частоты нецелесообразно, так как вряд ли удастся закопать геофон в скальный грунт. Находящийся далее детектор огибающей ДО сглаживает колебания, преобразуя за-

тухающие синусоиды в отдельные положительные импульсы. Компаратор К с порогом по амплитуде величиной в несколько вольт и по длительности 0,1 с формирует цифровые импульсы в ответ на каждый шаг. Накопитель Н вырабатывает сигнал тревоги при поступлении от нескольких единиц до нескольких десятков импульсов в течение 20...60 секунд. РТ формирует сигнал срабатывания. Изменение порога компаратора регулирует чувствительность датчика. СО не будет нуждаться в ручной регулировке, если заменить компаратор с набором фиксированных порогов на компаратор с плавающим порогом, величина которого пропорциональна уровню шума.



Рис. 2.6.3 Сейсмическое СО

Блок-схема (рис. 2.6.3) допускает десятки различных вариантов реализации в виде электронных схем. Один из них выполнен на четырех аналоговых и пяти цифровых микросхемах (рис. 2.6.4). Сигнал с геофона СВ-10 поступает по экранированному кабелю на первый каскад усиления на микросхеме DA1.1. Его коэффициент усиления равен $K = (1 + R4 / R5) \times (R3 / R1) = 100$. Одновременно каскад служит фильтром нижних частот с частотой среза $f = 1 / (2\pi R3C2) = 70$ Гц. Входные элементы С1, R1 отфильтровывают постоянную составляющую сигнала и фликкер-шумы в диапазоне частот до одного герца.

Второй каскад усиления на элементах DA1.2, С3, С4, R6...R11 поднимает уровень сигнала еще в 30 раз $(30 = (1 + R10 / R11) \times (R9 / R7))$. Он же выполняет функцию полосового фильтра от $f_H = 1 / (2\pi R6C3) = 5$ Гц до $f_B = 1 / (2\pi R9C4) = 70$ Гц.

Коэффициент усиления третьего каскада регулируется переменным резистором R16 в пределах $K = (1 + R16 / R17) = 1...10$. Регулировка позволяет увеличивать или уменьшать радиус зоны чувствительности датчика и оптимизировать его параметры под тип грунта. Регулировка проводится один раз во время установки СО. Третий каскад проводит окончательную фильтрацию сигналов в полосе от $f_H = 1 / (2\pi R12C5) = 10$ Гц до $f_B = 1 / (2\pi R15C6) = 40$ Гц.

Усиленные сигналы от каждого шага человека имеют вид двухполярных периодических затухающих импульсов. Чтобы выделить отдельный импульс от каждого шага, необходим детектор огибающей. Он состоит из двухполупериодного выпрямителя, на выходе которого – абсолютная величина (модуль) входного сигнала.

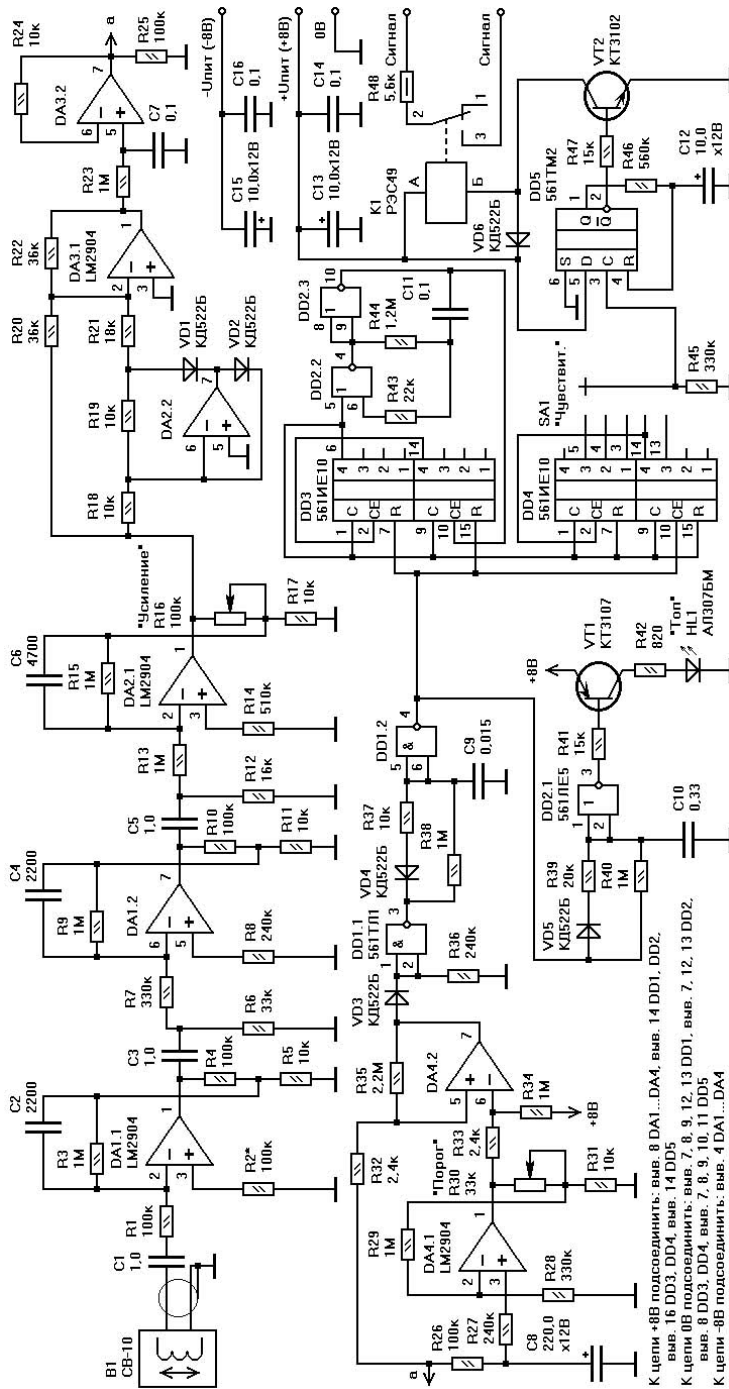


Рис. 2.6.4 Сейсмическое СО

ла, и сглаживающего фильтра. Абсолютную величину формирует каскад на элементах DA2.2, DA3.1, VD1, VD2, R18...R22. Принцип его работы основан на суммировании исходного сигнала с удвоенной обращенной отрицательной составляющей. В отличие от однодiodного выпрямителя, данный каскад допускает работу с сигналами меньше 0,6 В. Сигнал на выходе DA3.1 представляет собой частоток из положительных импульсов с периодом 12...50 мс (если исходная частота лежит в пределах 10...40 Гц). Сглаживающий фильтр (ФНЧ) на элементах R23, C7 с постоянной времени $\tau = R23C7 =$

0,1 с превращает сигнал от каждого шага в единый непрерывный импульс плавной формы. Повторитель на элементах DA3.2, R24, R25 обеспечивает независимость работы предыдущих и последующих каскадов.

Далее следует компаратор с плавающим порогом. Сигнал на выходе DA3.2 в дежурном режиме представляет собой выпрямленный и слегка сглаженный сейсмический шум; при появлении людей к шуму добавляются положительные импульсы от шагов. Уровень шума постоянно меняется, он растет при увеличении скорости ветра, возрастании интенсивности дождя, проезде автомобилей, раскатах грома. Сигнал с выхода DA3.2 поступает на компаратор DA4.2 и при каждом превышении порога на выходе последнего формируется положительный импульс. Если на опорный вход компаратора (вывод 6 DA4.2) подать постоянный уровень, то при низком уровне неизбежны ложные срабатывания, а при высоком – пропуски импульсов.

Чтобы избежать ручной подстройки уровня порога при каждом изменении погодных условий, вводится схема адаптивного (плавающего) порога, который автоматически отслеживает текущий уровень помех и устанавливает порог пропорционально этому уровню. Схема адаптивного порога реализована на элементах DA4.1, C8, R26...R31. Сигнал шума с выхода DA3.2 усредняется цепочкой R26, C8 с большой постоянной времени ($\tau = R26C8 = 20с$). Средний уровень шума усиливается каскадом на DA4.1 в $K = (1 + R30 / R31) \times (R29 / R28) = 3...12$ раз. Изменяя коэффициент усиления, можно менять относительный уровень порога, а следовательно, – размеры зоны чувствительности датчика. Сохраняя постоянным отношение порог/шум, мы поддерживаем на неизменном уровне величину частоты ложных срабатываний от данного шума. Поэтому алгоритм с плавающим порогом относится к классу алгоритмов, которые так и называются – алгоритмы с постоянной частотой ложных срабатываний (ПЧЛС).

Усредненный и усиленный уровень шума подается на опорный вход компаратора (вывод 6 DA4.2). Резистор R34 обеспечивает постоянное небольшое положительное смещение уровня порога на 20 мВ на случай снижения шума до нуля. Резистор R35 задает гистерезис компаратора величиной около 10 мВ. Итак, в ответ на каждое резкое возрастание сейсмического сигнала (в том числе и помеховое) на выходе DA4.2 наблюдается положительный импульс, но только человек производит серию импульсов. Каждое его наступание на грунт будет сопровождаться отдельным импульсом. Наступание удобно обозначать слегка простонародным, но удобным и понятным словом «топ».

Элементы VD3, R36, DD1.1 переводят импульсы в цифровую форму. Каскад на элементах VD4, R37, R38, C9, DD1.2 нормализует импульсы, устраняя возможные кратковременные (длительностью менее 10 мс) просечки вблизи фронтов.

Импульсы топов расширяются цепочкой VD5, R39, R40, C10, DD2.1 до длительности $\tau = 0,7R40C10 = 0,2$ с, чтобы наблюдать вспышки светодиода HL1 в ответ на каждый шаг человека. Сигналы для индикации усиливаются транзистором VT1. Наличие визуальной информации позволяет легко настраивать СО в реальном времени резисторами R16 и R30 так, чтобы обеспечивать необходимый радиус зоны чувствительности при передвижении человека. При отсутствии людей светодиод HL1 должен вспыхивать не чаще одного раза за 30...300 с.

Чтобы обеспечить высокую помехоустойчивость, импульсы топов с выхода DD1.2 поступают на накопитель 4...64-х импульсов в течение интервала времени 20 с. Накопитель выполнен на микросхемах DD3, DD4, DD2.2, DD2.3. Счетчик DD3 задает двадцатисекундный интервал сигналом низкого уровня на выводе 6. В исходном состоянии на нем – высокий уровень, который останавливает счетчик DD3 и устанавливает в ноль счетчик DD4. Импульсы топов с выхода DD1.2 сбрасывают счетчик DD3. В результате запускается генератор на элементах DD2.2, DD2.3, R43, R44, C11 с периодом $T = 1,4R44C11 = 0,17$ с. Счетчик DD3 подсчитывает 128 импульсов, задавая тем самым интервал времени $128 \times 0,17 = 20$ с, отсчитываемый от последнего импульса.

Счетчик DD4 подсчитывает количество топов в течение заданного интервала времени. Переключатель SA1 изменяет чувствительность датчика, устанавливая количество N импульсов, требуемое для формирования сигнала срабатывания, из ряда фиксированных значений $N = 4, 8, 32, 64$. Большее значение N обеспечивает меньшую вероятность ложной тревоги, но оно должно соответствовать реально ожидаемому количеству топов в заданном месте установки.

Фронт сигнала с выхода DD4 запускает одновибратор на элементах DD5, R46, C12. Он задает длительность сигнала $T = 0,7R46C12 = 4$ с. В дежурном режиме транзистор VT2 открыт, обмотка реле K1 находится под напряжением, сигнальная линия замкнута через контакты 2 и 3 реле. На время сигнала срабатывания транзистор VT2 закрывается, обмотка реле обесточивается и сигнальная линия обрывается.

Общее представление о сейсмическом СО дают следующие усредненные характеристики: тип СО – внешнее пассивное; длина охраняемого рубежа – до 300 метров; среднее расстояние между геофонами – 6 метров; наработка на ложную тревогу – 100 часов; напряжение питания – 20...30 вольт; потребляемый ток – 30...60 мА; диапазон рабочих температур – минус 50... плюс 50 °С; цена – 60...90 тыс. руб. или 200...300 руб/м (около 10 \$/м).

Основные достоинства сейсмических СО:

- полная визуальная маскируемость в совокупности с пассивным принципом действия;
- произвольная форма рубежа охраны;

– простота настройки и обслуживания.

Главные недостатки сейсмических СО состоят в следующем:

- низкая помехоустойчивость в связи с широкой ЗО и обилием помеховых факторов; помехоустойчивость снижается, например, во время сильного ветра при наличии деревьев или вблизи от шоссе дорог;
- трудоемкий монтаж в связи с необходимостью рытья траншеи; при установке сейсмодатчиков должен быть обеспечен надежный контакт с грунтом;
- необходимость тщательной герметизации геофонов в расчете на их длительную работу, так как грунт легко намокает во время дождя или весеннего таяния снега;
- низкая чувствительность в рыхлом песчаном или вязком болотистом грунте.

Одно из сильнейших направлений создания помехоустойчивых алгоритмов дает метод отношения правдоподобия. Применим его к задаче обнаружения одиночного нарушителя. Шаги человека отличаются периодичностью. Даже в условиях неровной местности, периодичность поддерживается в пределах единиц процента. Если человек идет один, то измерив время между двумя соседними топками, следует ожидать последующего топа в узком интервале времени – ни раньше, ни позже. И если он появляется в этом интервале, – наличие человека подтверждается, а если нет – снимается. Накопление информации в течение нескольких шагов делает алгоритм практически безошибочным.

Средний период T между шагами человека изменяется от 0,23 с (быстрый бег) до 1,0 с (медленный шаг). В серии шагов отклонения от среднего значения незначительны. Если человек передвигается один, то плотность вероятности распределения промежутков времени t между импульсами «топов» на выходе сейсмического СО имеет общий вид: $w_s(t) = \alpha / (2\pi\sigma^2)^{1/2} \times \exp(-(t-T)^2 / 2\sigma^2) + (1-\alpha) / (8\pi\sigma^2)^{1/2} \times \exp(-(t-2T)^2 / 8\sigma^2)$. Первое слагаемое относится к интервалам с периодом T, второе – к интервалам с периодом 2T, когда очередной топ случайно выпадает из последовательности. Величина вероятности α характеризует долю интервалов, близких к среднему значению T. Значения вероятности $\alpha = 0,7...0,9$ и среднеквадратического отклонения $\sigma = 0,03...0,09$ с меняются в зависимости от типа геофонов, их количества и степени неровности местности. Считая, что помеха – это любой объект, кроме одиночного человека, плотность вероятности распределения промежутков времени t составит для нее $w_p(t) = 1/T_{\max}$, где $T_{\max} < 2 \times 1 + 6 \times 0,09 < 2,6$ с. Оптимальный алгоритм, обеспечивающий минимальную вероятность ложной тревоги при любой заданной вероятности обнаружения, определяется методом отношения правдоподобия:

$$\ln\left(\prod_{i=1}^N \frac{w_s(t_i)}{w_p(t_i)}\right) = \sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{w_s(t_i)}{w_p(t_i)}\right) > \lambda$$

где t_i – последовательность измеряемых интервалов, i – номер интервала, N – их количество, λ – величина

порога. Для средних значений $\alpha = 0,8$, $\sigma = 0,06$ с функция логарифма отношения правдоподобия преобразуется к виду $W(t) = \ln(w_s(t) / w_p(t)) = \ln(13,83 \times \exp(-139(t-T)^2) + 1,73 \times \exp(-35(t-2T)^2))$. Алгоритм в окончательном виде состоит из следующих операций. По первым шагам проводится оценка величины T , затем после появления каждого нового импульса определяется длительность последующего интервала t_i и соответствующее значение функции $W(t_i)$; получаемые значения суммируются, а сумма сравнивается с порогом. При превышении порога λ формируется сигнал тревоги. Увеличение порога ведет к сокращению числа лож-

ных тревог, но и вероятность обнаружения также уменьшается. Вид функции $W(t)$ показан на рисунке 2.6.5. Приведенный алгоритм относится к числу интеллектуальных, для его реализации требуется микропроцессорный блок обработки.

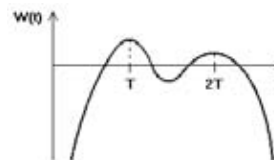


Рис. 2.6.5 Функция логарифма отношения правдоподобия

2.7. Термические СО

Термические СО реагируют на значительное повышение температуры охраняемого предмета, вызванное применением электросварки, газовых или плазменных горелок. Термические СО называются также (и в основном — так как они заимствуются из техники противопожарной охраны) тепловыми извещателями, реже — температурными датчиками. Они устанавливаются на стальные двери, решетки, люки, перегородки или сейфы, которые могут подвергаться действию термического инструмента взлома.

Принцип действия термического СО чаще всего основан на использовании перемычек из легкоплавких сплавов, переходящих в жидкое состояние при относительно невысокой температуре. Наиболее распространенные сплавы — это сплав Розэ (температура плавления около 90°C , точное значение температуры зависит от процентного состава компонентов сплава) и сплав Вуда (около 65°C). В результате плавления перемычки происходит размыкание электрической цепи, которое регистрируется контрольным пультом. Термический датчик является точечным, поэтому его можно устанавливать только на металлические поверхности, обладающие высокой теплопроводностью, так как маловероятно, что в процессе резки взломщик попадет именно на место установки датчика. Кроме того, датчик должен иметь хороший тепловой контакт с защищаемым предметом.

Основными достоинствами термических СО являются:

- исключительная дешевизна; СО состоит всего лишь из двух контактов и застывшей капли легкоплавкого элемента между ними; цена типичного теплового извещателя (ИП103-3-А2-1М, ИП103-5/1) не превышает 30...40 рублей;
- высокая помехоустойчивость независимо от места установки; в помещении или на улице практически нельзя найти мест, где температура в естественных условиях поднимается выше $60...80^\circ\text{C}$; там же, где бывает более высокая температура (литейные цеха, прокатные станы), — там не хранятся ценности и вора туда пряником

не заманишь; вторая составляющая высокой помехоустойчивости — ограниченная ЗО точечного СО;

- пассивный принцип действия; термическое СО незаметно и никому не мешает;
- отсутствие необходимости в источнике питания; полное сохранение работоспособности при сбоях в электрической сети;
- механическая прочность;
- небольшие размеры и сопутствующая им легкость монтажа;
- простота в эксплуатации и обслуживании; необходима лишь периодическая проверка СО.

Главные недостатки термических СО:

- ограниченная область использования; возможность обнаружения только небольшой части инструментов взлома, использующих термическую резку металла;
- необратимый процесс срабатывания СО; после плавления перемычки СО невозможно восстановить, оно нуждается в замене (впрочем, вместе с той дверью, на которой оно стояло);
- отсутствие ДК; необходимость периодической проверки датчиков вручную, что может требовать больших усилий, так как решетки и люки обычно находятся в труднодоступных местах.

Тепловые извещатели в силу своей специфики используются в охранной сигнализации редко, причем только самые простейшие, основанные на легкоплавких сплавах. Тем не менее, следует упомянуть еще пять типов тепловых извещателей, которые также могут применяться для обнаружения повышенной температуры:

- датчики с биметаллическими пластинами представляют собой две скрепленные вместе пластины с различными температурными коэффициентами расширения (наподобие терморегулятора в утюге); при повышении температуры биметаллическая пластина изгибается и замыкает внешнюю электрическую цепь;
- термопары генерируют термоэлектродвижущую силу, пропорциональную разности температур;

- электрический сигнал с термопары усиливается и сравнивается с заданным порогом;
- полупроводниковые термочувствительные элементы — терморезисторы — включаются в цепи резистивных делителей; при повышении температуры их сопротивление падает, что и фиксируется блоком обработки; напряжение р-п-перехода любого биполярного диода или транзистора при его прямом смещении также зависит от температуры;
- магнитные датчики состоят из геркона, магнита и ферритовой магнитной системы между ними;

благодаря магнитной системе на геркон действует поле магнита и его контакты замкнуты; если температура повышается сверх точки Кюри используемого феррита (обычно около 70°C), значение его относительной магнитной проницаемости μ резко падает и контакты геркона размыкаются;

- бесконтактные (пирометрические) датчики, определяющие температуру удаленного объекта по интенсивности исходящего от него излучения.

2.8. Шаговые СО

Принцип действия шагового СО основан на измерении сопротивления грунта. Сделав шаг и опираясь одновременно на обе ноги, человек уменьшает это сопротивление, замыкая часть тока на себя. Хотя уменьшение невелико, его периодичность с частотой шагов является информативным признаком, достаточным для активации сигнала тревоги. Шаговое СО не имеет распространения в связи с широким разбросом параметров грунтов и человека и вытекающей отсюда низкой помехоустойчивостью.

Среднее удельное сопротивление грунта равно $\rho = 50 \dots 500 \text{ Ом} \times \text{м}$ (табл. 2.8.1). Оно возрастает с уменьшением его влажности. Закопаем в землю две металлические пластины площадью S . Сопротивление между ними составит около $R = 0,5\rho/S^{1/2}$. Если пластина представляет собой штырь длиной 0,5 м и шириной 0,02 м, то его площадь $S = 0,01 \text{ м}^2$. Подобный штырь с заострением на конце легко втыкается в землю, не требуя предварительного выкапывания ямки. Сопротивление между штырями будет около $R = 0,5 \times 160/0,1 = 800 \text{ Ом}$.

Таблица 2.8.1 Среднее удельное сопротивление различных сред

Тип среды	ρ , Ом×м
Земля садовая	50
Глина	70
Суглинок	100
Супесь	300
Песок	500
Вода грунтовая	50
Вода речная	100

Сопротивление тела человека постоянному току находится в пределах от 10 до 500 кОм. Кроме того, свой вклад в шунтирующее сопротивление пары ног дает обувь, и этот вклад может превышать десятки мегаом для сухих резиновых сапог. К счастью, люди не ходят в

сапогах по пустыне, так что можно в качестве оценки принять шаговое сопротивление человека равным $R_{\text{ч}} = 70 \text{ кОм}$. Таким образом, при работе на постоянном токе следует ожидать глубины модуляции полезного сигнала на уровне $m = 0,8/70 = 0,01 = 1\%$, что не так уж плохо, хотя и маловато.

Работа на постоянном токе имеет ряд недостатков. Во-первых, это поляризация электродов и связанный с ней дрейф постоянной составляющей сигналов. Уменьшить влияние поляризации позволяет увеличение напряжения, подаваемого на электроды. Во-вторых, невысокий уровень полезного сигнала по сравнению с его постоянной составляющей; полезный сигнал теряется на фоне фликкер-шумов. Устранение обоих недостатков возможно при переходе на измерение импеданса на переменном токе. Импеданс тела человека на радиочастотах (порядка единиц мегагерц) примерно равен 50 Ом (активная составляющая) с малой реактивной составляющей. Шунтирующее сопротивление человека на данных частотах сравнимо с сопротивлением грунта, в связи с чем шаговое СО становится вполне работоспособным. Дополнительные преимущества дает квадратурная обработка сигналов, когда принимаемый сигнал в одном канале умножается на опорный, а во втором — на опорный сигнал со сдвигом на 90 градусов.

Достоинства шагового СО — простота установки, легкость формирования нужной ЗО (между штырями) и удовлетворительная работа во время дождя — любимой погоды нарушителей. Тем не менее, есть и трудно-преодолимый недостаток — необнаружение бегущего человека, когда в ходе передвижения отсутствует фаза одновременного контакта обеих ног с землей, и ползушего — когда контакт непрерывен. Дополнительные недостатки — ложные срабатывания при резком намокании почвы и пропуски нарушителя при ее высыхании — затрудняют продвижение шаговых СО.

2.9. Барометрические СО

Принцип действия барометрических СО основан на регистрации изменений давления воздуха, возникающих в замкнутом объеме в результате появления или действий нарушителя. Входя в помещение, человек открывает дверь или окно. При этом внутреннее давление в момент открывания слегка изменяется. То же самое происходит во время разрушения внешних дверей, окон, стен или крыши. Устройство датчиков, измеряющих изменение давления, аналогично устройству микрофонов, но работа производится на более низких (по сравнению со звуковыми) частотах. Поэтому барометрические СО называются также инфразвуковыми датчиками или низкочастотными акустическими извещателями.

Барометрические СО допускают два варианта реализации. Первый – он же основной – осуществляет контроль давления во всем объеме охраняемого помещения. Второй контролирует давление в небольшом объеме, располагаемом на пути нарушителя, например между двумя стеклами одного окна. В объеме между стеклами создается повышенное (или пониженное) давление, а сами стекла герметизируются. Поддержание разности давлений не обязательно требует установки компрессора. Для повышения давления достаточно положить между стеклами любую химическую смесь, медленно выделяющую нейтральный газ, например, смесь избытка мела с кислотой; для понижения – смесь, поглощающую кислород. После разбивания стекол давление падает (или возрастает), что регистрируется датчиком, установленным внутри окна. Аналогичный принцип используется для охраны ценных предметов, находящихся внутри стеклянной витрины; при этом вне контролируемого объема также должен быть установлен дополнительный датчик давления, необходимый для непрерывного контроля отсутствия разгерметизации витрины.

Оценим ожидаемые уровни полезных и помеховых сигналов барометрического СО. Воспользуемся статическим приближением, считая, что дверь одновременно сдвигает находящуюся на ее пути порцию воздуха, которая затем равномерно распределяется по всему помещению. Объем V помещения или нескольких смежных комнат, не разделенный промежуточными дверями или перегородками, может находиться в пределах от $V_{\min} = 10 \text{ м}^3$ (небольшая комната) до $V_{\max} = 200 \text{ м}^3$ (большая комната или средний коттедж). Во время открывания двери внутренний объем воздуха изменяется на величину ΔV , пропорциональную площади двери и ее смещению. Дверь вытесняет воздух внутрь или наружу в зависимости от направления ее открывания. Объем, заключенный между начальным и конечным положением двери, составляет $\Delta V = 0,5cb^2h$, где α – угол поворота двери, h – ее высота, b – ширина. Средние параметры двери $h = 2...2,4 \text{ м}$, $b = 0,6...1 \text{ м}$. Если толщина двери равна d ($d = 4...6 \text{ см}$ в зависимости от ее размеров), то следует принять угол поворота равным $\alpha = d / b$. При возрастании угла сверх этого значения

процесс вытеснения воздуха сменяется его обтеканием в обратном направлении вокруг двери. Тогда получим оценку $\Delta V = 0,5dbh = 0,024...0,072 \text{ м}^3$. Поскольку в большом помещении может быть установлена дверь любых размеров, а в небольшом – только маленькая, значение относительного изменения объема находится в пределах $\Delta V/V = 0,00012...0,0024$.

Процесс открывания двери сравнительно быстротечный. Воздух перемещается, не успевая принять температуру окружающих предметов. Такой процесс расширения/сжатия газа называется адиабатическим, а связь объема V и давления p задается уравнением адиабаты $pV^\gamma = \text{Const}$ или $\Delta p/p + \gamma \Delta V/V = 0$, где γ – показатель адиабаты, для двухатомных газов (в том числе воздуха) равный $\gamma = 1,4$, Δp – изменение давления, вызванное изменением объема ΔV . Знак изменения давления всегда противоположен по отношению к знаку изменения объема, он может быть как положительным, так и отрицательным. Величина относительного изменения давления лежит в пределах $\Delta p/p = \gamma \Delta V/V = 0,00017...0,0034$.

Атмосферное давление зависит от высоты над уровнем моря и текущих погодных условий. В Москве оно находится в пределах $p = 700...760 \text{ мм рт.ст.} = 93...101 \text{ кПа}$. Таким образом, абсолютная величина изменения давления при открывании двери составляет $\Delta p = (93000...101000) \times (0,00017...0,0034) = 16...340 \text{ Па}$. Данные изменения происходят быстро, естественные изменения давления протекают гораздо медленнее без резких скачков (исключая смерчи или подобные явления).

Время поворота двери на угол 60° (≈ 1 радиан) можно измерить секундомером. В среднем оно составляет $T_{\text{откр}} = 1,2 \text{ с}$. Поэтому длительность импульса давления $\tau = \alpha \times T_{\text{откр}} = 0,08 \text{ с}$, а полоса частот $f = (0,016...1,6)/0,08 = 0,2...20 \text{ Гц}$. Подводя итог, полезные возмущения оцениваются соотношением $\Delta p = 0,7dbhp / V$ и находятся в пределах $\Delta p = 10...300 \text{ Па}$. Точные решения получают численным интегрированием уравнений газовой динамики (Эйлера).

В качестве основного источника помеховых воздействий выступают естественные изменения атмосферного давления. В течение длительного периода давление может меняться на тысячи паскалей. Но сами изменения происходят медленно. Скорость естественного изменения давления в течение дня редко (раз в сутки или в несколько суток) достигает величины $0,5 \text{ мм рт.ст. за } 10 \text{ минут}$ или $\Delta p/\Delta t = 0,5 \times 133/600 = 0,1 \text{ Па/с}$. В течение более длительного промежутка времени (один год) скорость не выходит за пределы $0,3 \text{ Па/с}$. За время максимальной длительности полезного сигнала ($\approx 1 \text{ с}$) абсолютная величина помехового воздействия не превышает $\Delta p_{\text{пом}} = (0,1...0,3 \text{ Па/с}) \times (1 \text{ с}) = 0,1...0,3 \text{ Па}$. Отношение сигнал/шум для данного вида помеховых воздействий составляет не менее $\Delta p / \Delta p_{\text{пом}} = 30...100$. Большой запас отношения определяет высокую помехоустойчивость барометрического СО.

Наиболее сильные естественные изменения давления внутри замкнутых помещений связаны с изгибом оконных стекол под действием порывов ветра. Они лежат в том же диапазоне частот, что и полезные сигналы. Смещение стекла не превосходит нескольких миллиметров, а скорость смещения $v < 3 \text{ мм} / 1 \text{ с} = 0,003 \text{ м} / \text{с}$. Ей соответствует изменение давления не более $\Delta p = \rho cv = 1,3 \times 330 \times 0,003 = 1,3 \text{ Па}$, где ρ – плотность воздуха, $\rho = 1,3 \text{ кг} / \text{м}^3$, c – скорость звука, $c = 330 \text{ м} / \text{с}$. В случае установки датчика в непосредственной близости от окна отношение сигнал/помеха не превысит $10 / 1,3 = 7$. Установив датчик на удалении нескольких метров от окна, про его влияние можно просто забыть.

Чем же измерять давление? Как обычно, есть три варианта: приспособить какой-либо датчик другого назначения, изготовить ЧЭ самостоятельно или купить готовый датчик. Необходимо соблюсти три основных требования: сверхнизкий диапазон измеряемых давлений (в пределах до сотен паскалей или нескольких мм рт.ст.); регистрация медленных изменений давления; доступность снятия показаний в виде выходного электрического сигнала.

Начнем с простого. Прежде всего в голову приходит мысль о том, чтобы приспособить в качестве датчика обычный настольный барометр. Подсоединить к нему преобразователь смещения в электрический сигнал – и готово. Однако, сколько ни открывай дверь, стрелка барометра не шелохнется, даже если поднести его прямо к двери. И дело здесь не в низкой чувствительности, а в инерционности прибора. Смещение в десятые доли мм рт.ст. можно было бы заметить глазом, но барометр по своей конструкции (а она следует из назначения) регистрирует только медленные установившиеся изменения давления.

Другой вариант измерения скачков давления может быть основан на применении микрофонов или динамиков, включая последние как преобразователи колебаний воздуха в электрический сигнал. Громкоговоритель, благодаря большой площади диффузора, мог бы эффективно воспринимать акустические волны. Однако, главной проблемой здесь является его высокая собственная частота. Известно, что даже специальные низкочастотные динамики – сабвуферы – обладают собственной частотой 20...40 Гц. На меньших частотах эффективность резко падает, а ведь нас интересуют измерения на частотах ниже единиц герц.

То же самое относится и к динамическим микрофонам. Их конструкция препятствует попаданию в выходной электрический сигнал любых помеховых воздействий от ветра, дыхания, которые лежат ниже 20 Гц (а для звуковоспроизведения – это вредные сигналы). Несколько лучше обстоит дело с электретными микрофонами. В связи с их простотой и дешевизной никто всерьез не борется с низкочастотными помехами, возлагая их подавление на электронные фильтры в цепях усиления. Кроме того, легкая мембрана миниатюрного электретного микрофона весьма восприимчива к любым изменениям давления. Простейшие электретные микрофоны можно приспособить под цели измерения скачков давления, но только смирившись с большой

неопределенностью их чувствительности в нестандартном диапазоне частот до нескольких герц.

Следующий вариант получения датчика для барометрического СО – изготовить его самостоятельно. Данный путь требует тщательности, аккуратности и терпения. Датчик состоит из камеры, мембраны и дренажной трубки (рис. 2.9.1). Мембрана отделяет внутренний объем камеры от открытого воздуха, ее изгиб пропорционален разности давлений внутри и снаружи камеры. Дренажная трубка компенсирует медленные изменения атмосферного давления. Камера и трубка должны быть жесткими и герметичными, мембрана – тонкой и подвижной. Дренажная трубка имеет длину в несколько метров, и чтобы сделать ее компактной, необходимо свернуть ее в виде спирали. В случае естественных медленных изменений внешнего давления воздух через дренажную трубку поступает в камеру (или выходит из нее), давление в камере выравнивается с атмосферным, а положение мембраны не меняется. В случае быстрого изменения внешнего давления, сопротивляющегося открыванию двери, давление внутри камеры останется неизменным, а мембрана изогнется внутрь или наружу в зависимости от знака изменения давления. Без дренажной трубки, когда камера полностью герметична, датчик будет неработоспособен, так как диапазон естественных изменений давления (60 мм рт.ст. = 8000 Па) значительно превосходит величину полезного воздействия (10...300 Па). Смещение мембраны пропорционально давлению, оно может быть измерено емкостным способом или с помощью тензорезисторов. Методы расчета мембранных датчиков – те же, что и описанные ранее для ПДД (п. 2.3).

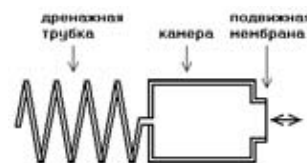


Рис. 2.9.1 Барометрический датчик

Оценим длину дренажной трубки. Для этого воспользуемся соотношением для потока Q газа через круглую трубку длиной l , вызванного разностью давлений Δp на концах трубки: $Q = \pi \Delta p d^4 / 128 \eta l$, где d – диаметр трубки, η – вязкость воздуха, $\eta = 1,7 \times 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Изменение давления воздуха вызывает изменение его объема в камере ΔV , которые связаны соотношением адиабаты $\Delta p / p = \gamma \Delta V / V = 1,4 \Delta V / V$, где p – абсолютное значение давления, V – объем камеры. Если обозначить за T постоянную времени вытекания (или втекания) излишков объема воздуха из камеры, то $\Delta V / T = Q = \pi \Delta p d^4 / 128 \eta l = 1,4 \pi \Delta V p d^4 / 128 \eta l V$. При этом по мере вытекания воздуха разность давлений Δp падает. Постоянная времени выравнивания давлений $T = 91 \eta l V / \pi p d^4$. Длина дренажной трубки $l = \pi T p d^4 / (91 \eta V)$. Для среднего значения давления $p = 99000 \text{ Па}$ получаем окончательно $l = 2 \times 10^8 \times T d^4 / V$. Очевидно, что параметр T должен превышать максимальную длительность полезного сигнала, но должен быть меньше времени

Таблица 2.9.1 Датчики давления

Название	Производитель	Тип ЧЭ	Диапазон давлений, Па	Чувствительность, мВ/Па	Напряжение питания, В	Цена, руб.
KPF010D04	КЕС	Кремниевый мостовой тензорезисторный	0...1000	0,025...0,075		
MPXV5004	Freescale Semiconductor	Пьезорезисторный	0...4000	1		
404327-412	JUMO	Емкостной керамический	0...5000	1	5	
DC025BDC4	Honeywell	Кремниевый мостовой пьезорезисторный	0...2500	2	7...30	1600
SDX005IND4	-----»-----	-----»-----	0...1250	0,016		2100
CPCL04DFC	-----»-----	-----»-----	0...1000	0,03		840
DC001NDC4	-----»-----	-----»-----	0...250	16	5	2000
DUXL05D	-----»-----	-----»-----	0...1250	0,024		820
DUXL10D	-----»-----	-----»-----	0...2500	0,012		770
XCA500.3DN	-----»-----	-----»-----	0...2000	2,5	5	1300
XCAL5010DN	-----»-----	-----»-----	0...2500	2	5	1200
XPCL04DTC	-----»-----	-----»-----	0...1000	0,018		980

естественного изменения атмосферного давления. Для значений $T = 3$ с, $V = 0,001$ м³, $d = 0,001$ м получим длину дренажной трубки $l = 0,6$ м.

Идеальный вариант решения проблемы датчика давления – использование готового. Промышленные датчики давления отличаются разнообразием характеристик, но главное – их основные показатели (чувствительность и диапазон измерения) стабильны и лежат в гарантированных диапазонах. Изготовленное на их основе барометрическое СО не потребует индивидуальной настройки и подгонки.

Большинство промышленных датчиков давления также содержат мембрану, разделяющую два небольших объема. Датчик определяет разность давлений между объемами, фиксируя величину смещения мембраны. Для измерения смещения на нее наносятся четыре пьезорезистора или тензорезистора, включенных по мостовой схеме. Датчики давления бывают двух типов: без усилителя и со встроенным усилителем. Датчики без усилителя обеспечивают выходной сигнал порядка милливольт, они проще и дешевле. Датчики с усилителем дают на выходе сигнал порядка единиц вольт, они дороже и требуют питания усилителя. Жесткость мембраны определяет чувствительность датчика. В основном они рассчитаны на измерение больших давлений.

По виду измеряемого давления датчики делятся на три типа: абсолютные, относительные и дифференциальные. Абсолютные определяют полное давление относительно вакуума (0 Па); с одной из сторон мембраны воздух полностью откачан, к другой стороне подводится измеряемое давление. Относительные определяют давление по отношению к заданному; с одной из сторон мембраны объем замкнут и содержит воздух образцового давления; они могут измерять или избыточное давление или давление разрежения. Дифференциальные датчики определяют разность давлений между двумя, подводимыми к разным сторонам мембраны. Для нас полезны именно дифференциальные; они отличаются наличием двух патрубков, к од-

ному из которых подсоединяется замкнутая камера опорного давления с дренажной трубкой (без них не обойтись, рис. 2.9.1), другой патрубок остается открытым для восприятия мгновенного давления в помещении. Параметры типичных датчиков сверхмалых давлений приведены в таблице 2.9.1. Пьезорезисторы формируются непосредственно на кремниевой мембране, и вся конструкция получается компактной и монолитной. Благодаря этому, датчики отличаются механической прочностью и широким диапазоном рабочих температур. ЧЭ емкостного типа характеризуются малым (порядка 0,001 с) временем отклика на изменение измеряемой величины.

Один из наиболее чувствительных датчиков – DC001NDC4. Диапазон измеряемых им давлений удовлетворяет полученным ранее ограничениям. Барометрическое СО на его основе содержит небольшое количество деталей (рис. 2.9.2). На корпусе датчика В1 расположены два патрубка. Один патрубок является опорным и к нему необходимо подсоединить герметичную камеру с дренажной трубкой. Другой патрубок – измерительный – остается открытым. По нему давление окружающего воздуха передается к измерительной мембране, находящейся внутри датчика. Давление изотропно, поэтому направление измерительного патрубка не имеет значения. Неизменная чувствительность датчика гарантируется при стабильном напряжении питания +5 В, которое обеспечивает микросхема стабилизатора DA4.

Чувствительность датчика В1 составляет 16 мВ/Па, поэтому диапазону полезных воздействий 10...300 Па соответствует диапазон выходных сигналов 0,16...4,8 В (4 В – максимальное значение выходного сигнала). Уровень естественного шума (0,1...0,3 Па) дает на выходе датчика 1,6...4,8 мВ. Это означает, что если установить порог компаратора равным 4 В (половина напряжения питания), то сигнал с выхода датчика необходимо усилить как минимум в $4/0,16 = 25$ раз. Максимальный коэффициент усиления определяется отношением порога и уровня шумов, он со-

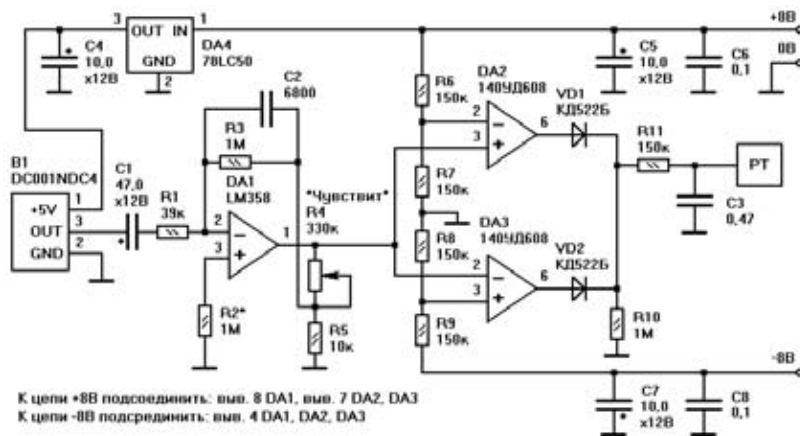


Рис. 2.9.2 Барометрическое СО

ставляет $4 \text{ В} / 5 \text{ мВ} = 800$. Усилительный каскад выполнен на ОУ DA1. Коэффициент усиления $K_{УС} = (R3 / R1) \times (1 + R4 / R5)$ регулируется в требуемых пределах переменным резистором R4. Он позволяет установить нужную чувствительность в зависимости от размеров помещения, помеховой обстановки и желаемого уровня помехоустойчивости. Элементы C1, R1 отсекают постоянную составляющую сигнала. Фильтр верхних частот пропускает сигналы до частоты $f = 1 / (2\pi R3C2) = 20 \text{ Гц}$.

Усиленный сигнал поступает с вывода 1 DA1 на двухпороговый компаратор на элементах DA2, DA3, R6, R7, R8, R9. Резистивный делитель R6...R9 задает два равнозначных порога: +4 В и -4 В. В дежурном режиме сигнал на выводе 1 DA1 флуктуирует вокруг нулевого уровня, не выходя за пределы коридора $\pm 4 \text{ В}$; на выводах 6 DA2 и DA3 – сигнал -8 В; конденсатор C3 разряжен; на входе РТ – сигнал нулевого уровня. Если сигнал на выходе DA1 превысит +4 В, на выводе 6 DA2 будет сигнал высокого уровня, который через диод VD1 и резистор R11 заряжает конденсатор C3. То же самое происходит, если сигнал на выходе DA1 становится ниже -4 В, но через элементы DA3, VD2, R11. Постоянная времени зарядки конденсатора C3 выбрана таким образом, чтобы на вход РТ проходили только импульсы длительностью более 0,05 с. Резистор R10 служит для медленного саморазряда конденсатора C3 в дежурном режиме. После открывания двери положительный импульс на C3 инициирует срабатывание РТ.

Недостатком рассмотренного варианта является относительная дороговизна ЧЭ. С потерей качества можно заменить датчик давления электретным микрофоном. Широко распространенный микрофон Panasonic WM-034 обладает чувствительностью 60 мВ/Па в диапазоне частот 20...16000 Гц. Обычно чувствительность измеряется на частоте 1 кГц и почти не меняется до нижней границы диапазона. При дальнейшем уменьшении частоты чувствительность падает примерно на 6 дБ на октаву. Так что на частотах от десятых долей до единиц герца она имеет широкий разброс и составляет 0,3...30 мВ/Па. Для нормальной работы микрофона на него требуется подать напряжение 4,5...10 В при токе 0,8 мА. Близкими (и в такой же мере неопределенными

на пониженных частотах) характеристиками обладают и многие другие электретные микрофоны. Барометрическое СО на электретном микрофоне (рис. 2.9.3) имеет много общего с барометрическим СО на основе датчика давления (рис. 2.9.2). Частотный диапазон сигналов – тот же, уровень полезных сигналов – в среднем в 5 раз меньше (так как чувствительность 16 мВ/Па в 5 раз больше, чем среднее значение 3 мВ/Па), а уровень помех – в несколько раз выше. Поэтому параметры усилителя отличаются, а элементы К и РТ – те же, что и на рис. 2.9.2.

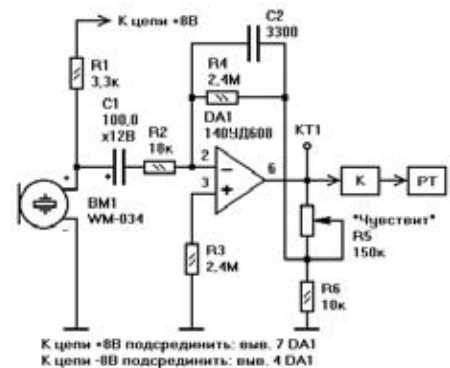


Рис. 2.9.3 Барометрическое СО на электретном микрофоне

Собрав схему и проведя начальную балансировку DA1, проверим уровни сигналов в контрольной точке КТ1 с помощью осциллографа. В небольшом помещении даже при минимальной чувствительности ($R5 = 0$) величина сигнала при открывании двери достигает напряжения питания 8 В. Длительность полезного сигнала зависит от скорости открывания, меняясь от 0,1 с для быстрого открывания до 0,5 с для медленного. Расстояние от двери до датчика слабо влияет на величину сигнала, оно проявляется только в помещениях большого объема. Угол открывания двери не влияет ни на амплитуду, ни на длительность сигнала. Меняя направление микрофона по отношению к открываемой двери, убеждаемся, что оно никак не проявляется в величине и форме полезного сигнала, то есть барометрический датчик действительно реагирует на изотропную волну давления воздуха. Уровень помех составляет 0,2...0,4 В (при $R5 = 0$), так что нет смысла делать дополнительную регулировку усиления более чем в 10...20 раз. Далее откроем форточку; помеховый сигнал возрастает, особенно в ветреную погоду, а полезный – уменьшается по мере приближения к форточке. Замена электретного микрофона на другую модель или даже на другой экземпляр той же модели может потребовать корректировки коэффициента усиления как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Высокий уровень помех электретного микрофона не позволяет сделать на его основе барометрическое СО для охраны значительных помещений (более 50 м^3).

Барометрическое СО в среднем обладает следующими показателями: напряжение питания – 9...16 В; потребляемый ток – 15 мА; размер – 50 мм; масса – 100 г; диапазон рабочих температур – минус 30... плюс 70°С; максимальный объем помещения – 200...1000 м³; стоимость – 700...30000 рублей. Более высокая стоимость соответствует случаям применения высококачественных ЧЭ, сложных алгоритмов обработки, и как следствие – большим объемам помещения. Удельная стоимость (в расчете на единицу объема) барометрического СО составляет около 3...30 руб./м³.

Основные достоинства барометрических СО:

- обширная ЗО, целиком заполняющая охраняемое пространство коттеджа или небольшого домика, если все внутренние двери открыты, а внешние двери, окна и форточки – закрыты;
- пассивный принцип действия; отсутствие вредного влияния на находящиеся в помещении люди; низкое энергопотребление;
- высокая помехоустойчивость к воздействию акустических шумов и вибрации, так как они по сравнению с полезными сигналами лежат в об-

ласти более высоких частот; датчик нечувствителен к передвижению людей и животных внутри помещения (только не дуйте на датчик);

- ЧЭ легко интегрируется в состав конструкции СО; нет необходимости в выносном ЧЭ, что упрощает и удешевляет СО;
- компактные размеры;
- удобство и простота монтажа; ЧЭ может быть размещен практически в любой точке охраняемого объема и не требует определенной ориентации;
- СО не нуждается в периодической настройке или обслуживании.

Главные недостатки барометрических СО:

- полная неработоспособность на улице и в открытых помещениях;
- низкая помехоустойчивость при работающих системах вентиляции или кондиционирования воздуха;
- трудности в отслеживании незакрытых окон или форточек, которые делают объем незамкнутым, тем самым значительно уменьшая величину полезного сигнала.

2.10. Акустические пассивные СО

Акустические пассивные СО контролируют уровень и характер звука внутри определенного объема. Звуковые колебания лежат в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Если громкость или другие параметры звука выходят за заданные пределы, то формируется сигнал срабатывания. Анализ проводится в фиксированной полосе частот, которая выбирается в зависимости от обнаруживаемого источника звука. Источники делятся на низкочастотные и высокочастотные.

Низкочастотные звуковые сигналы лежат в диапазоне от 20 Гц до нескольких килогерц. Их вызывает речь или шаги людей, работа механического или электрического инструмента. Низкочастотные акустические пассивные СО используют обычную технику и элементы звукозаписи, а в качестве ЧЭ подойдет любой микрофон, поэтому их часто называют микрофонными СО. Распространению микрофонных СО препятствует значительный уровень естественных шумов, а также большой радиус распространения акустических сигналов. На улице источниками шума являются транспорт, голоса людей, дождь, ветер. Они затрудняют выделение полезных сигналов. Услышать и распознать объект по издаваемым звукам возможно только в тихом помещении.

Высокочастотные звуковые сигналы лежат в полосе от единиц килогерц до 20 кГц. Область анализа может выходить и далее в диапазон ультразвука (более 20 кГц). Подобные акустические колебания сопровождают разбивание стекла. Помеховые сигналы в высокочастотном диапазоне невелики. Поэтому и факт разбивания может быть идентифицирован с большой степенью до-

стоверности. Датчики разбивания стекла (ДРС), работа которых основана на акустическом пассивном принципе, имеют столь высокое распространение, что слова «акустические пассивные» в их названии часто не упоминаются.

2.10.1. Микрофонные СО

Микрофонные СО реагируют на естественные звуки, сопровождающие движение или действия человека: разговор, шум шагов, работу ножовки, перфоратора или другого инструмента. Микрофонные СО являются пассивными. Звуковые волны распространяются на значительные расстояния, огибая стоящие на пути препятствия. Данное свойство позволяет охранять одним точечным датчиком помещение большого объема. Но оно же играет отрицательную роль на улице, где находится множество удаленных источников шума. От них невозможно отстроиться ни остронаправленными микрофонами, ни частотной фильтрацией. Микрофонные СО работают только внутри помещений, да и то – самых тихих.

Идея удаленного прослушивания помещения возникла сразу после изобретения первого микрофона более ста лет назад. На создание автоматического устройства, срабатывающего от воздействия характерных звуков, ушло значительное время. Оно появилось лишь после изобретения транзистора. Чувствительным элементом СО является обычный микрофон. Он преобразует акустические колебания в электрический сигнал.

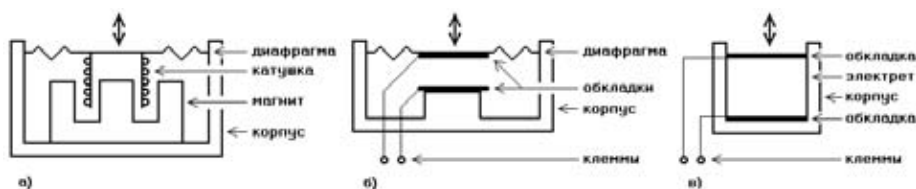


Рис. 2.10.1 Типы микрофонов

По принципу действия микрофоны делятся на пять типов: электродинамические, конденсаторные, электретные, ленточные и угольные.

Электродинамический микрофон состоит из диафрагмы, воспринимающей колебания воздуха, легкой катушки, жестко прикрепленной к диафрагме, и неподвижного магнита (рис. 2.10.1а). В результате перемещения в магнитном поле в катушке наводится ЭДС. Динамический микрофон является генераторным датчиком; он самостоятельно генерирует электрический сигнал, не требуя для этого внешнего питания.

Конденсаторный микрофон состоит из двух обкладок, одна из которых выполняет роль диафрагмы, колеблющейся под действием звуковых волн (рис. 2.10.1б). Обкладки образуют конденсатор емкостью 50...100 пФ. При воздействии звука емкость меняется пропорционально звуковому давлению. Эти изменения преобразуются в электрический сигнал специальной электронной схемой, которая часто встраивается внутрь корпуса микрофона. Конденсаторный микрофон является параметрическим преобразователем; он не генерирует электрический сигнал самостоятельно, а лишь меняет параметр (емкость), измеряемый и усиливаемый дополнительными каскадами.

Электретный микрофон по внутреннему устройству похож на конденсаторный, но между обкладками располагается слой электрета — поляризованного диэлектрика, генерирующего заряд, пропорциональный его деформации (рис. 2.10.1в). Заряд слишком мал для его передачи по проводам, поэтому внутри микрофона находится встроенный полевой транзистор, обеспечивающий преобразование заряда в напряжение. Поэтому электретные микрофоны для своей работы также требуют внешнего источника питания. В технике профессиональной звукозаписи внешнее питание, подаваемое на микрофон, называется фантомным. Для конденсаторных микрофонов оно имеет стандартное значение 48 вольт (или реже — 24 В). Напряжение питания бытовых электретных микрофонов — 1...10 В, причем они не слишком критичны к его величине.

Ленточный микрофон представляет собой тонкую алюминиевую ленту, находящуюся в сильном магнитном поле. Лента является диафрагмой, в результате колебаний она генерирует ток. Ленточные микрофоны распространены в студийной звукозаписи; они обеспечивают высокое качество сигнала. Однако ленточные микрофоны требуют аккуратного обращения, они подвержены механическим повреждениям, чувствительны к низкочастотным сигналам, имеют очень низкое выходное сопротивление (доли ома), требуя для подключения специального трансформатора.

Угольный микрофон состоит из угольного порошка, располагаемого под подвижной диафрагмой. В результате действия звуковых колебаний порошок сжимается и разжимается, а его сопротивление меняется синхронно с колебаниями. Угольный микрофон не требует усиления сигнала. Подав на него напряжение через постоянный резистор, получают полноценный электрический сигнал, который можно передавать по проводам на значительные расстояния. Первые микрофоны, использовавшиеся в телефонах и радиовещании, были угольными. Они недолговечны; порошок со временем слеживается и теряет свои свойства. Сейчас угольные микрофоны не производятся, не используются и не покупаются, так как полностью вытеснены первыми четырьмя типами.

Из всех пяти типов микрофонов наиболее подходящими являются электретные. Благодаря твердотельной конструкции, они отличаются высокой надежностью и низкой стоимостью. Электретные микрофоны не обладают высоким студийным качеством сигналов. Если место установки микрофона защищено от механических воздействий, возможно использовать и электродинамические микрофоны. Они обеспечивают более высокое качество сигнала и низкий уровень собственных шумов при не слишком высокой стоимости.

Микрофоны делятся по форме ЗЧ (то есть по уровню электрического сигнала в зависимости от направления на источник звука) на шесть групп: ненаправленные, кардиоидные, суперкардиоидные, гиперкардиоидные, остронаправленные и направленные двусторонние. Ненаправленные (или всенаправленные) микрофоны имеют круговую (точнее, сферическую) диаграмму направленности; их чувствительность не зависит от направления, с которого приходит звуковая волна. Кардиоидные (или направленные односторонние) микрофоны обладают равномерной чувствительностью с передней (фронтальной) стороны и полной нечувствительностью — с задней (тыловой); их диаграмма направленности имеет форму сердца (кардиоиды). Чувствительность суперкардиоидного микрофона с фронтальной стороны сильно зависит от направления; он преимущественно воспринимает звуки, исходящие спереди, и не воспринимает звуки, приходящие с боков; форма диаграммы направленности — груша. Гиперкардиоидный микрофон имеет еще большую направленность; его чувствительность максимальна вдоль фронтальной оси и резко падает при отклонении от нее; форма диаграммы направленности — огурец. Остронаправленные микрофоны чувствительны к звукам, приходящим с одного направления (в пределах узкого луча с углом порядка градуса); обычно

они имеют вид длинной трубки с прорезями или нескольких вложенных друг в друга длинных трубок; форма диаграммы направленности — игла; остронаправленный микрофон называется «пушкой» и имеет размеры до метра. Направленные двусторонние микрофоны имеют диаграмму направленности в виде восьмерки; они одинаково чувствительны к фронтальным и тыловым звукам и нечувствительны — к боковым; именно нечувствительность составляет их смысл; направив микрофон боком на источник сильных шумов, можно записать все остальные звуки (например, интервью).

Направленность микрофона определяется конструкцией датчика и в частности корпуса. Для превращения направленного микрофона в ненаправленный часто бывает достаточно закрыть отверстие, расположенное на корпусе сзади диафрагмы. Длина волны звука обратно пропорциональна его частоте. Поэтому большинство микрофонов, проявляющих свойство направленности на высоких частотах, теряют его и становятся ненаправленными на низких частотах. Помогает то, что низкочастотные звуковые волны с расстоянием ослабевают сильнее высокочастотных. В крайнем случае, чтобы сохранить направленность, низкие частоты должны быть отфильтрованы блоком обработки сигналов. ЗЧ микрофона должна соответствовать прослушиваемому объему. Необоснованное расширение ЗЧ приводит лишь к возрастанию уровня шумов. Контроль звуков в помещениях наиболее удобно производить с помощью ненаправленного микрофона, разместив его в центре помещения, или с помощью кардиоидного микрофона, установив его на стене.

Перед тем как перейти к анализу электрических характеристик микрофонов необходимо определить, ка-

ким образом оценивать интенсивность воздействия звука. В системе СИ для этих целей служит звуковое давление p , измеряемое в паскалях. Гораздо чаще уровень звукового давления L измеряют в децибелах относительно нулевого уровня, за который принимается порог слышимости человека, равный $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Тогда $L = 20 \cdot \lg(p/p_0)$, где p — среднеквадратическое значение звукового давления. Уровни звукового давления L удобно определять, пользуясь шкалой, представленной в таблице 2.10.1. Здесь же для сравнения приведены соответствующие значения звукового давления p в паскалях и силы звука W , то есть плотности потока энергии в звуковой волне, в ваттах на квадратный метр. Уровень звука определяется через силу звука выражением $L = 10 \cdot \lg(W/W_0)$, где $W_0 = 10^{-12}$ Вт/м². При удалении от источника звука интенсивность звука убывает. Если расстояние от источника увеличивается в N раз, то сила звука W уменьшается в N^2 раз (она обратно пропорциональна площади волны), звуковое давление p уменьшается в N раз (так как сила звука пропорциональна квадрату давления), а уровень звука L уменьшается на величину $20 \lg N$.

С точки зрения формирования электрического сигнала для характеристики микрофонов используется пять основных показателей: чувствительность, максимальное звуковое давление, уровень собственных шумов, диапазон частот и выходное сопротивление. Каждый из них имеет самостоятельное значение при выборе микрофона из большого их множества.

Чувствительность — это отношение напряжения на выходе микрофона к вызывающему его звуковому давлению. Оно выражается в милливольтх на паскаль и обычно измеряется на частоте 1 кГц. Чаще всего чувствительность микрофона (электродинамического,

Таблица 2.10.1 Шкала уровней звукового давления

Характеристика звука	L, дБ	p, Па	W, Вт/м ²
Нижний предел чувствительности человеческого уха	0	0,00002	10 ⁻¹²
Шорох листьев	10	0,000065	10 ⁻¹¹
Тихий сад ночью в безветренную погоду, тишина в студии звукозаписи	20	0,0002	10 ⁻¹⁰
Скрипка пианиссимо, шепот на расстоянии 1 м, тишина в помещении ночью	30	0,00065	10 ⁻⁹
Шорох шагов, тихая музыка, тихая речь, тишина в помещении днем	40	0,002	10 ⁻⁸
Шум в офисе, текущая из крана вода, вентилятор, обычная речь на расстоянии 1 м	50	0,0065	10 ⁻⁷
Разговор, шум в магазине, нормальная громкость радио или телевизора, шум в работающем офисе	60	0,02	10 ⁻⁶
Громкий разговор на расстоянии 1 м, звонок телефона, высокая громкость радио или телевизора, пылесос	70	0,065	10 ⁻⁵
Производственный цех, грузовой автомобиль, мопед, громкий звонок телефона, очень громкая музыка в квартире, крик на расстоянии 1 м	80	0,2	10 ⁻⁴
Стандартный уровень громкости звука в кинотеатре	85	0,36	3,2 × 10 ⁻⁴
Шумная улица, гудок автомобиля на расстоянии 1 м, проезд поезда, перфоратор (600 Вт) на расстоянии 1 м	90	0,65	10 ⁻³
Условный уровень отсчета сигналов	94	1	2,5 × 10 ⁻³
Фортиссимо оркестра, сирена, электропила, электрорубанок, электрошлифовальная машина, мотоцикл без глушителя	100	2,0	10 ⁻²
Пневматический отбойный молот на расстоянии 1 м, винтовой самолет, удар молота о стальную плиту	110	6,5	10 ⁻¹
Реактивный двигатель самолета, гром	120	20	1
Болевой порог человеческого уха	130	65	10

электретного или конденсаторного) находится в пределах от 0,5 до 50 мВ/Па. Для электродинамических она составляет в среднем 2...10 мВ/Па, для электретных с фантомным питанием – 10...30 мВ/Па. Это означает, что во время записи разговора или шума в магазине (0,02 Па) уровень сигнала на выходе среднего динамического микрофона (4 мВ/Па) составит 0,08 мВ. Иногда чувствительность микрофона измеряется в децибелах относительно начального уровня, за который принимается 1 В/Па. Например, чувствительности минус 60 дБ соответствует значение 1 мВ/Па, а минус 54 дБ – 2 мВ/Па.

Максимальное звуковое давление (МЗД) представляет собой тот верхний предел, который в состоянии зафиксировать без искажений данный микрофон. Оно зависит от вида и конструкции микрофона. Существуют модели, МЗД которых достигает 140 дБ, хотя обычные его значения находятся в пределах 90...100 дБ. Уровень громкости, измеряемый микрофонным СО, не превышает тех же 90...100 дБ, так что для этих целей подходит практически любой микрофон.

Уровень собственных шумов микрофона – это величина сигнала на его выходе при отсутствии какого-либо акустического воздействия. Обычно его измеряют величиной, приведенной к эквивалентному звуковому давлению, то есть характеризуют не напряжением, а значением уровня звука L в децибелах, который вызвал бы тот же уровень электрического сигнала. Перевод децибел в милливольты и обратно осуществляется через чувствительность микрофона. Уровень собственных шумов микрофонов составляет 15...30 дБ. В хорошей студии звукозаписи акустические шумы находятся на уровне 20 дБ; здесь нужен микрофон с низким уровнем собственного шума 15 дБ, чтобы его вклад в общий шум был незаметен. Если измерения проводятся в тихом помещении (например, в подвале), то понадобится малозащумящий микрофон. Если звуковые шумы превышают 40...50 дБ, то модель микрофона не принципиальна. Иногда уровень собственных шумов микрофона измеряется в децибелах относительно начального уровня, за который принимается 1 Па (в этом случае число децибел – отрицательное); например, уровню шумов минус 64 дБ соответствует эквивалентный уровень звука $L = 94 - 64 = 30$ дБ или 0,00065 Па.

Уровень собственных шумов микрофона имеет принципиальное влияние на звукопередачу. Именно он, а не чувствительность, как может показаться на первый взгляд, определяет качество сигнала. Слабый сигнал можно усилить в необходимое число раз, зашумленный сигнал восстановлению не поддается.

Есть еще два показателя, которые являются производными от уровня собственных шумов: динамический диапазон и отношение сигнал/шум. Динамический диапазон представляет собой разность максимального звукового давления и уровня собственных шумов (в децибелах). Отношение сигнал/шум измеряется в децибелах; оно равно разности среднего уровня сигнала и уровня собственных шумов. За средний уровень сигнала часто принимается значение 94 дБ, что соответствует звуковому давлению в 1 Па.

Диапазон частот, воспроизводимых обычным вокальным микрофоном, находится в пределах от 30...50 Гц до 10...15 кГц. В этом диапазоне гарантируется определенная неравномерность частотной характеристики, чаще всего в пределах 3дБ; за его пределами наблюдается уменьшение чувствительности. Диапазон воспроизводимых частот должен соответствовать источнику звука. Речь человека, звуки шагов и шумы, производимые при его движении, укладываются в диапазон 300...3000 Гц. Расширять диапазон за эти пределы нет смысла.

Выходное сопротивление микрофона влияет на построение первого каскада усиления. Для качественного воспроизведения звука они должны быть согласованы между собой. Выходное сопротивление динамических микрофонов составляет единицы килоом, что требует применения усилителей с низкоомным входом. Электретные микрофоны всегда имеют встроенный усилитель с низким выходным сопротивлением, поэтому величина входного сопротивления усилителя не принципиальна. Конденсаторные микрофоны с фантомным питанием также не требовательны к величине входного сопротивления.

Микрофоны воспринимают весьма слабые колебания воздуха, поэтому они чувствительны и к вибрации. Их необходимо защищать от ударов, пыли, влаги. Микрофон не должен непосредственно контактировать с твердыми предметами, его следует закреплять через амортизирующую прокладку из мягкой резины, поролона или ваты.

Электрический сигнал на выходе микрофона имеет очень низкий уровень. При передаче аналогового звукового сигнала на длинные расстояния следует либо экранировать линию связи, либо проводить предварительное усиление сигнала. Если в одну линию объединяется несколько микрофонов с пересекающимися ЗЧ, их обязательно требуется проверить на синфазность. Подсоединение каждого последующего микрофона должно увеличивать громкость (или уровень сигнала). Если же происходит уменьшение громкости, значит, полярность вновь подсоединяемого микрофона противоположна остальным, и провода от него следует поменять местами.

В таблице 2.10.2 приведены данные, позволяющие сравнить электретные (Э), динамические (Д) и конденсаторные (К) микрофоны. Показана только незначительная часть из сотен производимых моделей. В таблицу вошли типичные электретные микрофоны и по несколько выбранных наугад динамических и конденсаторных. Для использования в составе акустического пассивного СО чаще всего подходят компактные всенаправленные электретные микрофоны. Они обладают высокой чувствительностью, широким диапазоном частот, низкой стоимостью, но более высоким уровнем шумов. Обычно у электретных микрофонов два вывода. При их подсоединении следует соблюдать полярность. Отрицательный вывод подключается к минусу питания. На положительный вывод через токоограничительный резистор подается положительное напряжение питания; с этого же вывода через разделитель-

Таблица 2.10.2 Микрофоны

Название	Тип	Чувствительность, мВ/Па	Диапазон частот, кГц	Уровень шумов, дБ	Питание, В (мА)	Размеры, мм	Стоимость, руб.
Сосна (М7)	Э	10	0,15...7	26	1,2 (0,07)	5,5×4×2,7	45
МКЭ-3	Э	4...20	0,05...15	30	4,5	d16×21	15
МКЭ-332А (Б, В, Г)	Э	3...6 (6...12, 12...24, 24...48)	0,05...12,5	30	2...9	d10×7	15
CZN-15E	Э	42...62	0,02...16		2,5...10 (0,8)	d9,7×6,7	15
WM-65A	Э	50	0,1...12		2...10 (0,5)	d6×5	20
WM-62A	Э	45	0,02...16		2...10 (0,5)	d6×2,7	30
ДЭМШ-1А	Д	0,4...1,3	0,2...4			23×30×11	280
AKG D112	Д	1,8	0,02...17	21		150×70×115	6000
AKG 3700M	Д	2,5	0,07...20	19		d50×186	3500
Октава МК-319	К	11	0,04...16	<14	48	d52×205	3900
Октава МК-011	К	10	0,02...20	<18	48	d50×190	4800

тельный конденсатор снимается электрический сигнал. Отрицательный вывод большинства микрофонов визуально отличается от положительного, он соединен с металлическим корпусом микрофона. Некоторые типы электретных микрофонов имеют отдельные выводы для подачи питания и съема выходного сигнала, то есть имеют не два, а три вывода.

Динамические и конденсаторные микрофоны обладают меньшим уровнем шумов и большим диапазоном частот, но стоят значительно дороже. Таблица 2.10.2 демонстрирует широкий диапазон изменения характеристик микрофонов.

Электретный микрофон можно найти практически в любом аппарате преобразования звука – диктофоне, телефоне, факсе. Чувствительность типичной модели CZN-15E составляет около $k = 40...60$ мВ/Па. Естественный шум в тихом помещении ($L_{\text{шум}} = 20...30$ дБ, $p_{\text{шум}} = 0,0002...0,00065$ Па) вызывает на выходе такого микрофона электрический сигнал с уровнем $U_{\text{шум}} = k p_{\text{шум}} = 0,008...0,04$ мВ. С учетом собственных шумов микрофона (30 дБ) уровень реального шума на выходе микрофона составит около $0,04...0,06$ мВ. Если полезный сигнал – это звук работающего перфоратора, то ему соответствует уровень $L_{\text{пол}} = 90$ дБ или $p_{\text{пол}} = 0,65$ Па (табл. 2.10.1). Величина электрического сигнала на выходе микрофона составит около $U_{\text{пол}} = k p_{\text{пол}} = 30...40$ мВ. Оптимистическая оценка отношения сигнал/шум близка к 1000.

В действительности уровень шума может возрастать. В обычных помещениях к собственным шумам

добавляются помехи, проникающие с улицы, – от транспорта, ветра, дождя, грома, и исходящие изнутри, – от кондиционеров, водонагревателей, лифтов, телефонов. Непрерывный шум может достигать уровня 50 дБ ($p_{\text{шум}} = 0,0065$ Па). Полезный сигнал от перфоратора или другого инструмента взлома ослабевает при удалении от источника звука. При удалении в 10 раз плотность потока мощности W уменьшается в 100 раз, а звуковое давление p – в 10 раз. На расстоянии 10 м от перфоратора уровень полезного сигнала снизится до 70 дБ ($p_{\text{пол}} = 0,065$ Па), а пессимистическое отношение сигнал/шум составит $p_{\text{пол}} / p_{\text{шум}} = 10$. Дистанция от пессимистической оценки до оптимистической должна перекрываться ручной или автоматической регулировкой усиления. Автоматическая регулировка удорожает стоимость СО, ручная – стоимость его обслуживания.

Скорость вращения электродрели достигает 60 оборотов в секунду. Скорость вращения перфоратора немного ниже – от 15 до 20 об./с. Частота ударов перфоратора мощностью $0,6...1,5$ кВт составляет 65...120 ударов в секунду. Основная часть акустической энергии работающего перфоратора включает высшие гармоники и сосредоточена в диапазоне от 50 до 1000 Гц.

Зная параметры полезных и помеховых сигналов, нетрудно сформировать алгоритм их обработки, оценить его параметры и представить в виде электронной схемы (рис. 2.10.2). Резистор R1 обеспечивает ток через микрофон около 1 мА при напряжении на нем примерно 5 В. Каскад на микросхеме DA1.1 усиливает

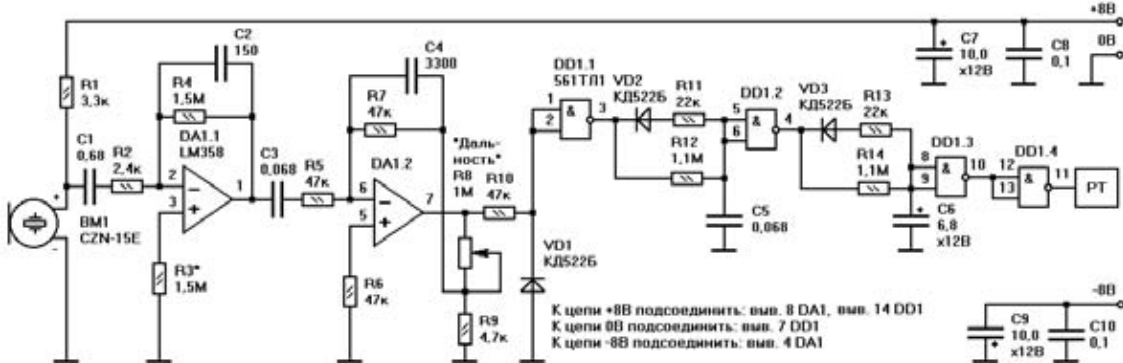


Рис. 2.10.2 Микрофонное СО

максимально возможный сигнал (35 мВ) в 200 раз, поднимая его до уровня напряжения питания. Элементы С1, R2 и С2, R4 осуществляют фильтрацию звуковых сигналов в полосе, характерной для работающего перфоратора.

Коэффициент усиления второго каскада на DA1.2 равен $(1 + R8/R9)$, он регулируется в пределах от 1 до 200. Одновременно проводится фильтрация сигналов в той же полосе частот элементами С3, R5 и С4, R7. Каскад поднимает до уровня напряжения питания не только максимально возможный, но и минимально допустимый полезный сигнал с уровнем звукового давления 40...50 дБ, соответствующий удалению ЧЭ от места работы электроинструмента (или наоборот) до нескольких десятков метров. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления лишено смысла, так как приведет к срабатываниям от естественных шумов. Поэтому и дальность обнаружения микрофонного СО может превосходить несколько десятков метров только в тихом звукоизолированном помещении при использовании малошумящего микрофона. Регулировка коэффициента усиления переменным резистором R8 дает возможность настройки дальности обнаружения СО в условиях конкретной шумовой обстановки.

Роль компаратора выполняет элемент DD1.1. Величина порога – около половины напряжения питания, то есть +4 В. Поскольку звуковой сигнал имеет вид двухполярного, то можно обойтись однополюсовым компаратором. В дежурном режиме на выходе DA1.2 присутствует шумовой сигнал, флуктуирующий вокруг уровня 0 В. В результате на выходе элемента DD1.1 устанавливается сигнал высокого уровня, а во время акустического воздействия достаточной интенсивности – многочисленные импульсы низкого уровня. Период следования импульсов соответствует частоте принимаемого сигнала (для полезного – более 50 Гц). Фильтр на элементах VD2, R11, R12, С5 устраняет положительные импульсы длительностью менее $0,7R12C5 = 0,05$ с, благодаря чему на выходе инвертора DD1.2 формируется непрерывный сигнал высокого уровня в течение всего времени слышимой работы перфоратора.

Селектор на элементах VD3, R13, R14, С6, DD1.3, DD1.4 реагирует на непрерывные импульсы большой длительности. В исходном состоянии на выходе DD1.2 сигнал низкого уровня, конденсатор С6 разряжен, на выходе DD1.4 нулевой сигнал. При появлении на выходе DD1.2 сигнала высокого уровня конденсатор С6 начинает медленно заряжаться через резистор R14. В случае прерывания сигнала конденсатор С6 быстро разряжается через цепь VD3, R13 и при повторном появлении на выходе DD1.2 сигнала высокого уровня зарядка конденсатора С6 начнется заново с нулевого уровня. Вместе с этим с нуля начнется и отсчет длительности сигнала высокого уровня. Время зарядки конденсатора С6 соответствует минимальному времени непрерывной работы электроинструмента и составляет $T = 0,7R14C6 = 5$ с. После превышения этого промежутка времени на выходе DD1.4 формируется положительный импульс, инициирующий срабатывание РТ.

Мощные звуковые сигналы, сопровождающие работу инструмента взлома, обнаруживаются с высокой степенью надежности даже на большом удалении и в условиях значительных акустических помех, поскольку помехи не бывают одновременно и громкими, и длительными. Сложнее обнаруживать звук разговора (50...60 дБ) на фоне естественных шумов в помещении (30...40 дБ). К каскадам усиления, фильтрации и сравнения с порогом придется добавить накопитель импульсов. Он увеличит время реакции СО на воздействия, но сократит число ложных тревог.

Человек может не включить свой перфоратор (или прийти без перфоратора), он может молчать, но не может не ходить. Звук шагов является неотъемлемым признаком появления нарушителя. Но этот звук имеет низкую интенсивность на уровне 40...50 дБ, поэтому уверенно обнаруживать его возможно только в тихих помещениях, подвалах, бетонированных хранилищах, загородных домах (со скрипучим дощатым полом), где уровень фонового шума не превышает 30 дБ. Электретный микрофон необходимо будет заменить малошумящим динамическим, а в алгоритме обработки появятся адаптивный порог, АРУ и анализатор периодичности импульсов от отдельных шагов.

Отношение сигнал/шум при обнаружении звука шагов невелико (3...5 на расстоянии около 5 м). Поднять его позволяет частотная полосовая фильтрация электрических сигналов. Основная частота звука шагов может меняться от 150 Гц до 500 Гц в зависимости от вида обуви, покрытия пола, типа и размеров помещения. Фильтрация сигналов в узкой полосе (150...500 Гц) позволяет в несколько раз снизить уровень шумов, почти не меняя вид и параметры полезных сигналов.

Основные достоинства микрофонных СО:

- пассивный принцип действия; незаметность для окружающих и отсутствие вредного влияния на них;
- зона обнаружения целиком заполняет все помещение; микрофон может быть установлен в любом месте комнаты, подходящем для этого с точки зрения удобства монтажа, скрытности или внешней эстетики, а не с точки зрения правильности функционирования самого СО; вид ЗО не связан с положением или направлением ЧЭ крепкими узлами; звуковые волны имеют большую длину волны и огибают предметы, поэтому ЗО не имеет мертвых зон позади крупных предметов;
- раннее обнаружение нарушителя еще на подходе к охраняемому объекту;
- ЗО ограничена стенами помещения, если они обеспечивают надежную звукоизоляцию;
- низкая стоимость; высокая надежность; компактность и возможность скрытной установки;
- микрофонное СО не нуждается в обслуживании;
- возможность непосредственного прослушивания звукового сигнала оператором для проверки обоснованности сигнала тревоги; звуковые сиг-

налы имеют высокую информативность, они позволяют определить не только наличие посторонних людей, но также их количество и характер производимых ими действий (не говоря уже о таких интересных подробностях, как пол, национальность, образованность и воспитанность).

Основные недостатки микрофонных СО:

- низкая помехоустойчивость, без объяснений понятная каждому, имеющему уши; микрофонное СО неработоспособно на улице, оно может функционировать только в тихом помещении — подвале или убежище — или использоваться для обнаружения действий, сопровождающихся очень громкими звуками;
- трудность организации полной автоматической проверки работоспособности.

2.10.2. Датчик разбивания стекла

Почти в любом помещении имеются окна. Стекло — хрупкий материал, поэтому путь проникновения нарушителя через окно является одним из наиболее вероятных, в особенности на первом этаже. Этот факт определяет необходимость установки датчиков охраны окон вообще и широкое распространение акустических пассивных датчиков разбивания стекла в частности. Подобные датчики называются также датчиками разбития стекла, датчиками битого стекла, акустическими извещателями, электроакустическими датчиками разрушения стекла, извещателями охранными поверхностными звуковыми или акустическими извещателями разрушения стекла. Последнее название следует признать самым точным, но более всего распространено словосочетание датчик разбивания стекла (ДРС).

Принцип действия ДРС основан на обнаружении звуков разбивания стекла. Они громче, чем речь или шум шагов, а по спектральному составу отличаются от большинства бытовых звуков. Поэтому помехоустойчивость ДРС выше, чем у микрофонных СО. ДРС относится к внутренним СО и не приспособлен для работы на улице, но только по той причине, что в лесу нет окон. Он имеет узкую область применения и является пассивным. Состав ДРС аналогичен составу микрофонного СО; это — микрофон и электронный БО.

Звуки разбивания стекла различны. Их многообразие связано с тем, что в окнах используются разные типы стекол и рам, сами же стекла имеют разные размеры и крепятся по-разному; кроме того, разрушения отличаются друг от друга по способу и по степени. Распространяясь от места разрушения, звуковая волна отражается от стен и окружающих предметов, и также меняет свой вид. Наибольшее влияние на характер сигнала оказывает тип стекла. Обычно в окнах используется пять его типов (табл. 2.10.3). Различные стекла отличаются по толщине почти в десять раз. Узорчатое стекло не имеет постоянной толщины, в отдельных местах оно толще, в других — тоньше. Любое стекло может быть дополнительно покрыто солнцезащитной полупрозрачной пленкой. В последнее время все более

широко распространены герметизированные стеклопакеты. Все это осложняет обнаружение факта разбивания стекла по акустическому сигналу. Тем не менее, оно обладает рядом общих признаков, делающих его распознавание возможным.

Таблица 2.10.3 Основные типы и параметры оконных стекол

Тип стекла	Толщина, мм
Листовое (обычное)	2,4...6,4
Закаленное	3,2...6,4
Многослойное (ламинированное, триплекс)	3,2...14,3
Армированное	6,4
Узорчатое	4...6

Проведем эксперимент, на выполнение которого потребуется не более часа. Возьмем несколько кусков стекла различной толщины. Подсоединим электретный микрофон к звуковой плате компьютера и запишем звуки разбивания стекла. Затем проведем анализ записанных сигналов программой звукового редактора, например, Nero Wave Editor. Программа отображает на экране монитора зависимость амплитуды колебаний от времени. Из нее видно, что акустический сигнал разбивания стекла состоит из двух фаз. Первая представляет собой ударную волну от резко прогибающегося, но еще не разрушенного стекла (наподобие сигнала барометрического СО, п. 2.9). Она имеет вид однополярного скачка увеличения давления (в диапазоне частот до нескольких сотен герц). Вторая фаза — собственно звук разбивания стекла в виде периодического затухающего колебания. Максимум в спектре частот (высота звука) второй фазы лежит в диапазоне 4...8 кГц. Обычное тонкое листовое стекло дает основной тон на частоте 4...5 кГц; при увеличении толщины стекла частота звука возрастает. Интервал между фазами в среднем составляет 0,1 с, не превышая максимального значения 0,15 с.

Высокую помехоустойчивость и отсутствие ложных срабатываний обеспечивает использование обоих информативных признаков разбивания стекла, соответствующих акустической волне первой и второй фазы. Подобные алгоритмы носят название двухканальных, двухполосных или двухпороговых. Алгоритмы, использующие только один из признаков (ударную волну или высокочастотный звук), обладают меньшей помехоустойчивостью. Они называются однополосными или однопороговыми. Блок-схема двухполосного алгоритма состоит из микрофона М, усилителя У, фильтра нижних частот ФНЧ с частотой среза 0,2...0,5 кГц, полосового фильтра ПФ, двух компараторов К1 и К2, детектора огибающей ДО, расширителя импульса РИ, производящего задержку спада на 0,15 с, схемы совпадения И и реле тревоги РТ (рис. 2.10.3). Изменение полосы ПФ в пределах 4...8 кГц позволяет настроить СО на обнаружение разбивания стекла определенной толщины.

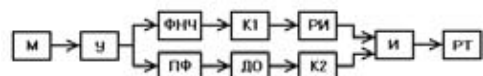


Рис. 2.10.3 Датчик разбивания стекла

ДРС в среднем обладает следующими показателями. Его ЧЭ – стандартный микрофон, поскольку акустический сигнал разбивания стекла лежит в диапазоне звуковых волн. ДРС рассчитан на стекло толщиной от 2,5 до 8 мм площадью 0,05...100 м². Дальность обнаружения составляет до 6 м. Питание прибора производится от источника постоянного напряжения 10...15 В при потребляемом токе 20...40 мА. Рабочая температура лежит от –20...0°С до +45...50°С, что характерно для помещений. Ориентировочная стоимость – 300...600 рублей. Масса датчика составляет 0,05...0,2 кг.

ДРС устанавливается напротив окон, где величина акустического сигнала максимальна. Шторы или жалюзи на окнах ослабляют звуковой сигнал, поэтому при их наличии расстояние уменьшается в полтора раза (до четырех метров). Покрытие стекол пленкой также снижает уровень звука; дальность действия сокращается в этом случае до 4...5 метров. Средняя площадь охраняемого остекления равна 10 квадратным метрам, то есть одним датчиком можно охранять 3...5 окон. Все окна должны находиться в прямой видимости из точки установки ДРС. Наилучшее место установки – на потолке или на максимальной высоте, чтобы в случае перестановки мебели случайно не загородить датчик. При охране протяженных витрин расстояние между соседними датчиками не должно превышать 10 м.

После установки ДРС необходимо проверить его работоспособность либо путем разбивания стекла рядом с окном, либо с помощью специального имитатора. Имитатор воспроизводит звук разбивающегося стекла; обычно для датчика определенного типа применяется

свой имитатор, учитывающий особенности алгоритма его работы.

Основные достоинства ДРС:

- пассивный принцип действия;
- удобство монтажа; нет необходимости опутывать все стекла (а их гораздо больше, чем окон) проводами; достаточно установить один датчик в удобном месте напротив окна; более того, один датчик может охранять несколько близлежащих окон одного помещения;
- отсутствие необходимости обслуживания, периодической протирки или настройки; хотя проверка работоспособности необходима, как и для любого пассивного СО.

Основные недостатки ДРС:

- установка ДРС напротив окна не исключает необходимости установки магнитоконтактного датчика его открывания; иначе окно может быть взломано без разбивания стекла;
- ДРС должен круглосуточно находиться в состоянии охраны, даже когда в офис приходит персонал, и когда окно открыто;
- граница между событиями, на которые следует реагировать, и на которые не следует, не всегда точно определена; например, следует ли регистрировать образование трещин в многослойном стекле;
- наличие ограничений на уровень акустических шумов; в месте размещения ДРС он не должен превышать 65...90 дБ (в зависимости от типа датчика); ДРС не будет работать в механическом или прокатном цеху.

2.11. Акустические активные СО

В основе принципа действия активных акустических СО лежит излучение колебаний воздуха в окружающее пространство, прием колебаний и анализ наличия особенностей, характерных для появления ОО в контролируемой области. Акустические активные СО бывают трех разновидностей: лучевые, локационные и объемные. Передатчик лучевого СО формирует колебания в виде узкого луча, направленного на приемник; перекрытие или ослабление луча при появлении человека инициирует сигнал срабатывания. Локационное СО, называемое также ультразвуковым радаром, контролирует изменения параметров УЗ колебаний, отраженных от окружающих предметов. Излучатель объемного СО создает в замкнутом объеме помещения картину стоячих волн, устанавливающихся за счет отражений от стен; приемник фиксирует изменения данной картины, возникающие при появлении в помещении человека.

Акустические активные СО являются внутренними, так как на открытом воздухе многочисленные звуковые шумы, отражения от подвижных окружающих предметов, влияние метеорологических факторов приводят к

большому количеству ложных срабатываний. Ранее акустические активные СО имели широкое распространение, но с появлением более дешевых и надежных радиолокационных доплеровских СО уступили им значительную долю рынка. Акустические активные СО относятся к объемным, так как звуковые колебания с трудом могут быть сконцентрированы в узкой области пространства.

Акустические активные СО излучают колебания большой интенсивности, поэтому должны работать в слышимом диапазоне ультразвука. Обычно частота излучателя находится в пределах от 15 кГц, так как очень немногие люди могут услышать более высокие звуки, и до 40 кГц, так как получение более высокочастотных акустических колебаний затруднительно, дорого и малоэффективно для обнаружения крупных объектов. Наиболее популярна частота 40 кГц; излучатели и приемники данной частоты широко распространены, дешевы и доступны. По этой причине акустические активные СО часто называют просто ультразвуковыми (УЗ), точно так же как под звуковыми часто подразуме-

вают пассивные СО, воспринимающие естественные звуки от действий человека. Хотя это не всегда так: акустические активные СО могут работать и в области слышимых звуков, а акустические пассивные – реагировать на ультразвуковые компоненты сигналов.

Излучателем ультразвука является магнитострикционный или пьезоэлектрический элемент. Явление магнитострикции заключается в изменении размеров или формы элемента под действием внешнего магнитного поля. Данный эффект обратимый; один и тот же элемент можно использовать как для преобразования электромагнитной энергии в механическую, то есть в качестве излучателя, так и для преобразования механических колебаний в электрический сигнал, то есть в качестве приемника ультразвука. Свойством магнитострикции обладают многие ферромагнитные материалы, но в качестве преобразователей применяются те, для которых относительное удлинение велико и достигает значений $\Delta l/l = 10^{-5} \dots 10^{-2}$. К ним относятся сплавы пермендюр, алфер, никоси, керамические ферриты на основе никеля, никель, пермаллой.

Преобразователь электрического сигнала в ультразвуковые колебания воздуха обычно представляет собой тонкий стержень из магнитострикционного материала длиной в несколько сантиметров. Вокруг стержня намотана обмотка. При подаче на обмотку периодического электрического сигнала с заданной частотой в сердечнике возникает переменное магнитное поле, которое вызывает удлинение и укорочение сердечника с той же частотой. Концы стержня прикрепляются к тонкой изогнутой пластине (антенне), которая становится излучателем ультразвука в окружающее пространство. Размеры и форма пластины определяют диаграмму направленности излучателя. Аналогичную конструкцию имеет и преобразователь ультразвука в электрический сигнал. Магнитострикционные преобразователи работают в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Они имеют высокий КПД до 0,3...0,5. Основным недостатком магнитострикционного преобразователя – сложность и дороговизна изготовления антенны.

Упростить конструкцию излучателя и приемника ультразвука позволяет применение пьезоэлектрических элементов. Пьезоэффект заключается в формировании заряда в некоторых материалах при их деформации. Пьезоэффект также является обратимым: после подачи на элемент заряда он меняет размеры. Основные пьезоэлектрические материалы – кварц и пьезокерамика. Коэффициент преобразования силы в заряд (пьезомодуль) кварца невелик, он равен $d = 2,31$ пКл/Н. Различные виды пьезокерамики обладают большими значениями пьезомодуля – до нескольких сотен пикокулон на ньютон.

Пьезоэлектрические преобразователи работают на частотах до нескольких гигагерц. Они имеют простую

конструкцию. На частотах до 100 кГц излучатель или приемник обычно выполняется в виде плоской биморфной (то есть состоящей из двух слоев пьезокерамики) пластины, испытывающей поперечные изгибные колебания при подаче периодического электрического сигнала. Для подачи сигнала на противоположные стороны пластины нанесены тонкие слои металла, наподобие обкладок конденсатора. Таким образом, пластина сама является излучателем ультразвуковых колебаний и не требует специальной антенной системы. Преобразование энергии электрического тока в механическую отличается высоким КПД до 0,4...0,7.

Стандартный ультразвуковой пьезокерамический преобразователь представляет собой цилиндр или диск диаметром 10...20 мм с двумя выводами для подачи электрического сигнала. Одно из оснований цилиндра является излучающей (или приемной) поверхностью, поэтому крепление преобразователя должно производиться за боковую поверхность цилиндра (через резиновую звукоизолирующую прокладку). Кроме передающих и приемных преобразователей, имеются универсальные, которые в полной мере используют обратимость пьезоэффекта, и могут одновременно применяться в качестве приемника и передатчика ультразвука. По своему исполнению пьезокерамические преобразователи бывают открытого и закрытого типа. Излучающая пластина открытого преобразователя ничем не защищена, его стойкость минимальна, но он подвержен влиянию многих воздействующих факторов. Закрытый преобразователь находится в герметичном корпусе, он может работать даже в воде.

Основные параметры некоторых пьезокерамических излучателей, приемников и приемопередатчиков приведены в таблицах 2.11.1, 2.11.2 и 2.11.3 соответственно. Они широко распространены и находят применение в качестве датчиков приближения к препятствиям (во время парковки автомобиля), в качестве датчиков открывания дверей, в системах дистанционного управления, в дальномерах, измерителях уровня жидкости, а также и в устройствах охранной сигнализации. Технология их производства отработана, а параметры стабильны. Рабочая частота f большинства преобразователей составляет 40 кГц, угол диаграммы направленности α можно подобрать в соответствии с охраняемым помещением от $\alpha = 50^\circ$ до $\alpha = 100^\circ$. Масса преобразователей находится в пределах 1...6 г. Благодаря монолитной конструкции, пьезокерамические преобразователи отличаются надежностью и стойкостью к ударам и другим механическим воздействиям. Они работоспособны в диапазоне температур от минус 30 до плюс 85°C.

Акустическое активное СО, выполненное на основе пьезокерамических элементов, в среднем обладает следующими характеристиками: охраняемый объем – от 0,03...1 м³ (витрина) до 200...300 м³ (среднее помеще-

Таблица 2.11.1 Пьезокерамические излучатели ультразвука

Название	f, кГц	α , град.	Уровень звукового давления, дБ	Емкость, пФ	Размеры, мм	Стоимость, руб.
MA40B8S (MURATA)	40	50	120	2000	d16×12	170
MA40S4S (MURATA)	40	80	120	2550	d10×7	80
MA40E7S (MURATA)	40	100	106	2200	d18×12	160

Таблица 2.11.2 Пьезокерамические приемники ультразвука

Название	f, кГц	α , град.	Чувствительность, мВ/Па	Емкость, пФ	Размеры, мм	Стоимость, руб.
МА40В8R (MURATA)	40	50	7	2000	d16×12	170
МА40S4R (MURATA)	40	80	7	2550	d10×7	50
МА40E7R (MURATA)	40	100	2	2200	d18×12	160

Таблица 2.11.3 Пьезокерамические приемопередатчики ультразвука

Название	f, кГц	α , град.	Уровень звукового давления, дБ	Чувствительность, мВ/Па	Емкость, пФ	Размеры, мм	Стоимость, руб.
МУП-3 (ЭЛПА)	37...45	75	110	20	1300	d13×11	
МУП-4 (ЭЛПА)	40±1	75	106	10	2500	d14×8	600
МА40S5 (MURATA)	40	70			2550	d10×7	
МА40E7S-1 (MURATA)	40	75	106	3		d18×12	

ние); дальность обнаружения – до 10...12 м; напряжение питания – 10...15 В; потребляемый ток – 20...50 мА; диапазон рабочих температур – от –30...+10°С до +40...+50°С; стоимость – 800...12000 рублей.

Основные достоинства акустических активных СО:

- объемная ЗО; датчик реагирует на любые движения нарушителя, находящегося в прямой видимости излучателя или приемника;
- возможность проведения полного автоматического контроля работоспособности СО; после модуляции излучения передатчика сигналом, идентичным полезному, приемник должен принять сигнал, а алгоритм обработки – активировать сигнал тревоги; в случае неисправности любого элемента СО сигнал не будет сформирован;
- в помещениях большого объема может быть установлено несколько одинаковых СО, если они работают на различных частотах или в импульсном режиме в различные интервалы времени; первое требует возможности перестройки частоты излучения, последнее – прокладки кабелей синхронизации между излучателями и приемниками;
- невосприимчивость к движению людей снаружи охраняемой комнаты, так как УЗ слабо проникает сквозь стены, закрытые окна и двери;
- полная безопасность акустического излучения для окружающих людей.

Основные недостатки акустических активных СО:

- не слишком высокая помехоустойчивость; возможность срабатывания от движущихся предметов или от широкополосных акустических шумов, спектр которых выходит в область ультразвука; причиной ложных срабатываний могут стать подвижные шторы, крутящиеся вентиляторы, потоки воздуха от нагревательных приборов или кондиционеров, сквозняки от открытых форточек, домашние животные, раскаты грома, звонок телефона, вибрация стен; источник помех трудно обнаружить, так как он может находиться в любом месте охраняемого объема, не проявляя себя визуально и не издавая слышимых звуков;
- наличие мертвых зон за крупными предметами, размеры которых превосходят длину волны УЗ колебаний; датчик не реагирует на движение на-

рушителя в зоне, куда колебания не доходят или доходят в значительно ослабленном виде;

- неработоспособность вне помещений.

2.11.1. Лучевые СО

Лучевое УЗ СО – это двухпозиционное средство, оно состоит из излучателя (И) и приемника (П) (рис. 2.11.1). Излучатель формирует ультразвуковую волну в виде узкого луча. Луч направляется на приемник, диаграмма направленности которого также должна иметь форму узкого луча. В случае появления нарушителя он перекрывает луч, что фиксируется блоком обработки (БО), который активирует сигнал тревоги.

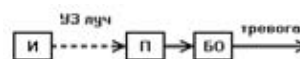


Рис. 2.11.1 Лучевое УЗ СО

Ширина луча должна соответствовать размерам обнаруживаемого объекта. Если она превышает размеры человека, то волна будет попадать на приемник, огибая объект, почти в неизменном виде. Ультразвуковое излучение дискового преобразователя диаметром d имеет вид узкого луча только на небольших расстояниях от передатчика, в так называемой ближней зоне. После выхода из ближней зоны луч постепенно расходится и приобретает вид сферической волны. Протяженность ближней зоны l определяется соотношением $l = d^2 / 4\lambda = fd^2 / 4c$, где λ – длина волны излучения, c – скорость звука, $c = 330$ м/с, f – частота излучения. Взяв частоту излучения $f = 40000$ Гц и диаметр преобразователя $d = 0,01$ м, получим протяженность ближней зоны (и следовательно, дальность лучевого СО) $l = 40000 \times 0,0001 / (4 \times 330) = 3$ мм. Для достижения приемлемой дальности необходимо либо увеличивать размеры излучателя (антенны), либо повышать его частоту.

Устройства медицинской ультразвуковой диагностики работают на частотах 1...10 МГц. Взяв излучатель, используемый в одном из подобных аппаратов, например, с частотой $f = 1$ МГц, получим для длины рубежа $l = 10$ м оценку размера излучателя $d = (4cl / f)^{1/2} = 11$ см, что вполне приемлемо.

Таким образом, лучевое УЗ СО в принципе реализуемо. На частотах порядка мегагерца отсутствуют естественные акустические шумы. Подобное СО может применяться для охраны небольших проходов, проездов, коридоров, холлов, выходов из лифта. Длина волны излучения на частоте $f = 1$ МГц равна $\lambda = c/f = 0,33$ мм. В связи с этим, данное СО нечувствительно к инею и пыли. По сравнению с фотолучевым СО оно не требует очистки и протирки рабочих поверхностей передатчика и приемника. И все же лучевое УЗ СО нельзя найти на полках магазинов. Оно имеет ряд недостатков (по сравнению с теми же фотолучевыми СО): сложность юстировки невидимого УЗ луча; дороговизна изготовления акустической остронаправленной антенны; большое энергопотребление в режиме непрерывного излучения; в импульсном режиме — необходимость прокладки между излучателем и приемником дополнительного провода синхронизации. Поэтому за лучевое УЗ СО остается последний, но немаловажный для охранной сигнализации аргумент, — разнообразие СО, несущее нарушителю новые неожиданности.

2.11.2. Локационные СО

СО локационного типа являются наиболее распространенными среди всех ультразвуковых СО. Их главное достоинство — однопозиционное размещение. Небольшая коробочка локационного УЗ СО найдет место под потолком в любом углу помещения. Там оно не бросается в глаза, но зорко наблюдает за всем происходящим. Даже по сравнению с широко распространенными радиолокационными доплеровскими СО локационное УЗ СО обладает некоторыми преимуществами. Прежде всего, оно способно обнаруживать появление в своей зоне видимости любого объекта, а не только имеющей радиальную составляющую скорости (то есть приближающегося к СО или удаляющегося от него). И связано это с возможностью измерения времени задержки, так как скорость распространения ультразвука значительно ниже скорости распространения электромагнитных волн (скорости света). Кроме того, локационное УЗ СО можно размещать в углу помещения, поскольку при отражении УЗ волны от стен фаза колебаний не меняется. И все же УЗ СО можно встретить не часто, в основном из-за проблем с помехоустойчивостью.

Локационное УЗ СО содержит излучатель и приемник ультразвука, которые почти всегда находятся внутри одного корпуса. Излучаемая акустическая волна отражается ото всех окружающих предметов и возвращается на приемник. Если в ЗО появляется какой-либо предмет, то параметры отраженного сигнала (амплитуда, частота, фаза) меняются и по результатам анализа изменений формируется сигнал тревоги. Изменения параметров могут быть вызваны и помеховыми воздействиями. В качестве помех локационных СО выступают различные подвижные элементы обстановки — вентиляторы, шторы — или источники ультразвуковых колебаний — телефоны, мелкие отверстия в системах вентиляции.

Локационный принцип обнаружения использовался задолго до появления транзистора и электричества. А использовали его летучие мыши. Для ориентации в темноте летучая мышь посылает ультразвуковой импульс частотой 30...70 кГц длительностью 0,01...0,02 с. Анализируя отраженные акустические колебания, мышь определяет местоположение препятствий или добычи в радиусе до нескольких десятков метров.

Техническое средство обнаружения того же принципа действия обычно имеет дальность 5...7 м, покрываемая площадь до 50 м². Максимальная дальность локационного ультразвукового СО достигает 10...12 м. Диаграмма направленности излучателя (и приемника) должна полностью покрывать охраняемое помещение, а из точки установки СО должны быть видны все места возможного появления нарушителя. Поэтому оптимальное место установки — под потолком, а в качестве излучателей и приемников лучше всего использовать преобразователи с широкой (и одинаковой) диаграммой направленности. Угол диаграммы около 90° обеспечивает полное покрытие прямоугольного помещения при установке СО в углу помещения и ориентации оси диаграммы вдоль диагонали угла.

По характеру излучения локационные СО бывают непрерывными и импульсными. Непрерывные постоянно излучают акустическую волну. Они наиболее просты и дешевы, особенно, если частота излучения не меняется. Импульсные СО посылают излучение отдельными короткими порциями. Импульсный режим требует усложнения электронной схемы, но обеспечивает снижение энергопотребления, повышение надежности и маскируемости СО. Импульсный режим позволяет использовать в качестве излучателя и приемника ультразвука один и тот же пьезоэлемент; сначала он генерирует акустический импульс, а затем — пока тот движется вперед, отражается и возвращается назад — переключается в режим приема отраженного импульса.

В зависимости от сложности СО в нем для обнаружения могут использоваться различные параметры отраженного сигнала: в простейших — амплитуда, в более сложных (доплеровских) — частота, а в наиболее совершенных импульсных — еще и задержка по времени. Амплитудный метод заключается в постоянном контроле уровня сигнала, отраженного от стен и других близлежащих предметов. При появлении человека в поле зрения датчика результирующая сумма всех отраженных сигналов изменяется (она не обязательно возрастает). Наличие быстротечного изменения величины отраженного сигнала вызывает срабатывание СО. Однако, такое же изменение будет зафиксировано и при близком подлете к датчику большой мухи, так как излучатель и приемник расположены рядом друг с другом. Их разнос на значительное расстояние лишает СО главного преимущества — однопозиционности.

Эффект Доплера состоит в изменении частоты сигнала, отраженного от движущегося объекта. Величина сдвига частоты пропорциональна скорости объекта и определяется соотношением $\Delta f = 2v/\lambda$, где v — составляющая скорости объекта в направлении на датчик, λ — длина волны излучения, $\lambda = c/f$, c — скорость звука, f —

частота излучения. На частоте $f = 40$ кГц длина волны составляет $\lambda = 330/40000 = 8$ мм. Для скоростей в диапазоне $v = 0,3...3$ м/с сдвиг частоты меняется в пределах $\Delta f = 2v/\lambda = 70...700$ Гц. Положительный сдвиг (частота отраженного сигнала больше излучаемой) свидетельствует о приближении объекта, отрицательный – об удалении.

Определение сдвига частот Δf проводится с помощью смесителя двух сигналов: излучаемого (опорного) сигнала исходной частоты и принимаемого отраженного сигнала. Подача на смеситель опорного сигнала осуществляется либо в виде электрического сигнала по отдельному проводу, либо в виде акустического сигнала, отводимого от излучателя к приемнику по воздуху. В случае непрерывного излучения (или импульсов большой длительности) для этого не приходится прилагать специальных усилий, так как опорный сигнал напрямую или после отражений от неподвижных предметов самостоятельно проникает на приемник. Суммарный сигнал испытывает биения с разностной частотой Δf . Для выделения биений его необходимо протектировать (используя диод или любой другой нелинейный элемент) и сгладить (подавить составляющую опорной частоты f фильтром нижних частот). Если измеренное значение Δf попадает в диапазон $70...700$ Гц, это служит подтверждением действительности сигнала тревоги. Учет дополнительного частотного признака при принятии решения позволяет снизить количество ложных срабатываний.

Излучение акустических колебаний короткими импульсами дает возможность измерения времени задержки принимаемого импульса Δt . Зная величину Δt , можно оценить расстояние до объекта $l = c\Delta t/2$. Диапазону расстояний $l = 1...10$ м соответствуют задержки $\Delta t = 2l/c = 6...60$ мс. Измерение времени задержки (и селекция объектов по дальности) наряду с другими параметрами позволяет снизить вероятность ложных тревог, в частности, от близких мелких подвижных предметов. Впрочем, того же результата можно добиться, излучая сигнал с линейно меняющейся частотой. Это позволяет проводить одновременную селекцию объектов по скорости и дальности – так делается в радиолокации – за счет смешивания текущего сигнала с отраженным, имевшим в момент излучения другую частоту.

Построим физическую модель обнаружения, а с ее помощью – оценим уровни полезных и помеховых воздействий и сигналов, необходимые для синтеза алгоритма обнаружения. Выберем в качестве излучателя и приемника ультразвук преобразователь МУП-4, а режим излучения – непрерывный. Замена преобразователя на другой тип (из приведенных в таблицах 2.11.1, 2.11.2, 2.11.3) почти не отразится на полученном результате.

Уровень звукового давления в режиме излучения равен $L_{изл} = 106$ дБ или $r_{изл} = 4$ Па или $W_{изл} = 0,0025 \times (r_{изл})^2 = 0,04$ Вт/м² (табл. 2.10.1). Традиционно для большинства УЗ преобразователей он измеряется на расстоянии $a = 0,3$ м от излучателя. Полная излучаемая мощность в пределах угла α составит около $R_{изл} = \pi W(\alpha)^2 / 4 = 5$ мВт. Емкость преобразователя $C = 2500$ пФ, так что минимальный потребляемый ток оценивается величиной $I = 2\pi fCU = 6$ мА. Реально потребляемый ток будет несколько выше, так как он уходит

не только на перезарядку конденсатора, но и на деформацию пьезоэлемента (излучение). Таким образом, генератор излучателя должен обеспечивать знакопеременный периодический сигнал с частотой $f = 40$ кГц напряжением около 10 В при токе до 10 мА. С целью упрощения схем вид подаваемого напряжения выбирается не синусоидальным, а импульсным.

Если звук распространяется от излучателя в свободном пространстве, то при удалении в N раз плотность потока энергии W уменьшается в N^2 раз (обратно пропорционально площади волны), а звуковое давление p – уменьшается в N раз (так как энергия пропорциональна квадрату давления). Оценим уровень фонового сигнала в помещении. Основная часть излучения, отражаясь от противоположной стены, как от зеркала, возвращается назад и проходит удвоенное расстояние от датчика до стены. Уровень фонового звукового давления в принимаемой датчиком волне $r_{прм} = K_1 K_2 r_{изл} a / 2A$, где $r_{изл}$ – уровень излучаемого звукового давления на расстоянии $a = 0,3$ м, A – расстояние от датчика до противоположной стены, K_1 – коэффициент отражения, учитывающий частичное поглощение энергии материалом стены, в офисных и жилых помещениях $K_1 = 0,8$, K_2 – коэффициент увеличения давления за счет отражения от боковых стен, K_2 меняется от 1 (при размещении остронаправленного преобразователя в центре стены) до 8 (при размещении всенаправленного преобразователя в углу под потолком). Для исходных значений $K_1 = 0,8$, $K_2 = 1...4$, $r_{изл} = 2...4$ Па (возможно некоторое снижение уровня излучения за счет неточной настройки на резонансную частоту), $a = 0,3$ м, $A = 1...5$ м (от салона автомобиля до небольшого помещения) принимаемый уровень составит $r_{прм} = 0,05...2$ Па. Чувствительность $k = 10$ мВ/Па обеспечивает на выходе ЧЭ фоновый электрический сигнал в пределах $U_{прм} = kr_{прм} = 0,5...20$ мВ, величина которого зависит в основном от размеров помещения.

Оценим уровень полезного сигнала, то есть величину, на которую меняется фоновый уровень при появлении человека. Если человек находится на расстоянии B ($B < A$, $B = 1...5$ м), то на него попадает акустическая волна мощностью $w = W_{изл} \times (a/B)^2 \times S$, где S – площадь сечения человека плоскостью, перпендикулярной направлению распространения волны, $S = 0,5...1$ м². Отразившись от человека (с коэффициентом отражения $\eta = 0,8$), волна распространяется во все стороны и в точке установки приемника имеет плотность потока энергии $\Delta W_{прм} = \eta w / 4\pi B^2 = \eta W_{изл} S a^2 / (4\pi B^4) = (0,05...230)$ мкВт/м². То же соотношение в единицах звукового давления имеет вид $\Delta r_{прм} = (a r_{изл} / B^2) \times (\eta S / 4\pi)^{1/2} = (0,004...0,3)$ Па, где $\Delta r_{прм}$ – изменение фонового уровня при появлении ОО. Данный вклад может прибавляться к фоновому уровню или вычитаться из него в зависимости от текущего соотношения фаз в обеих волнах. Соответствующее изменение электрического сигнала на выходе ЧЭ – $0,04...3$ мВ. Оно зависит в основном от расстояния до нарушителя. Глубина модуляции полезного сигнала $m = \Delta r_{прм} / r_{прм} = (2A / K_1 K_2 B^2) \times (\eta S / 4\pi)^{1/2}$. На дальности до 5 м она не опускается ниже $m = (2 \times 5) / (0,8 \times 4 \times 25) \times (0,8 \times 0,5 / 4\pi)^{1/2} = 0,02$. На расстоя-

ниях до 10...12 м она снижается до одного процента. При дальнейшем увеличении дальности полезная модуляция теряется на фоне естественных шумов.

Основными источниками помех являются подвижные элементы интерьера. Интенсивность помеховых воздействий оценивается аналогично предыдущему. Она пропорциональна площади шторы, жалюзи, лопасти вентилятора или вибрирующей стены при условии их перемещения со скоростью в диапазоне 0,3...3 м/с.

Блок-схема алгоритма, построенного в соответствии с полученными исходными данными, приведена на рис. 2.11.2. Генератор (Г) формирует непрерывный периодический сигнал частотой 40 кГц. Он подается на пьезоизлучатель (ПИ). Ультразвук распространяется от ПИ и, отражаясь от окружающих предметов, попадает на пьезоприемник (ПП). Сигнал с выхода ПП усиливается каскадом У1 в 200 раз, доводя максимальный фоновый уровень (20 мВ) до напряжения 4 В (половина напряжения питания). При этом минимальный фоновый уровень (0,5 мВ) поднимается до 0,1 В.

Сигнал на выходе У1 имеет вид двухполярных импульсов с частотой 40 кГц. Далее выделяется их огибающая с помощью детектора (ДО), которая затем разделяется на постоянную и переменную составляющие. Наличие постоянной составляющей на выходе ДО (в пределах 0,1...4 В) свидетельствует о исправности СО. Если присутствует фон, значит ПИ излучает, а ПП принимает (и стены на месте). Если же фон в течение длительного времени опускается ниже 0,1 В, то следует активировать сигнал тревоги в связи с вероятной неисправностью одного из элементов (ПИ или ПП). Для этой цели служат фильтр нижних частот (ФНЧ), выполняющий роль интегратора с постоянной времени порядка 10...20 с и компаратор (К1).

Постоянная составляющая на выходе ДО несет информацию о фоновых отражениях, переменная — о появлении нарушителя. Ее амплитуда в данной точке — 8...600 мВ. Для обнаружения необходима только переменная составляющая, поэтому далее стоит полосовой фильтр (ПФ).

Излучая импульс постоянной интенсивности, можно было бы ожидать, что при появлении человека также будет возникать постоянная (или плавно меняющаяся) добавка к фоновому уровню в течение всего времени его нахождения в ЗО. Причем, добавка должна быть положительной, так как человек появляется ближе к датчику, чем противоположная стенка. В действительности за счет интерференции импульс оказывается не непрерывным с постоянной амплитудой, а изрезанным, имеющим вид серии многочисленных двухполярных импульсов. Такая форма сигнала обязана своим появлением двум факторам.

Первый — эффект Доплера. В случае непрерывного излучения приемник всегда получает фоновую акусти-

ческую волну исходной частоты, а при появлении нарушителя — добавку с доплеровским сдвигом Δf . В результате возникают биения с частотой $\Delta f = 70...700$ Гц и глубиной модуляции m .

Второй фактор — стоячие волны. В замкнутом объеме в результате наложения падающих и отраженных (от стен, различных предметов, людей) бегущих волн образуются стоячие волны. Расстояние между соседними узлами и пучностями составляет половину длины волны $\lambda/2 = c/2f = 330/(2 \times 40000) = 4$ мм. При смещении человека на это расстояние узел меняется на пучность и вновь на узел, то есть проходит один период колебания, частота которого составит $\Delta f = 2v/\lambda$. Таким образом, наличие стоячих волн приводит к модуляции отраженного сигнала с частотой, в точности равной частоте доплеровского сдвига. В случае непрерывного излучения постоянной частоты и размещения излучателя и приемника в одной точке разделить влияние обоих факторов затруднительно. Импульсные или двухпозиционные активные УЗ СО позволяют не только различать факторы, но и извлекать из этого выгоду.

Завершая блок-схему локационного УЗ СО (рис. 2.11.2), диапазон ПФ составляет 70...700 Гц. Далее следует усилитель (У2) с регулируемым коэффициентом усиления $K_{УС} = 12...1000$, позволяющим довести переменные входные сигналы (8...600 мВ) до уровня напряжения питания. Усиленный сигнал поступает на компаратор (К2), выделяющий отдельные импульсы, накопитель импульсов (Н) и РТ.

Блок-схема без труда преобразуется в электронную схему локационного УЗ СО (рис. 2.11.3). Генератор на элементах DD1.1, DD1.2, ZQ1, R1, R2, C1, C2 вырабатывает непрерывную периодическую последовательность импульсов с частотой 400 кГц. В дальнейшем путем деления из нее будет получена частота 40 кГц. В данном случае выбран недорогой и распространенный кварцевый резонатор ZQ1 типа РК46 7ДЧ 400к. Найти кварц на частоту 40 кГц будет непросто. С небольшой доработкой схемы подойдет любой кварцевый генератор с частотой, кратной 40 кГц. В данном месте можно было бы установить RC-генератор на двух инверторах и настроить его на частоту максимального излучения (она близка к частоте 40 кГц, но не равна ей в точности). RC-генератор прост и позволяет добиться максимальной отдачи излучателя, но только в момент настройки. RC-генератор нестабилен; спустя несколько дней уровень излучения отклонится от максимального, а после изменения температуры уровень может упасть настолько, что СО потеряет значительную часть чувствительности. Для поддержания работоспособности его придется регулярно подстраивать. Кварцевый генератор с фиксированной частотой не обеспечивает оптимального уровня излучения, но зато он не нуждается в настройке; и через несколько лет, и после изменения температуры

уровень излучения останется прежним. Кроме того, наличие кварцевого генератора позволяет при необходимости без особых усилий организовать импульсный режим работы излучателя, точное изме-

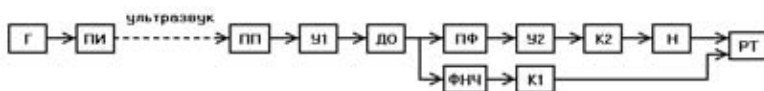


Рис. 2.11.2 Блок-схема локационного ультразвукового СО

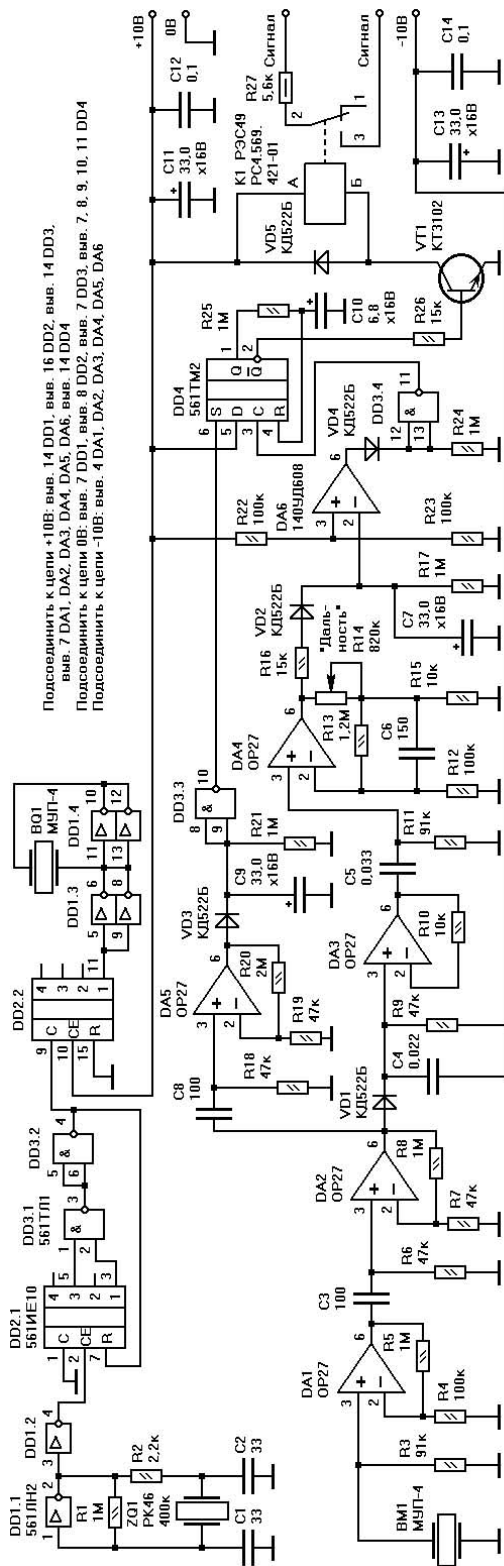


Рис. 2.11.3 Локационное ультразвуковое СО

рение доплеровского сдвига частоты и времени задержки отраженного сигнала.

Делитель на элементах DD2.1, DD3.1, DD3.2, DD2.2 обеспечивает на выводе 11 DD2.2 меандр со стабильной частотой 40 кГц. Меандром называется пе-

риодическая последовательность импульсов, длительность каждого из которых равна продолжительности паузы. Наличие сигнала такого вида важно для управления пьезоэлектрическим излучателем ВQ1, так как асимметричный сигнал приведет к накоплению постоянного заряда на обкладках элемента и снижению эффективности его работы.

Преобразователь на четырех инверторах DD1.3, DD1.4 симметрирует подаваемые на ВQ1 импульсы, прикладывая напряжение попеременно к противоположным обкладкам преобразователя. Параллельное соединение инверторов способствует снижению выходного сопротивления генератора.

Отраженный акустический сигнал принимается ультразвуковым преобразователем ВМ1. Резистор R3, подсоединенный параллельно датчику, служит для выравнивания выходного сигнала в случае воздействия несимметричной акустической волны. Постоянная времени разряда емкости датчика $C = 2500$ пФ через резистор R3 должна быть значительно больше периода принимаемых колебаний, то есть $R3C \gg 1/f = 1/40000$. Поэтому $R3 \gg 10$ кОм.

Работа с высокочастотными сигналами требует применения быстродействующих ОУ, таких как LM318, NE5534, OP27, AD818. Каскады на элементах DA1, R4, R5, C3, R6, DA2, R7, R8 усиливают электрический сигнал с датчика на частоте 40 кГц в 200 раз. Одновременно ФВЧ C3, R6 пропускает сигнал только на частотах выше $f = 1 / (2\pi R6C3) = 30$ кГц. Детектор огибающей VD1, C4, R9 сглаживает высокочастотные составляющие. На его выходе остаются сигналы доплеровских частот (70...700 Гц), а фоновый сигнал несущей (40 кГц) – теперь уже только в виде нежелательной помехи.

После повторителя на DA3, R10 следует усилитель сигнала доплеровской частоты. Он выполнен на элементах C5, R11, DA4, C6, R12, R13, R14, R15. Коэффициент усиления регулируется переменным резистором R14 в пределах 12...1000. Данный каскад осуществляет также фильтрацию сигналов в полосе частот 50...1000 Гц.

Сигнал с выхода DA4 поступает на накопитель на элементах R16, VD2, C7, R17. Выходной сигнал накопителя – напряжение на конденсаторе C7. Он превышает порог компаратора (+5 В), если общая длительность выбросов сигнала доплеровской частоты превысит 1/3 секунды. Время разряда конденсатора C7 через резистор R17 называется временем накопления или временем памяти. Оно соответствует продолжительности полезного сигнала и составляет $T = 0,7R17C7 = 20$ с.

После накопителя следуют компаратор на элементах DA6, R22, R23, VD4, R24, DD3.4 и ПТ на элементах DD4, R25, C10, R26, VT1, K1, VD5, R27. Цепочка C8, R18, DA5, R19, R20, VD3, C9, R21, DD3.3 служит для формирования срабатывания в случае длительного исчезновения отраженного фонового сигнала частотой 40 кГц.

Приведенный вариант локационного УЗ СО использует для активации срабатывания минимальное количество информации – наличие в сигнале возмущений, интенсивность и длительность которых превышает заданные пороговые значения. СО удовлетвори-

тельно работает в помещении небольшого объема или в благоприятной помеховой обстановке, например, в салоне автомобиля, чужане или кабинете. В больших помещениях помеховые факторы нарастают как снежный ком. Появляются подвижные шторы, вентиляция, жалюзи, животные, насекомые, кондиционеры, телефоны, различные бытовые приборы. Чтобы в подобных условиях избежать ложных срабатываний и пропусков нарушителя, необходимо вводить селекцию сигнала тревоги по дополнительным признакам – частоте Доплера (скорости передвижения объекта) и времени задержки отраженного импульса (расстоянию до объекта). Начальные затраты на изготовление СО возрастут, но стоимость последующего обслуживания сократится многократно. А главное – возрастет уверенность в безошибочной работе прибора, он снимет с нас очередную «головную боль».

2.11.3. Объемные СО

Излучатель и приемник локационного УЗ СО размещаются вблизи друг от друга или совмещаются в одном элементе. С этим связана значительная неравномерность его чувствительности. Уровень отраженного фоновый сигнала от близких предметов на несколько порядков превышает полезные сигналы от удаленных объектов и заглушает последние. Чувствительность максимальна вдоль оси излучателя (и приемника) и убывает по мере отклонения от нее. Однопозиционная конструкция СО связывает руки и не позволяет применить иной вариант размещения или ориентации составных частей. Чтобы превратить активное ультразвуковое СО в реально объемное, способное в одинаковой мере чутко реагировать на появление человека в любой точке помещения, имеющего значительный объем, и не реагировать на передвижение небольших предметов, находящихся вблизи от СО, необходимо разделить передатчик и приемник, установив их в виде отдельных блоков в различных точках помещения.

Объемное УЗ СО состоит из передатчика ультразвуковых колебаний (ПРД) и приемника ультразвука (ПРМ), совмещенного с блоком обработки (БО), который проводит анализ принимаемого сигнала и активирует сигнал тревоги. Передатчик и приемник устанавливаются на противоположных стенах помещения со смещением в разные стороны относительно его оси (рис. 2.11.4) или даже в противоположных углах, чтобы принимаемые акустические колебания поступали не напрямую от излучателя, а с наибольшим количеством переотражений (от стен, потолка и пола).

Излучение блока ПРД заполняет помещение стоячими акустическими волнами, а их уровень контролируется блоком ПРМ. Расстояние между соседними узлами (или пучностями) стоячей волны a составляет половину длины волны $a = \lambda/2$, на частоте $f = 40$ кГц длина волны $\lambda = c/f = (330 \text{ м/с}) / (40000 \text{ Гц}) = 0,008 \text{ м}$, а величина $a = 4 \text{ мм}$. Войдя в помещение, человек меняет картину стоячих волн, а следовательно, и уровень принимаемого излучения. Уровень то поднимается, то

вновь опускается. Каждому положению человека соответствует определенный постоянный уровень, причем, он никак не связан с мгновенной скоростью движения. Именно это отличает возмущения картины стоячих волн от доплеровского сдвига. Один период изменения уровня соответствует перемещению человека на $\lambda/2$.

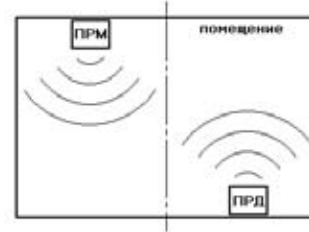


Рис. 2.11.4 Размещение блоков объемного УЗ СО

Известно, что стоячая волна образуется в результате наложения двух встречных бегущих. Для того, чтобы СО приобрело чувствительность к перемещению человека вдоль некоторого направления, должно быть хотя бы одно отражение излучаемой волны от стены, перпендикулярной к этому направлению. Четыре стены помещения, его пол и потолок формируют узлы и пучности стоячих волн во всех трех взаимно перпендикулярных направлениях. Чем больше отражений претерпевает излучение на пути от ПРД к ПРМ, тем равномернее будет СО.

Если стены помещения покрыть материалом, полностью поглощающим ультразвук, то стоячие волны не образуются и объемное СО теряет работоспособность. Правда подобные материалы в быту не встречаются. Даже специальные покрытия, используемые в студиях звукозаписи, обладают коэффициентом отражения не менее 0,1. Обычные для бытового интерьера ковры и шторы имеют коэффициент отражения 0,5...0,6, деревянные и кирпичные стены – 0,8...0,9, стекло и штукатурка – 0,95...0,99. Тем не менее, эффективность применения объемного УЗ СО возрастает при отсутствии в помещении звукопоглощающих предметов (ворсистых материалов, зарешеченных полостей, открытых окон). Единственное, что может помешать работе объемного УЗ СО, – это полное отсутствие стен. Данное СО является чисто внутренним, оно не может использоваться на открытой местности.

Объемные УЗ СО могут носить другие названия – УЗ СО на основе стоячих волн или двухпозиционные УЗ извещатели. Хотя двухпозиционное СО может быть и доплеровским, а количество приемных блоков в составе объемного УЗ СО не ограничено – их может быть и два, и три, и более. Одним приемником обычно ограничиваются только из соображений экономии.

При работе излучателя в импульсном режиме синхронную работу приемника (или приемников) обеспечивает передача импульсов синхронизации от ПРД к каждому ПРМ по специальному кабелю. Если в одном помещении установлен один излучатель, то синхронизация желательна, но не обязательна. Если же объем помещения велик и поэтому блоков ПРД несколько, то без взаимной синхронизации всех блоков ПРД и ПРМ

не обойтись. Излучатели работают на одной частоте (40 кГц), поэтому они должны возбуждать колебания по очереди, а каждый приемник должен отличать акустический импульс своего ПРД от чужого.

Максимальному наполнению объема помещения стоячими волнами способствует размещение ПРД и ПРМ под потолком на максимальной высоте. Изменение расстановки мебели не вынуждает искать новые места для размещения блоков ПРД и ПРМ и перевешивать их. Излучатели и приемники (или их антенны) должны быть всенаправленными. При установке ПРД (или ПРМ) в углу помещения полный уровень излучения возрастает за счет отражений от каждой из стен. Коэффициент отражения при углах падения, близких к 90° , почти равен 1, а фаза акустических колебаний при отражении не меняется, поэтому интенсивность всенаправленного излучателя возрастает пропорционально количеству зеркальных отражений. То же относится и к точке установки ПРМ. Наилучшие характеристики обнаружения достигаются, если место передвижения нарушителя находится в прямой видимости из точек установки ПРД и ПРМ. Диаграммы направленности ПРД и ПРМ не должны быть ориентированы друг на друга, чтобы фоновый сигнал не превалировал над сигналом, отраженным от нарушителя.

Частота акустических колебаний излучателя 40 кГц располагается вне диапазона слышимости человека. На ее выборе следует остановиться несколько подробнее. Небольшая длина волны (8 мм) обеспечивает высокую чувствительность к мельчайшим перемещениям человека, а заодно — и к колебаниям штор или вибрации оконных стекол. Наилучший результат по соотношению вероятности обнаружения и помехоустойчивости даст излучение с длиной волны λ , близкой к размерам человека или отдельных частей его тела, то есть $\lambda = 0,1 \dots 0,3$ м. Эффективно реагируя на движение человека, оно не будет подвержено влиянию передвижения более мелких объектов или крупных предметов на небольшие (в несколько сантиметров) расстояния. Соответствующие частоты ($f = c/\lambda = 1000 \dots 3000$ Гц) лежат в области звуковых колебаний, причем, наиболее хорошо слышимых. Если смириться с постоянным писком СО в режиме охраны, то можно добиться не только повышения помехоустойчивости, но и удешевления датчика, так как излучатели и приемники звуковых колебаний данного диапазона легко доступны. В качестве излучателя подойдет динамик небольшой мощности, а в качестве приемника — обычный микрофон. В технике охранной сигнализации встречаются активные акустические СО, работающие на частотах порядка 1 кГц — для оборудования безлюдных объектов. Находят распространение и СО, работающие на самых низких частотах (15...20 кГц), которые уже практически не слышны, но обеспечивают максимальную длину волны.

Блок-схема объемного УЗ СО (рис. 2.11.5) во многом аналогична рассмотренной ранее блок-схеме локационного УЗ СО (рис. 2.11.2). Генератор (Г) формирует периодическую последовательность импульсов, подаваемых на пьезоизлучатель (ПИ). Длительность импульса должна быть не менее 10 периодов (0,25 мс при частоте 40 кГц). Г и ПИ образуют передающий блок (ПРД). Наряду с импульсами ультразвуковых колебаний на частоте 40 кГц он генерирует синхроимпульсы, отмечающие моменты работы ПИ. Синхроимпульсы передаются по кабелю на приемный блок (ПРМ), где используются для точной интерпретации принимаемого акустического сигнала.

Акустические импульсы поступают на пьезоприемник (ПП), где преобразуются в электрический сигнал. Он поступает на усилитель (У1), коэффициент усиления $K_{УС}$ которого пропорционален размерам помещения. В соответствии с полученными ранее оценками, для помещения площадью 25 м^2 он примерно равен $K_{УС} = 200$. Усилитель У1 выполняет одновременно функцию узкополосной фильтрации в полосе излучения (40 ± 1) кГц. Усиленный сигнал поступает на детектор огибающей (ДО). Он может быть выполнен на основе схемы выборки/хранения, фиксирующей на своем выходе среднюю амплитуду принятого импульса и сохраняющей ее до следующего импульса. Здесь будет полезна информация о моментах излучения ПРД. При этом необходимо учитывать, что задержка распространения акустической волны на расстояниях до 10 м может достигать $(10 \text{ м}) / (330 \text{ м/с}) = 30 \text{ мс}$.

Сигнал огибающей поступает на фильтр нижних частот (ФНЧ) с большой постоянной времени (20...40 с). На выходе ФНЧ — среднее значение постоянной составляющей, то есть средний уровень фонового сигнала, возникающего за счет отражений акустической волны от стен и предметов, постоянно находящихся в помещении. В случае длительного исчезновения фонового сигнала срабатывает компаратор (К1), а РТ формирует непрерывный сигнал. Он свидетельствует о возникновении неисправности в излучателе, приемнике или канале их акустической связи, которая нарушает возможность нормальной работы СО.

После того, как сигнал огибающей проходит полосовой фильтр (ПФ), сохраняется только его переменная составляющая. Ранее была получена оценка диапазона частот переменной составляющей локационного СО 70...700 Гц для радиальных скоростей нарушителя 0,3...3 м/с. Объемное СО может реагировать и на тангенциальные смещения при некотором уменьшении диапазона частот ПФ, так как узлы и пучности равномерно заполняют весь объем, но в тангенциальном направлении идут с большим шагом. Отфильтрованный и усиленный сигнал с выхода У2 поступает на компаратор К2. Порог его срабатывания регулируется в зависимости от объема помещения. Завершают схему накопитель (Н) и РТ.

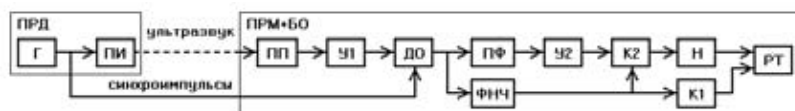


Рис. 2.11.5 Блок-схема объемного ультразвукового СО

2.12. Ольфакторные СО

Ольфакторное СО многими воспринимается как курыз, но внимательный взгляд способен найти в нем новые перспективы. Принцип действия ольфакторного СО заключается в регистрации запахов. Обобщая принцип, можно распространить его на обнаружение в воздухе любых газов или веществ, связанных с появлением человека. Закрыв глаза и заткнув уши, вряд ли кому-либо удастся обнаружить приближение к нему другого человека по запаху. Конечно, если этот другой не пришел с пожара, не пьян и не вылез из канализационного люка. Собаки или насекомые гораздо более чувствительны. Комары находят человека по запаху на расстоянии в 10...20 метров.

Запах можно измерить предельной концентрацией вещества, то есть его минимальным количеством в единице объема воздуха, когда оно все еще отчетливо ощущается. Нос — очень тонкий прибор. Обычно запахам, воспринимаемым человеком, соответствуют концентрации до 10^{-9} ... 10^{-11} г/л. Чувствительность животных — на несколько порядков выше.

Запахи имеют в жизни животных важное значение, а органы обоняния у них сильно развиты. Поэтому первые ольфакторные СО использовали в составе ЧЭ различных мелких насекомых. В небольшой прозрачной баночке размещалось несколько десятков клопов. При приближении людей активность клопов возрастала, они начинали передвигаться по дну баночки. Сверху устанавливался источник света, а снизу — приемник. Возросшая активность приводила к более частому прерыванию светового луча, что фиксировалось электронной схемой.

Подобное СО не отличается высокой помехоустойчивостью. Активность насекомых может быть не связана с приближением людей. Возможны и пропуски человека по причине временной апатии ЧЭ. Насекомых надо кормить, чтобы поддерживать их жизнедеятельность, но не перекармливать, чтобы они не потеряли интерес к объекту обнаружения. Неприятности ждут и при случайном открывании банки. Ольфакторные СО с насекомыми не имеют особых перспектив, но сам принцип не теряет от этого важности.

Другая разновидность ольфакторных СО основана на чисто электронном анализе изменений химического состава воздуха и принятии решения по его результатам. Такие СО называются также газоанализаторными. Они чувствительны к веществам, выделяемым человеком в воздух при дыхании. Может быть, кто-то предпочтет термин «газоанализаторные СО», но лично мне ближе «ольфакторные» — это слово звучит приятно и обнадеживающе.

В естественном состоянии в составе атмосферного воздуха можно выделить пять основных компонент: азот, кислород, инертные газы, водяные пары и углекислый газ (табл. 2.12.1). Приведенные данные соответствуют сухому воздуху. Состав традиционно измеряется в объемных долях (или в процентах, 1% = 0,01); для незначительных примесей часто используется бо-

лее мелкая единица 1 ppm = 10^{-6} , равная одной миллионной части объема, и еще более мелкая 1 ppb = 10^{-9} или одна миллиардная часть объема. Переход от объемных долей к массовым осуществляется через плотность соответствующей компоненты. В этом случае полезно знать среднюю молекулярную массу воздуха $M_{\text{возд}} = 29$.

Таблица 2.12.1 Состав воздуха

Газ	Объемная доля в атмосферном (вдыхаемом) воздухе	Объемная доля в выдыхаемом воздухе
Азот	0,7809	0,787
Кислород	0,2095	0,163
Инертные газы	0,0093	0,009
Углекислый газ	0,0003	0,040
Водяные пары	Определяется влажностью	Возрастает

Количество азота и инертных газов в воздухе неизменно. Доля водяных паров зависит от влажности воздуха. Их количество значительно и непостоянно, поэтому в составе воздуха без необходимости не учитывается, а объемный состав воздуха рассчитывается по отношению к сухому (обезвоженному) газу. Углекислый газ образуется в процессе дыхания, гниения или горения, он же интенсивно поглощается растениями и водой. Его доля в воздухе может значительно меняться от местности к местности.

Кроме пяти основных составляющих, в атмосферном воздухе находится множество других газов и примесей, но их концентрация невелика и часто нестабильна. Объемная доля метана — около 2 ppm, сернистого ангидрида — 1 ppm, водорода — 0,5 ppm, закиси азота — 0,5 ppm.

В выдыхаемом человеком воздухе доля кислорода уменьшается, а углекислого газа и воды — увеличивается. Судить о появлении человека по возрастанию количества паров воды невозможно, так как при изменении влажности происходят более значительные изменения. Другое дело — углекислый газ, его естественная концентрация более стабильна.

Во время покоя человек совершает 17 выдохов в минуту каждый по 0,5 л. Работа вызывает более интенсивное дыхание. Минутный объем дыхания (МОД — объем воздуха, выдыхаемого человеком за одну минуту) изменяется от МОД = 8 л/мин. в покое до МОД = 120 л/мин. во время интенсивной работы. За одну минуту человек выделяет углекислый газ, объем которого составляет $V_1 = \text{МОД} \times 0,04 = 0,3...5$ л, а масса $m_1 = V_1 \times \rho_{\text{УГ}}$, где $\rho_{\text{УГ}}$ — плотность углекислого газа, $\rho_{\text{УГ}} = 2$ г/л, то есть $m_1 = 0,6...10$ г.

Относительный предел обнаружения веществ химическими методами составляет $\eta = 10^{-6}...10^{-8}$. Из этого следует оценка объема помещения $V_{\text{пом}}$, внутри которого

можно обнаружить человека (через одну минуту после его появления при отсутствии сквозняков), $V_{\text{ПОМ}} = V_1 / \eta < 300 \text{ м}^3$. Предел обнаружения вещества химическими методами в абсолютном выражении составляет не менее $m_{\text{ПРОБ}} = 1 \text{ мкг}$. Поэтому объем пробы воздуха, взятой в помещении для анализа, можно оценить величиной $V_{\text{ПРОБ}} = m_{\text{ПРОБ}} \times V_{\text{ПОМ}} / m_1 = 10^{-6} \times 300 / 0,6 = 0,5 \text{ л}$.

Реализуемость подобного метода обнаружения человека в замкнутом пространстве объемом до $V_{\text{ПОМ}} = 10 \text{ м}^3$ по содержащемуся в выдыхаемом воздухе углекислому газу несложно проверить на практике. Если через раствор гидроксида кальция продувать воздух помещения со скоростью около 3 л/с, то за одну минуту вместе с $V_2 = 180$ литрами в раствор перейдет примерно $m_2 = m_1 \times V_2 / V_{\text{ПОМ}} = 0,6 \times 0,18 / 10 = 0,01 \text{ г}$ углекислого газа, что вызовет заметное помутнение раствора.

Количественные измерения содержания углекислого газа в выдыхаемом воздухе распространены в медицине, где носят название капнометрии. Они обладают высокой чувствительностью и точностью. Типичный измеритель концентрации CO_2 имеет диапазон измерения 0...0,05 (в объемных долях), чувствительность – 0,0001, время измерения – 30 с, скорость отбора воздуха – 0,01...0,5 л/мин.

Химические методы анализа – хроматография, эмиссионная спектрометрия, абсорбционный спектральный анализ, масс-спектрометрия и другие – применительно к использованию в составе СО обладают рядом недостатков: они дороги, требуют для измерения значительного времени и с трудом автоматизируются. Кроме того, использование в качестве анализируемого вещества углекислого газа подвержено ложным срабатываниям от устройств, в которых применяется горение, – газовых плит, автомобильных двигателей, костров, газосварки, мусоросжигательных заводов и т. д. Поэтому для обеспечения лучших показателей следует выбрать более подходящее анализируемое вещество и другой метод измерения с прямым преобразованием концентрации вещества в электрический сигнал.

Кроме пяти основных компонент (табл. 2.12.1), в выдыхаемом человеком воздухе содержится более 400 различных соединений, но в гораздо меньших количествах. Многие вещества не только характерны для человека, но даже позволяют судить о его здоровье и физическом состоянии, что используется в медицинской диагностике. Наибольшую долю составляют ацетон (объемное содержание 0,5...2 ppm или соответствующая ему концентрация $\xi_{\text{дых}} = 1,3...5 \text{ мг/м}^3$), этанол (0,1...70 ppm или 0,2...140 мг/м³), изопрен (0,3 мг/м³), ацетонитрил (0,2 мг/м³), в ощутимых количествах (порядка 0,1 мг/м³) присутствуют пентан, дихлорметан, бензол, аммиак. При этом содержание многих веществ (в том числе ацетона и аммиака) возрастает во время физической работы в разы.

Выберем в качестве индикатора присутствия человека одно из веществ, концентрация которого в выдыхаемом воздухе превышает 0,1 мг/м³, например, ацетон. В течение минуты в воздухе окажется $m_3 = \xi_{\text{дых}} \times \text{МОД} > 10 \text{ мкг}$ ацетона, а в помещении среднего объема

$V_{\text{ПОМ}} = 100 \text{ м}^3$ его концентрация составит $\xi_{\text{ПОМ}} = m_3 / V_{\text{ПОМ}} = 10^{-7} \text{ г/м}^3 = 0,04 \text{ ppb}$. Каковы возможности обнаружения и измерения подобных концентраций?

В настоящее время газоанализ для измерения малых концентраций примесей используется с целью экологического контроля за состоянием атмосферы, обнаружения утечек бытового газа, предупреждения взрывоопасных ситуаций, обнаружения возгораний или в целях медицинской диагностики. Проводится анализ наличия различных примесей – метана, углеводородов, аммиака, монооксида углерода и других, – как по отдельности, так и в определенных сочетаниях. Недорогие карманные анализаторы работают с использованием электрохимических, каталитических, инфракрасных или оптических датчиков. Они обеспечивают чувствительность порядка 1 мг/м³ ($\approx 1 \text{ ppm}$), то есть могли бы использоваться в качестве ЧЭ, если бы нарушитель выдыхал воздух прямо в него, как в алкотестер, или если через газоанализатор прокачивать весь воздух помещения. Ясно, что здесь требуются более чувствительные методы.

Измерение сверхнизких концентраций примесей в воздухе обеспечивает инфракрасный оптико-акустический газоанализ. Луч инфракрасного лазера модулируется сигналом звуковой частоты. Длина волны излучения медленно меняется. Луч направляется на анализируемую пробу воздуха. На определенной длине волны, соответствующей линии поглощения одной из примесей, проба начинает излучать звуковой сигнал. Интенсивность звука пропорциональна концентрации примеси. Таким образом удается идентифицировать примеси и измерять их концентрации с чувствительностью порядка 1 ppb. При объеме пробы около 10 см³ время измерения не превышает 1...3 с. Подобные приборы идентифицируют несколько десятков различных примесей, но они пока громоздки и дорогостоящи.

В последнее время интенсивно развивается идея «электронного носа», предназначенного для медицинских и экологических исследований. Он может быть одновременно и чувствительным, и компактным, и недорогим. Один из методов газоанализа основан на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Принцип действия заключается в возбуждении ПАВ в специальном кристалле и контроле параметров волны. Поверхность кристалла покрывают полимером, избирательно поглощающим из воздуха определенное вещество. В результате достигается чувствительность до 10⁻¹² грамма осажденной на поверхность кристалла примеси. При требуемой концентрации $\xi_{\text{ПОМ}} = 10^{-7} \text{ г/м}^3$ необходимо взять пробу воздуха объемом всего лишь 10⁻¹² / 10⁻⁷ = 10⁻⁵ м³ = 10 см³, прокачав его над поверхностью кристалла.

Датчик на ПАВ необходимо периодически освобождать от груза осевших примесей, иначе не избежать ложного срабатывания от длительного накопления вещества в малой концентрации. К тому же без очистки датчик станет одноразовым. Сброс примесей проводится периодическим нагреванием кристалла или обдувом, более интенсивным, чем в рабочем режиме.

Таким образом, ольфакторные СО не только существуют, но и имеют неплохие перспективы. Можно идти по пути обнаружения углекислого газа, выделяемого человеком в больших количествах, но смирившись с длительным временем анализа и возможными ошибками. Обнаружение примесей, выделяемых человеком в меньших количествах, требует изготовления высокочувствительных датчиков, но взамен позволит добиться высокой надежности обнаружения. Ольфакторные СО мало распространены, так как его минусы пока перевешивают имеющиеся плюсы.

Основные достоинства ольфакторных СО:

- непревзойденная маскируемость; среди множества пассивных датчиков есть немало таких, которые можно устанавливать в любой точке охраняемого помещения, но есть всего лишь несколько типов, которые можно без потери качества устанавливать вне помещения; ольфакторные СО не только возможно, но даже целесообразно размещать в трубах вытяжной вентиляции, куда постоянно поступает весь воздух из комнаты; а если датчика там нет, то никто не сможет его и обнаружить;
- компактность;

- ЗО в точности совпадает с объемом помещения, не имея мертвых зон и теневых областей; повышению помехоустойчивости способствует фильтрация примесей из воздуха, поступающего в помещение, например, с помощью средств очистки воздуха, установленных в системе приточной вентиляции;
- простота монтажа, в ходе которого не требуется настройка;
- отсутствие необходимости технического обслуживания;
- простота организации полного автоматического контроля работоспособности через приточную вентиляцию.

Основные недостатки ольфакторных СО:

- отсутствие необходимых высокочувствительных датчиков (не углекислотных);
- ограниченная область применения; ольфакторные СО работоспособны лишь в замкнутых помещениях небольшого объема; необходимо закрывать окна, двери, форточки, дымоходы и т. п.;
- высокая стоимость, связанная с ограниченной распространенностью;
- инерционность; достоверное обнаружение требует продолжительного анализа.

2.13. Радиационные СО

Принцип действия радиационных СО основан на регистрации проникающих через воздух радиоактивных частиц. Радиационное СО может называться также радиоизотопным. Основные типы радиоактивных частиц — это альфа-, бета- и гамма-частицы, протоны и нейтроны. Они отличаются друг от друга по своей физической природе, энергии и проникающей способности.

В радиационных СО может быть реализован как пассивный, так и активный принцип действия. Сначала оценим возможности пассивного принципа. В теле человека содержится ряд химических элементов, обладающих естественной радиоактивностью. К ним относятся калий, кальций, ванадий, селен, рубидий, цирконий, радий, полоний. Основной вклад в радиоактивность биологической ткани дает калий. Его доля составляет 0,3%, то есть в теле среднего человека массой 70 кг содержится $70 \times 0,003 = 0,21$ кг калия. В свою очередь доля нестабильного изотопа калий-40 равна 0,012%, значит, в организме человека его — $0,21 \times 0,00012 = 0,025$ г. Грамм-моль изотопа (40 г) содержит 6×10^{23} атомов (число Авогадро), а количество радиоактивных атомов калия-40 в теле человека — $N = 0,025 \times 6 \times 10^{23} / 40 = 3,8 \times 10^{20}$. Период полураспада изотопа равен $T_{1/2} = 1,28 \times 10^9$ лет = $1,12 \times 10^{13}$ час = $4,0 \times 10^{16}$ с. Соответственно активность (число распадов в единицу времени) составит $A = N \ln 2 / T_{1/2} = 0,69N / T_{1/2} = 2,34 \times 10^7$ расп./час = $0,656 \times 10^4$ расп./с = $0,656 \times 10^4$ Бк = $1,77 \times 10^{-7}$ Ки. Активность приведена

как в единицах системы СИ — беккерелях (Бк), так и во внесистемных, но все еще распространенных, — кюри (Ки, $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10}$ Бк).

При каждом распаде атома калия-40 с вероятностью 0,89 из ядра вылетает β -частица с энергией 1,31 МэВ или с вероятностью 0,11 — γ -частица с энергией 1,46 МэВ. Средняя энергия, выделяемая на один распад, — $0,89 \times 1,31 + 0,11 \times 1,46 = 1,33$ МэВ = $2,13 \times 10^{-13}$ Дж. Энергетическая мощность радиоактивного распада в расчете на 1 кг биологической ткани составит $2,34 \times 10^7 \times 2,13 \times 10^{-13} / 70$ Дж/(час×кг) = $0,7 \times 10^{-7}$ Дж/(час×кг). С учетом пересчетного коэффициента 1 Дж/кг = 104 Р (для биологической ткани) получим уровень излучения в привычных единицах — микрорентгенах в час, — в которых проградуированы многие дозиметры и радиометры, $0,7 \times 10^{-7} \times 104$ Р/час = 7 мкР/час.

Если учесть все радиоактивные элементы, содержащиеся внутри человека, то окажется, что калий-40 дает 85% уровня облучения, остальные 15% — радий-226 и полоний-210. Масса радиоактивного изотопа кальция в теле человека составляет 0,7 г, что значительно превосходит массу радиоактивного калия, но период полураспада — на 9 порядков выше, поэтому его вклад в активность ничтожен. Полные оценки активности мало отличаются от полученных для калия-40.

Уровень естественного радиоактивного фона в среднем равен 13...15 мкР/час. Внутреннее облучение человека всего лишь в два раза меньше внешнего. Од-

нако значительная его часть так и остается внутри человека. Таким образом, пассивное радиационное СО вряд ли возможно. Оно не дает никаких преимуществ по сравнению с другими типами СО, требуя взамен сложной аппаратуры.

Другой вариант – активное радиационное СО. Принцип его действия – лучевой. Источником излучения (И) является радиоактивный изотоп малой активности (рис. 2.13.1). Приемником (П) излучения является газоразрядная камера (как в бытовом радиометре, называемом дозиметром) или крупный фотодиод (с р-п переходом большой площади). В случае появления ОО луч перекрывается, что фиксирует блок обработки (БО), формирующий сигнал тревоги. Оценим возможность использования тех или иных видов радиоактивных частиц, считая, что в воздухе поток частиц должен проходить десятки метров, а в теле человека – ощути-мо ослабевать на расстояниях 0,2...0,3 м.

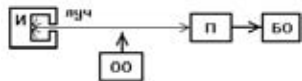


Рис. 2.13.1 Лучевое радиационное СО

Основной источник α -частиц – изотоп полоний-210 или радий-226. Первый дает α -частицы энергией $W = 5,3$ МэВ, второй – преимущественно $W = 4,8$ МэВ. Длина пробега α -частиц (с энергией около 5 МэВ) в различных средах невелика (табл. 2.13.1). Толщина эпидермиса кожи в среднем равна 0,07 мм, так что α -частицы не могут проникнуть сквозь кожу, но и в воздухе они пролетают лишь несколько сантиметров. Расстояния слишком малы. Длина пробега в воздухе R в сантиметрах для произвольной энергии W в МэВ определяется выражением $R = 0,309W^{1,5}$. Увеличение энергии не позволяет раздвинуть диапазон длин пробега в воздухе до приемлемых значений.

Таблица 2.13.1 Длина пробега α -частиц в различных средах

Энергия	Воздух	Вода	Биологическая ткань
4,8 МэВ	33 мм	0,031 мм	0,041 мм
5,3 МэВ	38 мм	0,038 мм	0,047 мм

Основной источник β -частиц – искусственный изотоп кобальт-60 или стронций-90. Кобальт-60 излучает β -частицы с энергией $W = 0,31$ МэВ, а вместе с ними – γ -кванты с энергией 1,17 и 1,33 МэВ. Стронций-90 излучает β -частицы с энергией $W = 0,55$ МэВ. Длина пробега β -частиц (табл. 2.13.2) превосходит длину пробега α -частиц, но все еще остается слишком малой. Для произвольной энергии W в МэВ длина пробега в некоторой среде R в сантиметрах оценивается эмпирической зависимостью $R = W^{1,33} / 2,2\rho$, где ρ – плотность среды в г/см³. Даже небольшая дальность $R = 1$ м = 1000 см в воздухе ($\rho = 0,0013$ г/см³) может быть достигнута лишь при сравнительно больших значениях энергии $W = 2,2$ МэВ.

Таблица 2.13.2 Длина пробега β -частиц в различных средах

Энергия	Воздух	Вода	Биологическая ткань
0,31 МэВ	60 см	0,094 см	0,094 см
0,55 МэВ	138 см	0,22 см	0,22 см

Для получения γ -лучей используют образцы изотопа кобальт-60. Энергия излучаемых им γ -квантов составляет $W = 1,17$ МэВ и $W = 1,33$ МэВ. Средняя длина их пробега в воздухе достаточно велика (табл. 2.13.3). Вместе с тем, попавший в луч человек при толщине 0,2...0,3 м значительно ослабляет интенсивность луча. Среди всех радиоактивных частиц γ -лучи наиболее близки к требованиям лучевого СО.

Таблица 2.13.3 Длина пробега γ -лучей в различных средах

Энергия	Воздух	Вода	Биологическая ткань
1 МэВ	122 м	14,2 см	14,2 см
1,25 МэВ	136 м	15,8 см	15,8 см
1,5 МэВ	150 м	17,4 см	17,4 см
2 МэВ	174 м	20,2 см	20,2 см

Основной источник нейтронов – смесь α -активного вещества (полоний-210, радий-226) с бериллием или бором. Последние под действием α -частиц излучают нейтроны со средней энергией около 4 МэВ. Длина релаксации быстрых нейтронов в воде или биологической ткани составляет 8...10 см. Поток нейтронов также может быть основой лучевого СО, хотя регистрация нейтронов требует более сложного оборудования, чем для γ -лучей.

Источником протонов служит небольшой ускоритель. Длина пробега протонов не намного превосходит длину пробега α -частиц. В воздухе она оценивается (в метрах) эмпирическим выражением $R = (W / 9,3)^{1,8}$ и даже при высоких энергиях $W < 9$ МэВ не превосходит одного метра.

Достоинства радиационных СО:

- излучатель не требует питания; к нему не надо прокладывать отдельный кабель;
- высокая помехоустойчивость к погодным факторам; даже в сильный ливень водность (масса воды в единице объема воздуха) не может сравниться со слоем воды в несколько десятков сантиметров;
- простота обслуживания.

Недостатки радиационных СО:

- наличие радиоактивных веществ, которые опасны для здоровья людей даже в малых количествах; радиационные СО можно применять только там, где не бывает людей;
- сложность утилизации излучателей по окончании их срока службы; радиационное СО всегда может быть заменено фотолучевым;
- необходимость тщательной юстировки во время монтажа.

2.14. Электростатические СО

Тело человека несет на себе определенный заряд. Заряд может возрастать в результате трения подошв об пол или уменьшаться за счет его естественного стекания через воздух, но он всегда присутствует. Заряд накапливается и на многих других движущихся предметах и механизмах: автомобилях, транспортерах, насосах, животных, насекомых. В основе принципа действия электростатических СО лежит регистрация заряда или окружающего его электростатического поля. Они могут называться также зарядовыми СО, зарядочувствительными СО или датчиками возмущения электрического поля.

Электростатические СО представляют собой мало-распространенный тип СО в связи с необходимостью регистрации небольших возмущений на фоне сильного поля Земли (напряженностью около 100 В/м). Электростатическое СО является пассивным, хотя нетрудно представить себе и его активный вариант в статическом или квазистатическом виде. Активное статическое СО сначала сообщает человеку определенный заряд при контакте с какой-либо частью тела, а затем идентифицирует его по величине и знаку. Активное квазистатическое СО производит то же самое действие без контакта, индуцируя заряд низкочастотным переменным «квазистатическим» полем. Электростатические СО – всегда внутренние. Они не могут работать вне помещений, так как во время дождя все окружающие предметы покрываются тонкой проводящей пленкой воды, выравнивающей их потенциалы. Результатом будет пропуск нарушителя. Кроме того, на улице всегда много предметов, несущих на себе значительный заряд: автомобилей, животных, переносимого ветром мусора и пыли. Их воздействие приведет к формированию ложных срабатываний.

Электростатическое СО может быть реализовано в одном из двух вариантов: контактном и бесконтактном. Контактное электростатическое СО измеряет заряд человека в момент его прикосновения к проводящему ЧЭ, в качестве которого может выступать металлическая дверь, железный каркас, длинный неизолированный провод, пластина, стальной сейф, стеллаж или витрина. В случае контакта часть заряда стекает с человека на ЧЭ, величина заряда измеряется и в случае превышения порогового значения формируется сигнал тревоги. Роль ЧЭ может выполнять любой металлический предмет, являющийся частью интерьера, либо вводимый туда намеренно. Важно, чтобы он находился на пути нарушителя и был изолирован от заземленных конструкций (водопроводных труб, шин заземления, каркаса железобетонного здания и т. п.).

Бесконтактное электростатическое СО почти ничем не отличается от контактного. При приближении заряженного человека к металлическому предмету (зонду) на этот предмет воздействует поле заряда. В результате в нем накапливается заряд противоположного знака по отношению к заряду человека. Этот заряд притягивается к человеку и поступает в зонд из линии

заземления через измерительную цепь датчика. Наводимый заряд обычно меньше передаваемого при контакте. Роль ЧЭ также может выполнять любой металлический предмет, изолированный от земли. В отличие от контактного СО в данном случае ЧЭ может быть покрыт слоем изоляции. Измеренная величина заряда вновь сравнивается с пороговым значением. Регулировка порога позволяет изменять дальность обнаружения в пределах до 1 м.

В зависимости от формы ЧЭ электростатическое СО может быть как точечным, так и линейным или объемным. Чувствительным датчиком точечного СО становится либо сам охраняемый предмет (сейф, стеллаж, статуя, статуэтка, дверь, дверная ручка, замок, щеколда, засов, карниз, вешалка, люк, решетка), либо подставка под ним (если он неметаллический или имеет особую ценность), либо рама или тонкая металлическая сетка вокруг него (например, вдоль рамы картины, вокруг люстры, по периметру оконного проема или вентиляционного отверстия). Датчиком с линейной ЗЧ является длинный провод, уложенный вдоль охраняемой границы, периметра помещения или соединяющий несколько точечных объектов. Тот же провод при укладке его в необходимых пределах с шагом около 2 м и при установке максимальной чувствительности дает объемную ЗО.

Оценим электрическую емкость человека, зная его среднюю массу $m = 70$ кг. Объем V человека в литрах примерно равен его массе в килограммах, то есть $V = 0,07$ м³. Радиус равновеликого шара $R = (3V/4\pi)^{1/3}$, а его емкость $C_{ш} = 4\pi\epsilon_0 R = 4\pi\epsilon_0(3V/4\pi)^{1/3}$, где ϵ_0 – электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума), $\epsilon_0 = 1/(4\pi \times 9 \times 10^9)$ Ф/м. Отсюда емкость шара объема V составит $C_{ш} = 69,0 \times 10^{-12} \times V^{1/3}$. Известно, что среди всех тел одинакового объема, но разной формы, шар имеет наименьшую емкость, поэтому нижняя оценка емкости человека $C_{чел} > 69,0 \times 10^{-12} \times 0,07^{1/3} = 28$ пФ. Реальное значение емкости оказывается выше, так как заряд накапливается на поверхности тела, а она у человека гораздо больше, чем у шара. Кроме того, емкость уединенного тела всегда возрастает при приближении к нему других проводящих тел. Дополнительный вклад в емкость человека дает и одежда. Средняя измеренная емкость человека равна $C_{чел} = 150...200$ пФ. Ее можно оценивать выражением $C_{чел} = 6C_{ш} = 4 \times 10^{-10} \times V^{1/3} = 40 \times 10^{-12} \times m^{1/3}$.

На человеке, как на конденсаторе, может накапливаться заряд. Причиной его возникновения является трение обуви об пол и одежды о кожу (трибоэлектрический эффект). Непроводящие подошвы способствуют сохранению заряда на теле человека. Основной путь стекания заряда – через воздух, благодаря постоянно присутствующему в нем небольшому количеству ионов. Количество ионов (а с ним – и проводимость воздуха) повышается с ростом влажности. Увеличение потенциала человека также приводит к ускорению разрядки. Поэтому на теле человека при его движении

поддерживается примерно постоянный потенциал U , величина которого зависит в основном от материала одежды и относительной влажности воздуха ξ (табл. 2.14.1). В меньшей степени потенциал зависит от материала покрытия пола и обуви.

Таблица 2.14.1 Потенциал человека

Материал одежды	$\xi = 10\%$	$\xi = 60\%$	$\xi = 90\%$
Синтетика	14 кВ	6 кВ	2 кВ
Шерсть, хлопок	5 кВ	1,5 кВ	0,2 кВ
Антистатик	3,5 кВ	0,8 кВ	

Средний потенциал человека при типичной влажности и одежде и составляет $U_{\text{чел}} = 1500 \text{ В}$, а соответствующий ему заряд $Q_{\text{чел}} = C_{\text{чел}} U_{\text{чел}} = 170 \times 10^{-12} \times 1500 = 0,26 \text{ мкКл}$. Минимальная величина заряда может опускаться до $Q_{\text{min}} = C_{\text{min}} U_{\text{min}} = 100 \times 10^{-12} \times 200 = 0,02 \text{ мкКл}$. Максимальный (реально ожидаемый) потенциал человека составляет $U_{\text{max}} = 4000 \text{ В}$, поскольку влажность в помещении почти никогда не достигает экстремальных значений, а одежда – не состоит целиком из синтетики. Ему соответствует заряд $Q_{\text{max}} = C_{\text{max}} U_{\text{max}} = 300 \times 10^{-12} \times 4000 = 1,2 \text{ мкКл}$. Максимально возможный потенциал при нулевой влажности, полностью синтетической экипировке и других благоприятных условиях – 30...40 кВ. В этом случае крупный человек может нести на себе заряд $Q_{\text{max}} = 300 \times 10^{-12} \times (30000...40000) = 9...12 \text{ мкКл}$.

Степень воздействия человека на ЧЭ электростатического СО определяется величиной передаваемого заряда. Для контактного СО он переходит с тела человека на входную емкость зарядового усилителя (ЗУ), преобразующего заряд в пропорциональное ему напряжение. В момент прикосновения потенциалы человека и входной емкости выравниваются, а заряд распределяется пропорционально значениям емкости (так как $U = Q/C$). Поэтому входная емкость должна превышать емкость человека, чтобы заряд эффективно перетекал на вход зарядового усилителя. С другой стороны, величина полезного сигнала (в вольтах) обратно пропорциональна входной емкости $C_{\text{вх}}$, поэтому выбор ее в пределах $C_{\text{вх}} = 500...1000 \text{ пФ}$ позволяет минимизировать коэффициент усиления последующих каскадов. Тем не менее, увеличение $C_{\text{вх}}$ позволяет снизить требования к сопротивлению высокоомных цепей разряда, что часто перевешивает все остальные соображения. В результате выбирается величина $C_{\text{вх}} > 1000 \text{ пФ}$.

Даже в случае, когда входная емкость значительно превосходит емкость человека, на нее переходит далеко не весь заряд, а лишь определенная его часть. Причина этого в том, что заряд накапливается на поверхности кожи и одежде, которые являются плохими проводниками. За короткое время контакта на входную емкость стекает от 1% до 20% имеющегося заряда. Доля заряда имеет случайный характер, но обычно более влажному воздуху соответствует больший процент. В среднем за одно прикосновение передается заряд $Q_{\text{вх}} = 0,05 \times 0,26 \text{ мкКл} = 10 \text{ нКл}$. Минимальное полезное воз-

действие соответствует случаю минимального заряда человека ($Q_{\text{min}} = 0,02 \text{ мкКл}$). При высокой влажности, когда доля перетекающего заряда не менее 5%, оно составляет $Q_{\text{вх}} = 0,05 \times 0,02 \text{ мкКл} = 1 \text{ нКл}$. Величина полезного сигнала на входной емкости $C_{\text{вх}} = 1000 \text{ пФ}$ будет при этом не менее $U_{\text{вх}} = Q_{\text{вх}}/C_{\text{вх}} = 10^{-9}/10^{-9} = 1 \text{ В}$. Сигнал почти не требует усиления, что значительно упрощает последующую электронную схему.

Электростатическое СО отличается высокой помехоустойчивостью. Трудно представить себе воздействие, способное одновременно подать на вход СО заряд порядка нанокюлон. Естественный обдув проводящей поверхности воздухом генерирует на ней заряд в пределах нескольких пикокулон. Крупное насекомое массой $m = 1 \text{ г}$ обладает емкостью порядка $C = 40 \times 10^{-12} \times m^{1/3} = 4 \text{ пФ}$ и при потенциале до $U = 200 \text{ В}$ несет заряд в пределах $Q = CU = 800 \text{ пКл}$. Сев на ЧЭ, оно способно передать на вход датчика заряд до десятков пикокулон. Небольшое домашнее животное массой $m = 1 \text{ кг}$ имеет емкость около $C = 40 \times 10^{-12} \times m^{1/3} = 40 \text{ пФ}$ и заряд (при потенциале $U = 800 \text{ В}$) до $Q = CU = 32 \text{ нКл}$. Если оно коснется ЧЭ, то перешедший заряд может превзойти 1 нКл.

Подводя итог, порог срабатывания контактного электростатического СО должен составлять около 500 пКл. Форма ЧЭ не имеет значения. Он должен находиться в месте вероятного контакта с нарушителем, и быть изолированным от земли. Заряд с тела человека передается на схему обработки через экранированный провод. Размещение ЧЭ в местах, недоступных для домашних животных, минимизирует число ложных тревог.

Зарядовый усилитель, составляющий основу контактного электростатического СО, может быть выполнен в различных вариантах. Один из них реализуется на элементах DA1, C1, C2, C3, R2, R3, R4, R5 (рис. 2.14.1). В случае прикосновения человека к контакту XP1 заряд Q поступает на конденсатор C1 и заряжает его до напряжения $U = Q/C1$. После усиления в $R3/R2 = 100$ раз сигнал на выходе DA1 (вывод 1) составит $U_{\text{вых}} = 100Q/C1$. Коэффициент преобразования каскада равен $K = U_{\text{вых}}/Q = 100/C1 = 0,02 \text{ В/пКл}$. Он соответствует медленному нарастанию входного воздействия. В данной реализации заряд накапливается за доли миллисекунды и затем спадает за доли секунды, начальная фаза им-

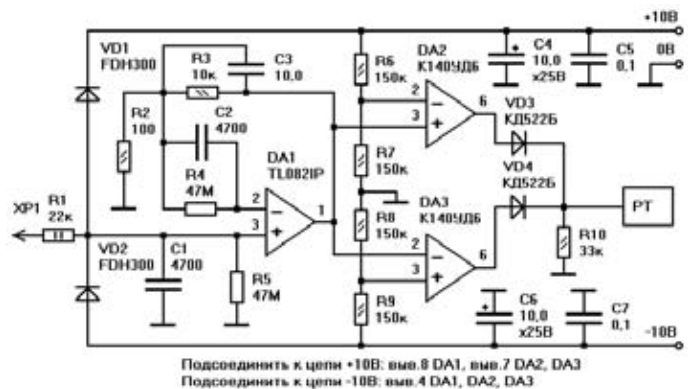


Рис. 2.14.1 Электростатическое СО контактного типа

пульса сглаживается ФНЧ, поэтому реально коэффициент преобразования оказывается несколько ниже — около $K = 0,01$ В/пКл. Он выбран таким образом, чтобы минимальное по величине полезное воздействие (± 500 пКл) вызывало выходной сигнал $U_{\text{вых}} = \pm 5$ В. Для проверки величины K следует зарядить конденсатор емкостью 50 пФ от источника напряжением 10 В, заряд составит $Q = CU = 500$ пКл. Разрядив конденсатор на ХР1, можно наблюдать на выходе DA1 кратковременный выброс амплитудой 5 В.

Реализация зарядового усилителя требует выполнения ряда специфических требований. Кроме того, что ОУ DA1 должен иметь на входе полевые транзисторы, узлы подсоединения резисторов R1, R4, R5 следует смонтировать на стойках, чтобы минимизировать возможность растекания заряда по плате. По этой же причине полезно покрыть плату влагостойким лаком. Экранирование ЗУ уменьшает наводки от электрической сети (50 Гц). Если ЧЭ ХР1 находится на удалении от СО, то для передачи заряда необходимо использовать качественный экранированный кабель, например, в минимальной степени подверженный трибоэлектрическому эффекту.

На вход ХР1 может воздействовать высокое (хотя и кратковременное) напряжение до 40 кВ. В СО необходимо предусмотреть схему защиты от подобных импульсов. В данном случае она выполнена на элементах R1, VD1, VD2. Максимально возможный заряд (10 мКл) способен привести к повышению напряжения на конденсаторе C1 до величины $U = Q/C1 = 2000$ В и повреждению микросхемы DA1. Наличие элементов защиты никак не проявляет себя до тех пор, пока напряжение на C1 находится в пределах напряжений питания (± 10 В). Если оно немного превысит +10 В, то откроется диод VD1 и излишки заряда стекут на конденсатор C4. Если же оно станет ниже отрицательного напряжения питания, то избыточный заряд перейдет на конденсатор C6 через открытый диод VD2. Резистор R1 ограничивает импульс тока величиной $I = 40 \text{ кВ} / 22 \text{ кОм} = 2$ А, что допустимо для выбранного типа диодов (FDH300). Кроме всего прочего, данные диоды обладают малым током утечки. Они не шунтируют элементы C1, R5 и не мешают работе схемы.

Сигнал с выхода DA1 поступает на вход двухпорогового компаратора на элементах DA2, DA3, R6, R7, R8, R9, R10, VD3, VD4. Резистивный делитель R6, R7, R8, R9 устанавливает два порога: +5 В и -5 В. В исходном состоянии сигнал на выходе зарядового усилителя близок к 0 В, а на выходе компаратора (R10) — сигнал низкого уровня. Если сигнал на выходе DA1 превысит +5 В, срабатывает компаратор DA2 и через диод VD3 на резисторе R10 устанавливается сигнал высокого уровня. То же происходит при понижении сигнала зарядового усилителя ниже -5 В (через DA3 и VD4). Двухпороговый компаратор срабатывает независимо от знака входного заряда. Положительный импульс на выходе компаратора инициирует срабатывание РТ.

Перейдем к анализу бесконтактного способа обнаружения человека по окружающему его электри-

ческому полю. Для регистрации изменений поля на пути нарушителя устанавливается зонд из проводящего материала. В случае приближения человека потенциал зонда меняется и зонд заряжается. По измеренной величине заряда принимается решение об активации сигнала тревоги. Оценим размеры ЗЧ, параметры зонда и уровни полезных и помеховых сигналов.

Средний потенциал поверхности тела человека $U_{\text{чел}} = 1500$ В. По мере удаления от него (на расстояние r) потенциал постепенно убывает по некоторому закону $U(r)$ (рис. 2.14.2). В ближней зоне (на расстояниях менее размеров ОО, то есть порядка нескольких сантиметров) убывание носит линейный характер $U_{\text{ближ}} = U_{\text{чел}} - Er$, где E — напряженность электрического поля, которая определяется поверхностной плотностью заряда, $E = Q_{\text{чел}} / (\epsilon_0 S_{\text{чел}})$, $S_{\text{чел}}$ — площадь поверхности человека, $S_{\text{чел}} = 2,0$ м². Подставив второе выражение в первое, получим зависимость $U_{\text{ближ}}(r) = U_{\text{чел}} \times (1 - r/r_0)$, где $r_0 = \epsilon_0 S_{\text{чел}} / C_{\text{чел}} = 0,11$ м. Ясно, что величина r_0 дает нижнюю оценку размеров ЗЧ электростатического СО.

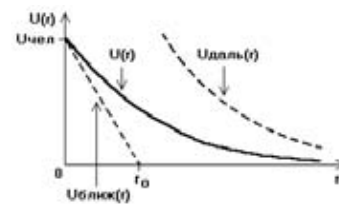


Рис. 2.14.2 Зависимость потенциала электрического поля от расстояния

Зависимость потенциала $U(r)$ на расстояниях от нескольких сантиметров до нескольких метров с трудом поддается вычислению. В дальней зоне (на расстояниях более размеров ОО) оценкой служит выражение для поля точечного заряда $U_{\text{даль}}(r) = Q / (4\pi\epsilon_0 r)$. Взяв минимальное значение заряда человека $Q_{\text{мин}} = 0,02 \times 10^{-6}$ Кл, получим зависимость $U_{\text{даль}}(r) = 180 / r$. Для уверенного обнаружения следует установить пороговое значение потенциала на уровне флуктуаций электрического поля Земли (порядка 1...10 В). Тогда верхняя оценка радиуса обнаружения электростатического СО составит около $r = 180 / 10 \approx 20$ м.

Это действительно было бы так, если бы вокруг человека в пределах этого радиуса не было никаких проводящих предметов. Силовые линии поля идеального точечного заряда равномерно расходятся в бесконечность. Те же линии, выходя из тела человека, замыкаются на окружающие проводящие поверхности: пол, железобетонные стены, металлические двери, решетки, трубы. По этой причине радиус ЗЧ в основном определяется размерами свободного пространства — расстоянием до стен, потолка и пола — и не превышает 1,5...2 м, а реальная оценка $U(r)$ лежит ниже теоретической $U_{\text{даль}}(r)$. Измерение поля производится небольшим металлическим пробником (зондом). Рядом с ним не должно находиться крупных проводящих предметов, способных «притягивать» к себе силовые линии поля приближающегося человека.

Процесс измерения потенциала электрического поля человека выглядит следующим образом (рис. 2.14.3). Силовые линии поля выходят из заряженного объекта и замыкаются на окружающих проводящих предметах. При приближении человека часть из них достигает зонда и вызывает в нем перераспределение зарядов. Если подсоединить зонд к земле через измерительный конденсатор $C_{ВХ}$, то на зонде наведется заряд $Q_{ЗОНД}$ противоположного по отношению к объекту знака. Такой же по величине заряд будет и на обкладках конденсатора. Он поступает на вход зарядового усилителя для дальнейшего анализа. Надежная работа устройства в целом определяется наличием заземления одной из обкладок измерительного конденсатора и высоким входным сопротивлением ЗУ. Бесконтактное электростатическое СО отличается от контактного только величиной измеряемого заряда.

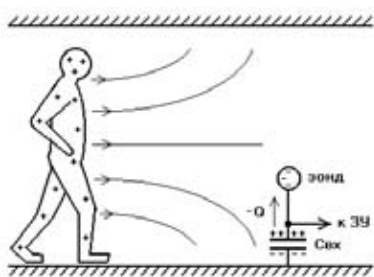


Рис. 2.14.3 Бесконтактное измерение потенциала

Из приведенной физической модели обнаружения ясно, что емкость зонда $C_{ЗОНД}$ должна быть меньше емкости человека, но не слишком малой, так как с ее уменьшением падает величина наводимого заряда. Значение $C_{ВХ}$, наоборот, должно превосходить $C_{ЧЕЛ}$, чтобы не ограничивать поступление заряда на зонд. Таким образом, получаем ограничения $C_{ЗОНД} = 5...50$ пФ, $C_{ВХ} > 500$ пФ. Отклонения от полученных оценок не смертельны, они всего лишь потребуют большего усиления или подавления дополнительных помех.

Заряд зонда $Q_{ЗОНД}$ зависит от потенциала $U(r)$ поля, в котором он находится, $-Q_{ЗОНД} = C_{ЗОНД} \times U(r)$. Форма зонда может отличаться от сферы. Более того, шар обладает минимальной (при заданном объеме) емкостью, и любая другая форма обеспечивает большее значение заряда при том же расходе материала. С точки зрения технологичности наиболее подходящей формой обладают простые плоские фигуры. Основные типы зондов: однопроводная линия, проволочный контур (кольцо, квадрат) или различного вида пластины (диск, квадрат). Роль зонда может выполнять сейф, бронзовая статуя, барельеф, подставка под экспонат, замок, дверная ручка, автомобиль, металлический шкаф, холодильник, проволочная петля вокруг вентиляционной шахты, дверной коробки или оконной рамы.

При емкости зонда $C_{ЗОНД} = 5...50$ пФ в случае полного сближения с объектом, обладающим минимальным потенциалом ($U_{\min} = 200$ В), в нем наведется заряд $Q_{ВХ} = C_{ЗОНД} \times U_{\min} = 1...10$ нКл. При удалении человека

от зонда заряд уменьшается. Минимальный регистрируемый заряд (а вместе с ним — и максимальный радиус обнаружения) определяется уровнем наводимых помеховых зарядов, составляющим $1...10$ пКл. Поэтому целесообразно установить регулируемый порог полезного воздействия в пределах $Q_{ПОР} = 5...500$ пКл. Таким образом, блок обработки датчика приближения мало чем отличается от датчика касания. Последний необходимо дополнить каскадом усиления с коэффициентом усиления $K_{УС}$, регулируемым в пределах от 1 до 100.

Электростатические СО в среднем обладают следующими характеристиками: ЗО — $0...1$ м от проводящих предметов или проводов, выполняющих роль ЧЭ; длина провода — до $100...200$ м; напряжение питания — $10...30$ В; потребляемый ток — $1...10$ мА; рабочая температура — от минус 40 до плюс 60°C ; цена (без стоимости ЧЭ) — $700...1000$ \$.

Основные достоинства электростатических СО:

- высокая вероятность обнаружения;
- высокая помехоустойчивость; практически полное отсутствие ложных срабатываний при отсутствии домашних животных; ЗЧ не выходит за пределы железобетонных стен; помеховые воздействия не проникают с улицы внутрь здания;
- произвольная форма ЗО, которая окружает охраняемые металлические предметы или следует вдоль трассы проводного ЧЭ; зона может быть легко ограничена заземленной металлической сеткой или фольгой, экранирующей электростатическое поле; подобным образом можно без особых затрат формировать любую требуемую зону;
- возможность использования в качестве ЧЭ любых металлических элементов интерьера;
- маскируемость; пассивный принцип действия;
- низкая стоимость аппаратуры в расчете на один охраняемый предмет; несколько десятков предметов могут быть последовательно подсоединены через общий провод к одному БО;
- электростатическое СО фиксирует факт передвижения человека, поэтому оно при установке на дверь или окно заменяет все другие датчики: разрушения (разбивания) или открывания (геркон);
- высокая надежность, благодаря отсутствию механических элементов;
- простота монтажа и обслуживания.

Основные недостатки электростатических СО:

- небольшие размеры ЗО; зона ограничена наличием посторонних проводящих предметов, которыми наполнено любое помещение; для надежной фиксации приближения человека ближайшим к нему проводящим предметом должен быть сам зонд;
- снижение вероятности обнаружения во влажных и сырых помещениях, неветилируемых подвалах, банях, канализационных шахтах;
- необходимость заземления для эффективной работы аппаратуры.

2.15. Магнитометрические СО

Магнитометрические СО реагируют на изменения внешнего магнитного поля. Магнитное поле образуется вокруг любого предмета, обладающего магнитным моментом. К подобным предметам относятся не только магниты, но и многие изделия из ферромагнитных материалов (железа и его сплавов): ножи, лопаты, ключи, гвозди, пистолеты, ружья, автомобили, корабли, поезда. Магнитный момент гвоздя невелик, но и он может быть обнаружен на небольших расстояниях. Обладает магнитным полем и наша планета Земля. При появлении вблизи от датчика какого-либо намагниченного предмета магнитное поле Земли слегка искажается, но этих изменений бывает достаточно для их надежной фиксации.

Магнитное поле Земли не постоянно, оно подвержено непрерывным медленным изменениям. Поэтому в своем большинстве магнитометрические СО реагируют на быстрые изменения магнитного поля, в связи с чем они способны регистрировать только движущиеся объекты. Но даже это осложняется наличием многочисленных импульсных помеховых воздействий — от магнитных бурь, грозных разрядов, проезда автотранспорта, коммутации больших токов. Обнаружение объектов по изменению магнитного поля сопряжено со значительными трудностями.

Среди магнитометрических СО наиболее распространены (в силу своей простоты) так называемые индукционные. Их основным элементом является многовитковая катушка. Если внутрь катушки ввести сильный магнит, то в соответствии с явлением магнитной индукции в катушке наведется электродвижущая сила (ЭДС). В случае более слабых изменений магнитного поля в катушке также будет наводиться ЭДС, но меньшей величины. Катушка может иметь небольшие размеры; соответствующее СО является точечным. Оно может обнаруживать передвижение ферромагнитных предметов в радиусе нескольких метров от ЧЭ. Если диаметр многовитковой катушки увеличить до нескольких десятков метров, а затем растянуть ее вдоль одного из диаметров, то она не потеряет способности обнаруживать изменения магнитного поля, но ЗО полученного ЧЭ станет линейной. Такой датчик закапывается на небольшую глубину в землю, им можно охранять протяженные участки рубежа. Соответствующее СО носит название линейного петлевого индукционного магнитометрического.

Магнитометрические СО являются пассивными. Воспринимая внешнее магнитное поле, они не производят излучений в окружающее пространство. В силу своей специфики они особенно предпочтительны там, где высока вероятность ложных срабатываний от животных. Магнитометрические СО могут работать как внутри помещений, так и на улице. Более того, в отличие от многих СО других типов, количество помеховых воздействий вне помещений существенно уменьшается. На улице нет лифтов и станков, а в лесу — еще и протяженных электрических сетей и радиопередатчиков.

Основной показатель силы магнитного поля — его индукция B . В системе СИ она измеряется в теслах (Тл)

или кратных единицах — мкТл, нТл. Величина индукции сильного магнита вблизи от его поверхности составляет около 1 Тл. В системе СГС индукция магнитного поля измеряется в гауссах (Гс). Соотношение между ними 1 Гс = 0,0001 Тл.

Для оценки интенсивности магнитного поля могут также использоваться единицы его напряженности $H = B / (\mu\mu_0)$, где μ — относительная магнитная проницаемость, μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, в системе СИ величина $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м = $1,256637 \times 10^{-6}$ Гн/м. Единицей измерения напряженности является ампер на метр (А/м). Относительная магнитная проницаемость воздуха μ близка к единице; поэтому единицы напряженности эквивалентны единицам индукции: 1 А/м = $4\pi / 10^{-7}$ Тл = 1256,637 нТл. В системе СГС напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах (Э). В этой системе значение $\mu_0 = 1$, поэтому в вакууме (и с большой точностью в воздухе) 1 Э = 1 Гс. Отсюда 1 Э = 0,0001 Тл = 1000 / 4π А/м = 79,5775 А/м. При измерении слабых полей встречается еще одна единица напряженности — гамма (γ), 1 гамма = 0,00001 Э = 1 нТл. Далее, чтобы избежать путаницы, мы будем пользоваться для оценок одной единицей — теслой. Таблица 2.15.1 позволит перевести в теслы любую величину, измеренную в других единицах.

Таблица 2.15.1 Единицы измерения магнитных полей

Единица	Перевод в Тл или кратные единицы
1 Гс =	100 мкТл
1 Э =	100 мкТл
1 А/м =	1,26 мкТл
1 гамма =	1 нТл

Все магнитные измерения проводятся на фоне магнитного поля Земли. Его абсолютная величина составляет 35...65 мкТл. Она меняется в зависимости от широты, оставаясь почти постоянной в любой заданной точке земной поверхности. При переходе от одной точки к другой меняется не только величина, но и направление вектора напряженности в пространстве. Проекция вектора на горизонтальную плоскость всегда сохраняет направление на Северный магнитный полюс Земли, благодаря чему мы можем пользоваться компасом. (Как известно, магнитные линии выходят из северного полюса магнита, которым является Южный полюс Земли.) Магнитное поле Земли близко по своей величине и виду к полю магнитного момента $M = 8,3 \times 10^{22}$ А \times м².

Магнитное поле Земли подвержено флуктуациям, которые необходимо учитывать при проведении магнитных измерений. Солнечно-суточные изменения магнитного поля Земли на средних широтах достигают 3...50 нТл. Наиболее значительный вклад в изменения магнитного поля вносят магнитные бури. За год в среднем наблюдается около 30...40 магнитных бурь различной интенсивности. Продолжительность одной бури — от нескольких часов до нескольких суток. Измене-

ния магнитного поля во время магнитной бури достигают 100...1000 нТл. Максимальная скорость изменения магнитного поля во время магнитной бури может доходить до 4 нТл/с (80 нТл за 20 с). Так называемые микропульсации имеют различное происхождение. Они располагаются в диапазоне частот 0,001...10 Гц, их интенсивность 0,1...100 нТл, продолжительность – от нескольких минут до одного часа.

В городе на магнитное поле Земли накладываются дополнительные шумы. Наводки от сети лежат в диапазоне 50 Гц и редко где опускаются ниже 1 нТл. Случайный шум от множества различных искусственных источников электромагнитного излучения имеет спектральную плотность, уменьшающуюся с ростом частоты. На низких частотах (порядка 0,01 Гц) шум составляет 3...100 нТл (в зависимости от района); на частотах 1...10 Гц он уменьшается до 0,01 нТл и в дальнейшем почти не зависит от частоты.

Представив себе ожидаемые уровни помеховых сигналов, перейдем к оценке вида и амплитуды полезных (и некоторых других помеховых) сигналов. Они образуются благодаря наличию у предметов магнитного момента M , который и создает вокруг себя магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля на больших расстояниях R равен:

$$\vec{B} = \mu_0(3(\vec{e}_R \vec{M})\vec{e}_R - \vec{M}) / 4\pi R^3$$

где \vec{e}_R – единичный вектор в направлении R (из центра магнитного момента в точку измерения поля). Отсюда величина магнитной индукции составляет $B = (\mu_0/4\pi) \times (M \times (1 + 3\cos^2\phi) / R^3)$, где ϕ – угол между вектором магнитного момента и направлением на точку измерения. Индукция максимальна вдоль оси магнитного момента ($\phi = 0$), где она равна $B = (\mu_0/4\pi) \times (2M / R^3)$. В плоскости, перпендикулярной к оси магнитного момента ($\phi = \pi/2$), она в два раза меньше $B = (\mu_0/4\pi) \times (M / R^3)$. Приведенное основное выражение для вектора магнитной индукции B поля магнитного момента M позволяет находить величину и вид сигналов при различных взаимных ориентациях векторов.

Магнитное поле небольшого магнита ($M = 0,2 \text{ А} \times \text{м}^2$) на расстоянии $R = 0,1 \text{ м}$ вдоль его оси составит $B = (\mu_0/2\pi) \times (M / R^3) = 20 \text{ мкТл}$. Оно сравнимо с естественным уровнем магнитного поля. Направление стрелки обычного компаса устанавливается вдоль силовых линий поля Земли. Если к компасу поднести магнит, то стрелка отклонится от первоначального положения. То же самое произойдет при приближении к компасу другого намагниченного предмета. По углу отклонения можно легко оценивать величину магнитного момента различных предметов.

Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли (на широте Москвы) равна $H_{\text{гор}} = 14 \text{ А/м}$. Если к компасу с западной или восточной стороны поднести предмет с магнитным моментом M , направив его ось на середину стрелки (рис. 2.15.1), то на нее будет действовать дополнительное поле $H = M / (2\pi R^3)$ в направлении, перпендикулярном к полю Земли. В результате стрелка компаса отклонится на угол α . Если измерять

его в градусах, то из очевидного для небольших углов ($\alpha < 10^\circ$) соотношения $H / H_{\text{гор}} = M / (2\pi R^3 H_{\text{гор}}) = \mu\alpha / 180$ можно получить оценку для магнитного момента $M = 1,5\alpha R^3$. Например, если гаечный ключ на расстоянии $R = 0,2 \text{ м}$ отклоняет стрелку компаса на максимальный угол $\alpha = 10^\circ$, то его магнитный момент составит $M = 1,5 \times 10 \times 0,008 = 0,12 \text{ А} \times \text{м}^2$.

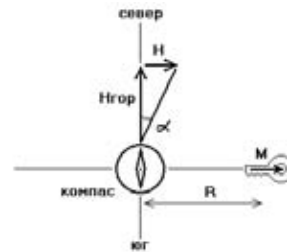


Рис. 2.15.1 Оценка магнитного момента

Положив компас на стол, будем размещать с западной или восточной стороны от него различные стальные предметы, подбирая расстояние R так, чтобы отклонение стрелки находилось в пределах 5...10 градусов. Некоторые предметы придется покрутить (не меняя расстояния R), чтобы добиться максимального отклонения. Результирующая ориентация предмета укажет направление невидимого магнитного момента внутри него. Чаще всего вектор магнитного момента оказывается направленным вдоль наибольшего из размеров предмета. В результате экспериментов можно по измеренным значениям R и α получить оценки магнитных моментов всех предметов, встречающихся в быту, лежащих в карманах и окружающих нас (табл. 2.15.2). Любые ферромагнитные предметы постепенно

Таблица 2.15.2 Средние магнитные моменты различных предметов и объектов

Предмет	Магнитный момент $M, \text{ А} \times \text{м}^2$
Ключ гаечный небольшого размера	0,01...0,05
Ключи	0,03
Пинцет	0,03
Плоскогубцы	0,05...0,1
Отвертка	0,05...0,1
Ключ гаечный большого размера	0,05...0,3
Ножницы	0,06
Пистолет	0,1
Нож	0,1...0,2
Магнитная защелка	0,1...0,4
Лопата	0,2
Отвертка с магнитным наконечником	0,5...1,5
Автомат	0,6
Велосипед	4
Мотоцикл	20
Легковой автомобиль	100
Грузовой автомобиль	300
Самолет	3000
Железнодорожный поезд	20000

намагничиваются в поле Земли, и если не предпринимать специальных мер, то магнитные моменты двух стальных предметов одинаковых размеров, изготовленных из одного сорта стали, окажутся примерно равными. Точно так же объект большего размера будет обладать и большим магнитным моментом. Это позволяет группировать объекты по типам, характеризуя их средним магнитным моментом, хотя внутри группы иногда встречаются значительные отклонения от средней величины M , как в меньшую, так и в большую сторону. Магнитные моменты транспортных средств можно оценить аналогичным образом, встав с компасом в нескольких метрах от дороги, проходящей с запада на восток.

Перед началом экспериментов полезно проводить проверку чувствительности (калибровку) средств измерения. Для этого необходимо изготовить образцовый магнитный момент, скажем, величиной $0,1 \text{ A} \times \text{м}^2$. Выточим на токарном станке из пластмассы (или склеим из картона) небольшую шпильку (рис. 2.15.2). Намотаем на шпильку $N = 1500$ витков медного провода диаметром $0,19 \text{ мм}$. Его погонное сопротивление – $0,6 \text{ Ом/м}$. При среднем диаметре витка $D = (20 + 13)/2 = 16,5 \text{ мм}$ общая длина провода составит $L = \pi DN = 75 \text{ м}$, а сопротивление катушки – $R = 0,6 \times 75 = 45 \text{ Ом}$. Подав на катушку напряжение $U = 15 \text{ В}$, получим ток $I = U/R = 0,33 \text{ А}$. При средней площади витка $S = \pi D^2/4 = 0,00021 \text{ м}^2$ магнитный момент катушки составит $M = ISN = 0,1 \text{ A} \times \text{м}^2$. В случае небольших отклонений в размерах шпильки или диаметре провода получаемый магнитный момент может быть откорректирован изменением напряжения питания.

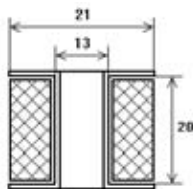


Рис. 2.15.2 Образцовый магнитный момент

Установив катушку на расстоянии $R = 0,2 \text{ м}$ от компаса (рис. 2.15.1), направим ее ось на стрелку и подадим напряжение питания. Отклонение стрелки на 8 градусов подтверждает значение магнитного момента $M = 1,5 \times 8 \times 0,008 = 0,1 \text{ A} \times \text{м}^2$ и возможность его оценки с помощью компаса. Выделяемая катушкой мощность $W = U^2/R = 5 \text{ Вт}$ сравнительно велика, поэтому лучше не включать ее на длительное время. Если перевернуть катушку или поменять полярность напряжения, стрелка отклонится на тот же угол в противоположную сторону. Меняя расстояние R , можно убедиться в наличии обратной кубической зависимости напряженности магнитного поля. Если расположить катушку с севера или с юга от компаса (сохраняя направление ее оси с запада на восток), то поле при этом уменьшается в два раза.

Зная магнитный момент различных предметов, легко оценить расстояние, на котором их можно обнаружить, или (если это помеховые воздействия) расстоя-

ние, на котором их влияние незначительно. Для начала сравним величину магнитного поля различных объектов с абсолютной величиной поля Земли. Магнитный момент мелких бытовых предметов находитесь в пределах $M < 1 \text{ A} \times \text{м}^2$. Попытка обнаружить присутствие подобных предметов на расстояниях порядка $R = 1 \text{ м}$ от датчика столкнется с необходимостью регистрации приращения поля $\Delta B = (\mu_0/2\pi) \times (M / R^3) < 0,2 \text{ мкТл}$ на фоне магнитного поля Земли около 50 мкТл , испытывающего флуктуации до 1 мкТл . Подобные измерения вряд ли возможны. То же самое можно сказать о попытке обнаружить присутствие автомобиля ($M = 100 \text{ A} \times \text{м}^2$) на расстояниях порядка $R = 5 \text{ м}$. По этой причине магнитометрическое СО должно измерять либо градиент магнитного поля, либо изменение его во времени. Измерение градиента предполагает наличие двух ЧЭ, разнесенных на небольшое расстояние друг от друга, и определение их разностного сигнала. Это усложняет и удорожает прибор. Наиболее просто реализуется дифференциальный принцип – принцип измерения отношения приращения магнитной индукции к величине соответствующего промежутка времени $\Delta B/\Delta t$. Правда он позволяет фиксировать только движущиеся объекты.

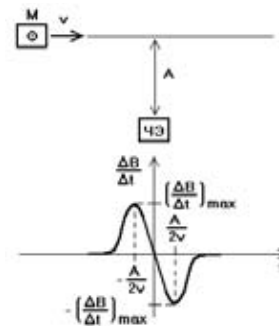


Рис. 2.15.3 Траектория движения магнитного момента M и вид сигнала

Оценить величину скорости изменения магнитного поля $\Delta B/\Delta t$ позволяет простой пример. Пусть магнитный момент M направлен вертикально и перемещается в горизонтальной плоскости по прямой линии с постоянной скоростью v , а датчик находится в той же плоскости на расстоянии A от траектории движения магнитного момента (рис. 2.15.3). Тогда индукция магнитного поля в точке измерения составит (исходя из основного уравнения) $B = (\mu_0/4\pi) \times (M / (A^2 + (vt)^2)^{3/2})$, где t – время, начало отсчета которого ($t = 0$) соответствует моменту наибольшего сближения магнитного момента и датчика. Вектор B направлен вертикально. Скорость изменения магнитного поля находится дифференцированием предыдущего выражения $\Delta B/\Delta t = - (3\mu_0 v M / 4\pi A^4) \times (\tau / (1 + \tau^2)^{5/2})$, где введено безразмерное время $\tau = vt/A$. Вид и величина сигнала зависят от отношений (v/A) и (vM/A^4) ; быстрый далекий объект с большим магнитным моментом невозможно отличить от близкого медленного с меньшим моментом. При $t = 0$ значение функции $\Delta B/\Delta t = 0$; сама функция имеет вид двухполярного импульса с максимумом и минимумом

мом в моменты времени $t_{\max} = -A/2v$ и $t_{\min} = +A/2v$, то есть чуть раньше и чуть позже прохождения точки максимального сближения магнитного момента с датчиком. Экстремальные значения одинаковы по величине и равны $(\Delta B/\Delta t)_{\max} = (12\mu_0 v M / (25 \times 5^{1/2} \times \pi A^4)) = 0,86 \times 10^{-7} \times (vM/A^4)$. Интервал времени между экстремумами $T = 2t_{\max} = A/v$.

Приведенный пример позволяет сделать ряд интересных обобщающих выводов. Во-первых, многие датчики измеряют не величину поля, а проекцию вектора поля на ось максимальной чувствительности. Магнитное поле в точке установки датчика (в данном случае) направлено вертикально. Поэтому наилучшие результаты будут получены при ориентации оси чувствительности датчика параллельно ожидаемому направлению магнитного момента. При обнаружении вертикально носимого оружия или инструмента логично расположить ось катушки вертикально.

Во-вторых, в случае изменения направления магнитного момента на обратное знак сигнала также меняется на противоположный. В полезном сигнале сначала будет наблюдаться отрицательный выброс, а затем – положительный (по сравнению с рис. 2.15.3). То же самое произойдет и в случае изменения направления оси чувствительности датчика. Поскольку ориентация магнитного момента заранее неизвестна, то возможно появление сигнала любой полярности, а направление чувствительности датчика (вверх или вниз) несущественно.

В-третьих, вид и амплитуда сигнала зависят от взаимной ориентации вектора магнитного момента M и направления максимальной чувствительности датчика. Сигнал при дифференциальном методе измерения часто имеет вид двухполярного, что можно использовать для его идентификации.

В-четвертых, полученное соотношение позволяет оценивать амплитуду скорости изменения магнитного поля $(\Delta B/\Delta t)_{\max}$. Установив датчик на расстоянии $A = 1$ м от тропы для обнаружения идущего по ней со скоростью $v = 1...5$ м/с человека, несущего в кармане инструмент или оружие ($M = 0,2...1$ А×м²), ожидаемая амплитуда воздействия составит $(\Delta B/\Delta t) = 0,86 \times 10^{-7} \times (vM/A^4) = 20...400$ нТл/с. Она значительно превосходит не только уровень естественного шума, но и редкие максимальные выбросы во время магнитных бурь (4 нТл/с).

В-пятых, аналитический вид полезного сигнала дает возможность оценивать полосу фильтрации. Для скоростей в диапазоне $v = 1...5$ м/с длительность выброса составляет $T = A/v$. Отсюда полоса фильтрации $f = (0,016...1,6) / T = (0,016...1,6) \times v / A = 0,016...8$ Гц.

Рассмотрим другой пример. Пусть магнитный момент M направлен горизонтально вперед и движется с постоянной скоростью v в горизонтальной плоскости, а ось чувствительности датчика параллельна траектории движения магнитного момента (рис. 2.15.4). Расстояние от ЧЭ до траектории движения равно A . Пример соответствует передвижению транспорта по дороге. Тогда аналогично предыдущему примеру индукция магнитного поля в точке измерения (в направлении

оси чувствительности) определяется проекцией приведенного ранее основного выражения, она равна $B = (\mu_0 M / 4\pi) \times ((A^2 - 2v^2 t^2) / (A^2 + (vt)^2)^{5/2})$, где начало отсчета времени t ($t = 0$) вновь соответствует моменту наибольшего сближения магнитного момента и датчика. Скорость изменения магнитного поля составит $\Delta B/\Delta t = (3\mu_0 v M / 4\pi A^4) \times ((3\tau - 2\tau^3) / (1 + \tau^2)^{7/2})$, где также введено безразмерное время $\tau = vt/A$. Функция имеет вид импульса, близкого к двухполярному, с основным максимумом и минимумом в моменты времени $t_{\max} = -0,36A/v$ и $t_{\min} = +0,36A/v$ (или наоборот). Сами экстремальные значения одинаковы по величине и равны $(\Delta B/\Delta t)_{\max} = 1,93 \times 10^{-7} \times (vM/A^4)$. Кроме основных экстремумов имеется два дополнительных в моменты времени $\pm 1,69A/v$, но их амплитуда в 16 раз меньше основных. Промежуток времени между экстремумами $T = 2t_{\max} = 0,72A/v$.

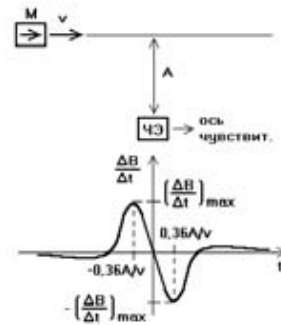


Рис. 2.15.4 Траектория движения магнитного момента M и вид сигнала

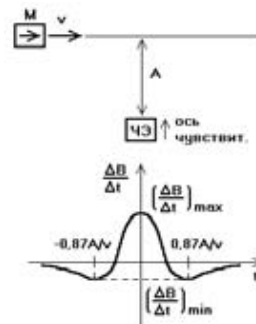


Рис. 2.15.5 Траектория движения магнитного момента M и вид сигнала

Чтобы понять, каким образом лучше направлять ось чувствительности датчика, необходимо рассмотреть третий пример. Сохраняя все условия предыдущего примера, направим ось датчика перпендикулярно траектории движения магнитного момента (рис. 2.15.5). Тогда индукция магнитного поля в точке измерения (в направлении оси чувствительности) составит $B = (\mu_0 M / 4\pi) \times ((3Avt) / (A^2 + (vt)^2)^{5/2})$. Теперь скорость изменения магнитного поля будет $\Delta B/\Delta t = (3\mu_0 v M / 4\pi A^4) \times ((1 - 4\tau^2) / (1 + \tau^2)^{7/2})$, где опять введено безразмерное время $\tau = vt/A$. Функция имеет максимум в момент времени $t = 0$, который равен $(\Delta B/\Delta t)_{\max} = 3 \times 10^{-7}$

$\tau \times (\nu M/A^4)$. Кроме максимума имеется два минимума при $\tau = \pm 3^{1/2}/2 = \pm 0,87$ или в моменты времени $t = \pm 0,87A/\nu$. Они равны $(\Delta B/\Delta t)_{\min} = -0,85 \times 10^{-7} \times (\nu M/A^4)$. Промежуток времени между минимумами $T = 1,73A/\nu$. Нули функции соответствуют моментам $\tau = \pm 0,5$. Амплитуда и длительность сигнала превосходят полученные во втором примере. Таким образом, данную ориентацию ЧЭ следует признать наилучшей.

Пример. Если мы хотим следить за объектами с магнитным моментом $M = 50...400 \text{ А} \times \text{м}^2$, передвигающимися по проселочной дороге шириной 4 м с небольшой скоростью $\nu = 10...50 \text{ км/час} = 2,7...14 \text{ м/с}$, то при установке датчика на расстоянии 2 м от края дороги (чтобы избежать случайного повреждения датчика) расстояние от датчика до траектории движения магнитного момента составит $A = 3...5 \text{ м}$, а при его ориентации на дорогу величина воздействия будет лежать в пределах $(\Delta B/\Delta t) = 3 \times 10^{-7} \times (\nu M/A^4) = 60...20000 \text{ нТл/с}$.

Если где-то поблизости проходит оживленная трасса, то движение по ней автотранспорта будет оказывать помеховое воздействие. Выбрав в качестве ограничения максимально допустимое значение $(\Delta B/\Delta t) = 1 \text{ нТл/с}$, магнитный момент группы автомобилей $M = 5000 \text{ А} \times \text{м}^2$ и максимальную их скорость $\nu = 150 \text{ км/час} = 40 \text{ м/с}$, получим минимальное расстояние до трассы $A = (3 \times 10^{-7} \times (\nu M/(\Delta B/\Delta t)))^{1/4} = 90 \text{ м}$. Аналогично расстояние до аэродрома или низколетящего самолета ($M = 10000 \text{ А} \times \text{м}^2$, $\nu = 600 \text{ км/час} = 170 \text{ м/с}$) должно быть не менее $A = (3 \times 10^{-7} \times (\nu M/(\Delta B/\Delta t)))^{1/4} = 150 \text{ м}$. Железнодорожный вокзал или ветка ($M = 100000 \text{ А} \times \text{м}^2$, $\nu = 200 \text{ км/час} = 60 \text{ м/с}$) должны располагаться не ближе $A = (3 \times 10^{-7} \times (\nu M/(\Delta B/\Delta t)))^{1/4} = 210 \text{ м}$. В действительности расстояние до аэродрома или вокзала должно быть в несколько раз больше, так как необходимо учитывать не только скорость изменения магнитного поля, но и его величину, а также наличие на подобных объектах дополнительного источника помех – обширной электрической сети.

Вокруг проводов, по которым течет электрический ток, возникает магнитное поле. Постоянный ток создает постоянное поле (изменяющееся в момент включения или выключения тока), переменный – переменное. Магнитное поле длинного проводника с током $I = 10 \text{ А}$ на расстоянии $R = 10 \text{ м}$ от него равно $B = \mu_0 I/2\pi R = 200 \text{ нТл}$. Следует обратить внимание на слабую степень убывания B с ростом расстояния R . Поле длинного проводника (на расстояниях R меньше длины) убывает как $1/R$, поле ограниченного проводника (то есть проводника, размеры которого меньше R) убывает как $1/R^2$, поле замкнутого проводника (магнитного момента) – как $1/R^3$. Поэтому наибольшее влияние оказывают длинные линии передачи электроэнергии в моменты изменения тока. Если тот же постоянный ток $I = 10 \text{ А}$ на расстоянии $R = 10 \text{ м}$ включается за время $\Delta t = 100 \text{ мс}$, то коммутация сопровождается значительным импульсом $(\Delta B/\Delta t) = 200/0,1 = 2000 \text{ нТл/с}$. Наводки от переменного тока промышленной частоты ($f = 50 \text{ Гц}$) эффективно подавляются, так как лежат в значительно более высоком по сравнению с полезными сигналами диапазоне. Однако, обилие непрерывно коммутируемых электри-

ческих цепей в городе создает результирующий помеховый сигнал, на фоне которого обнаружение слабых полезных сигналов порядка десятков или сотен нанотесла без специальной экранировки невозможно.

Грозы бывают практически повсеместно. Удар молнии – тот же импульс тока большой величины. Продолжительность одного разряда также может быть сравнима с длительностью полезного сигнала. Индукция магнитного поля от среднего грозового разряда ($I = 30000 \text{ А}$) на расстоянии $R = 1 \text{ км}$ составит около $B = \mu_0 I/2\pi R = 6000 \text{ нТл}$ (если длина молнии превосходит R). Чтобы избежать ложных срабатываний магнитометрических СО во время грозы, необходимо либо пользоваться градиентометрической схемой включения двух датчиков, либо применять специальные алгоритмы, либо – что проще – использовать отдельный удаленный (от ЗО) датчик, фиксирующий грозовой разряд и блокирующий на это короткое время канал обнаружения.

Определив параметры и уровни полезных и помеховых воздействий, перейдем к выбору средств и способов измерения. С помощью компаса при отклонении стрелки на угол $\alpha = 1^\circ$ можно зафиксировать изменение магнитного поля $H = H_{\text{гор}} \times \pi/180 = 14 \times \pi/180 = 0,24 \text{ А/м}$ или $B = \mu_0 H = 300 \text{ нТл}$. Этого явно мало, да и ЧЭ недостаточно надежен. Среди методов измерения индукции магнитного поля следует отметить пять основных: с помощью датчиков Холла, магниторезисторов, индукционных преобразователей, феррозондов и квантовых преобразователей (табл. 2.15.3).

Таблица 2.15.3 Типы ЧЭ для измерения магнитного поля

Тип ЧЭ	Диапазон измерения
Датчик Холла	10 мкТл...1 Тл
Магниторезистор	300 нТл...0,1 Тл
Тонкопленочный магниторезистор	100 нТл...0,01 Тл
Магнитоиндукционный преобразователь	0,1 нТл...1 Тл
Феррозонд	0,1 нТл...0,01 Тл
Квантовый магнитометр (протонный)	0,1 нТл...0,1 мТл
Квантовый магнитометр (сверхпроводящий – СКВИД)	0,0001 нТл...0,1 мТл

Принцип действия датчика Холла основан на отклонении носителей заряда при их движении в магнитном поле. Расположив проводник перпендикулярно силовым линиям измеряемого магнитного поля, пропустим по нему ток. В результате на проводнике с током образуется разность потенциалов в направлении, перпендикулярном линиям тока и магнитного поля. Она пропорциональна величине поля. Датчиком Холла может быть любой проводник, но материал датчика обычно подбирается таким образом, чтобы обеспечивать максимальное значение поперечного потенциала. Тем не менее, чувствительность датчиков Холла невысока.

Магниторезисторы меняют величину своего сопротивления в зависимости от значения поперечного магнитного поля. Их действие также основано на отклоне-

нии направления движения носителей заряда под действием индукции В. Чувствительность магниторезисторов невысока. Несколько увеличить ее позволяет использование тонкопленочных магниторезисторов, получаемых путем вакуумного напыления проводящего слоя. В тонкой пленке носители быстрее достигают границы проводника и эффект проявляется в большей мере.

В основе действия магнитоиндукционного преобразователя лежит, как следует из названия, явление магнитной индукции, заключающееся в наведении электродвижущей силы (ЭДС) в контуре под действием переменного магнитного поля. Индукционный преобразователь нечувствителен к постоянному магнитному полю и генерирует ЭДС, пропорциональную изменению $\Delta B/\Delta t$. Датчик поля — многовитковая катушка. Чувствительность метода достигает десятых долей нанотесла.

Феррозонд содержит пермалловый сердечник, на который намотаны две обмотки — обмотка возбуждения и измерительная (сигнальная) обмотка. На обмотку возбуждения подается опорный синусоидальный электрический сигнал, наводящий в сердечнике магнитное поле, близкое к насыщению. Кривая перемагничивания сердечника симметрична, а сигнал с измерительной обмотки содержит нечетные гармоники опорного сигнала. Под действием измеряемого поля кривая перемагничивания смещается и теряет симметричность, а в выходном сигнале появляются четные гармоники, амплитуда которых пропорциональна измеряемому полю. Чувствительность феррозонда достигает десятых долей нанотесла.

Работа квантовых преобразователей магнитного поля основана на различных квантовых эффектах. К ним относятся: прецессия магнитных моментов ядер в магнитном поле, резонансное поглощение электромагнитных волн строго определенной частоты, зависящей от напряженности магнитного поля, различные квантовые эффекты сверхпроводимости. Резонансные методы включают в себя ядерный магнитный резонанс и электронный парамагнитный резонанс. Квантовые преобразователи позволяют достичь чувствительности до 10^{-7} нТл (в слабых полях), но они требуют специальной аппаратуры, материалов и тонкой настройки.

Ряд методов измерения напряженности магнитного поля является преимущественно лабораторным. Тем не менее, их следует хотя бы отметить, так как любой из них при соответствующем развитии технологии может перейти в разряд практических. Магнитоэлектрический метод основан на измерении силы взаимодействия эталонного магнитного момента (наподобие стрелки компаса) и измеряемого поля; порог чувствительности достигает 1...10 нТл, но показание снимается визуально, а не в виде электрического сигнала. При уравнивании измеряемого поля эталонным полем компенсационной катушки достигается чувствительность до 0,1 нТл. Ряд методов измерения основан на явлениях магнитооптики, вращения плоскости поляризации света в магнитном поле и других магнитооптических эффектах.

Из числа рассмотренных датчиков магнитного поля наиболее подходит магнитоиндукционный преобразо-

ватель. Он отличается простотой и высокой чувствительностью. Его ЧЭ может быть выполнен в виде точечного элемента — многовитковой катушки — или в виде замкнутой петли многожильного провода, концы жил которого распаяны таким образом, чтобы образовать многовитковую катушку больших размеров.

Главные достоинства магнитометрических СО:

- пассивный принцип действия и полная маскируемость;
- отсутствие ложных срабатываний от мелких и крупных животных;
- высокая помехоустойчивость вне населенных пунктов; невосприимчивость к дождю, снегу, граду, ветру; на работоспособность СО не влияет наличие травы, кустарников, небольшого снежного покрова;
- обнаружение петлевым СО ползущего нарушителя, поскольку уровень сигнала повышается при приближении к ЧЭ;
- нечувствительность индукционного преобразователя к постоянным магнитным полям; работоспособность СО не зависит от широты местности, наличия магнитных аномалий или крупных стальных конструкций, если они не экранируют собой зону чувствительности;
- при аккуратном монтаже магнитометрическое СО не требует настройки или юстировки;
- отсутствие необходимости обслуживания СО в ходе эксплуатации;
- высокая надежность;
- низкое энергопотребление;
- стойкость к воздействию погодных и климатических факторов, ударов, пониженной и повышенной температуры;
- возможность обнаружения транспорта на больших расстояниях.

Основные недостатки магнитометрических СО:

- обилие электромагнитных помех в пределах городской черты; помеховое воздействие на магнитометрическое СО оказывают автомобили, троллейбусы, трамваи, электрички, ЛЭП, лифты, электромоторы, скачки тока в электросети, грозовые разряды;
- срабатывание только от движущихся предметов, обладающих магнитным моментом;
- трудоемкость монтажа протяженных СО в связи с необходимостью рытья траншей для укладки ЧЭ; соответственно и высокая стоимость монтажа;
- возможность срабатывания от значительных сотрясений в связи с перемещением магниточувствительного элемента в магнитном поле Земли;
- сложность восстановления петлевого ЧЭ в случае его повреждения.

2.15.1. Точечные

Точечное магнитометрическое СО имеет компактный ЧЭ. Его дальность обнаружения невелика, поскольку магнитное поле резко убывает при увеличении рассто-

яния. Точечное СО может быть выполнено на основе индукционного преобразователя, феррозонда или одного из квантовых ЧЭ. Оно используется в узких коридорах, порталах, арках, калитках, тропах и проходах — для обнаружения людей — или вблизи дорог — для обнаружения автомобилей. Наиболее просто реализуется индукционный принцип. Он позволяет добиться высокой эффективности и надежности при низкой стоимости устройства.

Чувствительным элементом, реализующим индукционный принцип, является обычная многovitковая катушка. Если она имеет N витков со средней площадью S , то в случае изменения индукции магнитного поля $\Delta B/\Delta t$ (вдоль оси) в катушке наводится ЭДС, равная $E = NS\Delta B/\Delta t$. Для достижения высоких уровней полезного сигнала катушка должна содержать большое количество витков максимально возможной площади. Например, намотав $N = 10000$ витков на рамку размером 10×10 см, при проезде автомобиля с магнитным моментом $M = 100 A \times m^2$ со скоростью $v = 10$ км/час = $2,7$ м/с на расстоянии $A = 5$ м можно получить на выходе катушки сигнал амплитудой $U = NS\Delta B/\Delta t = NS \times 3 \times 10^{-7} \times (vM/A^4) = 13$ мкВ.

Увеличить сигнал (при том же количестве витков) позволяет вставленный в катушку ферромагнитный сердечник. Магнитная индукция пропорциональна значению относительной магнитной проницаемости μ материала сердечника. Для обычной стали она примерно равна $\mu = 700$, для некоторых ферритов — достигает нескольких тысяч. Если бы магнитная проницаемость среды составляла $\mu = 1000$, то магнитная индукция возросла бы в 1000 раз и во столько же раз возросла бы амплитуда сигнала. Реальное увеличение сигнала, снимаемого с катушки, будет не так велико, поскольку магнитопровод занимает малую часть объема ЗЧ и не замкнут. Оно составит примерно $\mu_{эфф} = 2 \dots 100$ (для стального сердечника), а выражение для амплитуды сигнала на выходе катушки с сердечником примет следующий вид: $U = \mu_{эфф} NS\Delta B/\Delta t = \mu_{эфф} NS \times 3 \times 10^{-7} \times (vM/A^4)$. Значение $\mu_{эфф}$ зависит от конструкции катушки, оно возрастает с увеличением отношения длины стального сердечника к его диаметру и с ростом отношения диаметра сердечника к среднему диаметру витка. Наличие сердечника является источником дополнительной нестабильности, так как его магнитная проницаемость зависит от температуры.

Наматывать много тысяч витков тонким (для обеспечения небольших габаритов) проводом — занятие утомительное. Можно поступить проще: взять готовую катушку (причем, вместе со стальным сердечником) от электромагнитного реле. Реле может быть любого типа из числа рассчитанных на питание обмотки напряжением

220 вольт. Оно содержит подходящее число витков (порядка 10 тысяч), намотано тонким проводом (диаметром $0,05 \dots 0,1$ мм) и имеет сопротивление порядка 10 кОм. Подойдут реле типов РП-21, МКУ48, РЭП26, РНК-1У3 и многие другие. Например, катушка от реле РНК-1У3 (для нее величина $\mu_{эфф} = 10$) содержит $N = 9000$ витков средней площадью $S = 0,00028$ м² и имеет сопротивление $R = 3,3$ кОм. Напряжение на выходе катушки оценивается выражением $U = \mu_{эфф} NS\Delta B/\Delta t = 25 \times 3 \times 10^{-7} \times (vM/A^4) = 75 \times 10^{-7} \times (vM/A^4)$.

Если необходимо фиксировать подъезжающие к воротам коттеджа автомобили, то датчик может быть закреплен на невысоком столбике, установленном непосредственно на краю дороги. Для обычной дороги шириной 2,5 м расстояние от датчика до магнитного момента составит $A = 1 \dots 1,5$ м. Принимая значения $M = 50 \dots 400 A \times m^2$ и $v = 5 \dots 30$ км/час = $1,4 \dots 8,3$ м/с, получим оценку диапазона амплитуд полезных сигналов, снимаемых с датчика — катушки от реле РНК-1У3, $U = 75 \times 10^{-7} \times (vM/A^4) = 0,1 \dots 25$ мВ. Оценка не вполне точная, так как расстояния до магнитного момента сравнимы с его размерами, но нижняя оценка U для больших значений A вполне состоятельна. Длительность основного выброса составляет $T = A/v$. Соответствующая полоса фильтрации $f = (0,016 \dots 1,6) / T = (0,016 \dots 1,6) \times v / A = 0,015 \dots 13$ Гц. При не слишком строгих требованиях к сохранению формы сигнала полосу можно сузить до $f = 0,2 \dots 10$ Гц.

Уровень естественных помеховых изменений магнитного поля может достигать 4 нТл/с (во время сильной магнитной бури). Ему соответствует сигнал на выходе ЧЭ $U = \mu_{эфф} NS\Delta B/\Delta t = 25 \times 4$ нВ = $0,1$ мкВ, что в тысячу раз меньше минимального полезного сигнала. Если на расстоянии нескольких сотен метров от контролируемой подъездной дороги нет шоссе с интенсивным движением, высоковольтных ЛЭП, промышленных цехов или подобных источников значительного электромагнитного излучения, то высокая помехоустойчивость СО будет гарантирована. Возможны редкие ложные срабатывания от грозовых разрядов или от низколетящих самолетов.

Полученные оценки позволяют синтезировать алгоритм, реализуемый в виде электронной схемы (рис. 2.15.6). Датчик В1 изготовлен из реле РНК-1У3. Сняв крышку, необходимо отвернуть два винта, удерживаю-

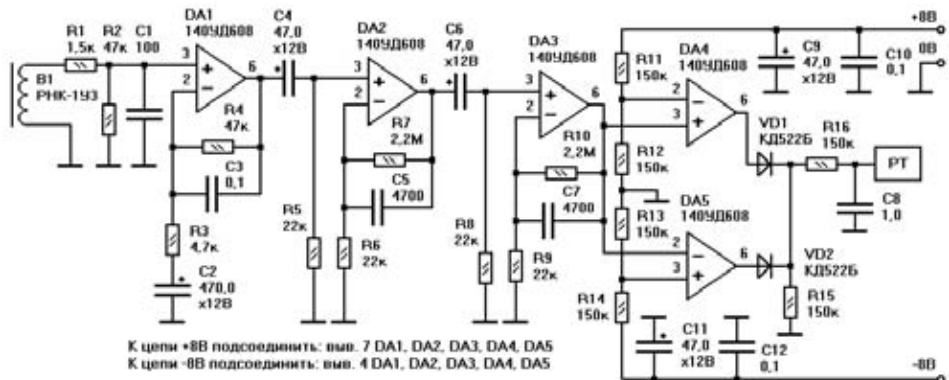


Рис. 2.15.6 Магнитометрическое СО

щие коромысло, и удалить его, оставив катушку и сердечник на месте. Одета назад крышка защитит датчик, не мешая его работе. В качестве ЧЭ используется обмотка реле. Сам датчик устанавливается на высоте около 1 м таким образом, чтобы ось катушки располагалась горизонтально и была направлена в сторону дороги (перпендикулярно к ней).

Элементы R1, C1 подавляют радиочастотные наводки (свыше 1 МГц), возникающие в катушке, как в магнитной антенне. Резистор R1 можно заменить дросселем. Каскад на элементах DA1, C2, C3, R3, R4 осуществляет предварительное усиление сигнала с датчика в $R4/R3 + 1 = 10$ раз. Одновременно проводится начальная фильтрация в диапазоне от $f = 1 / (2\pi R3C2) = 0,07$ Гц до $f = 1 / (2\pi R4C3) = 35$ Гц.

Следующий каскад на элементах DA2, C4, C5, R5, R6, R7 усиливает сигнал в $R7/R6 + 1 = 100$ раз и фильтрует его в полосе частот от $f = 1 / (2\pi R5C4) = 0,15$ Гц до $f = 1 / (2\pi R7C5) = 15$ Гц. Каскад на элементах DA3, C6, C7, R8, R9, R10 полностью повторяет предыдущий. Верхняя и нижняя частота фильтров обоих каскадов выбраны таким образом, чтобы результирующие частоты среза составляли $0,15 \times 2^{1/2} = 0,2$ Гц и $15/2^{1/2} = 10$ Гц соответственно.

После усиления в 100 тысяч раз даже самый слабый ожидаемый полезный сигнал (0,1 мВ) даст на выходе DA3 импульс амплитудой, равной напряжению питания. Он может иметь любую полярность. Поэтому далее сигнал подается на двухполярный компаратор, выполненный на элементах DA4, DA5, R11, R12, R13, R14. Делитель на резисторах R11, R12, R13, R14 определяет пороги компаратора, равные +4 В и -4 В. Установленный порог соответствует половине амплитуды усиленного сигнала, чтобы в дальнейшем провести дополнительную его селекцию по длительности. В дежурном состоянии сигнал на выходе DA3 флуктуирует вокруг нулевого уровня, оставаясь в пределах «ворот» компаратора ± 4 В. Поэтому на выходах DA4 и DA5 – отрицательное напряжение питания, а конденсатор C8 разряжен через резисторы R15 и R16. Если сигнал на выходе DA3 превысит верхний порог +4 В, то на выходе DA4 сигнал высокого уровня, который начинает заряжать конденсатор C8 через резистор R16 и диод VD1. Через время $0,7R16C8 = 0,1$ с напряжение на конденсаторе достигнет порога срабатывания РТ. Благодаря наличию цепи R16, C8, проводится дополнительная селекция полезных сигналов по длительности. Если сигнал на выходе DA3 становится ниже -4 В, то срабатывание активируется через аналогичную цепь DA5, VD2, R16, C8. В конструкции РТ лучше использовать оптореле (например, КР293КП1Б), так как оно не создает помех датчику В1.

2.15.2. Петлевые

Чувствительным элементом петлевого магнитометрического СО является та же катушка, воспринимающая изменения магнитного поля, но растянутая в направлении, перпендикулярном к ее оси. Петлевые СО на-

зываются также протяженными, распределенными, линейными или кабельными. Они применяются для охраны длинных участков периметра вокруг объектов, находящихся на удалении от городских помех.

Петля многожильного кабеля закапывается на глубину штыка лопаты (0,15...0,3 м), отдельные жилы соединяются последовательными контурами. Ширина петли составляет 1,5...3 м при полной длине участка до нескольких сотен метров. С целью подавления воздействий от интенсивных удаленных помех кабель укладывается «восьмерками» (рис. 2.15.7). Нарушитель воздействует на одну отдельную петлю (нолик – половинку восьмерки), помеховый сигнал – на две соседних, причем наводимые в них ЭДС вычитаются, взаимно компенсируя друг друга. Естественно, общее количество отдельных петель должно быть четным, а соседние в паре – одинаковыми по площади. Длина петли колеблется от 5 до 50 метров в зависимости от ожидаемого уровня помех. Так, например, размеры двух соседних петель укорачиваются вблизи от воздушных или подземных ЛЭП.

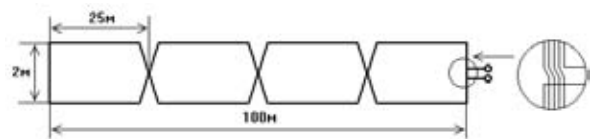


Рис. 2.15.7 ЧЭ петлевого магнитометрического СО

Величина полезного сигнала пропорциональна количеству «витков», то есть числу жил в кабеле. Однако оно не может превышать несколько десятков из-за сложности укладки слишком толстого кабеля. Встречаются и одновитковые ЧЭ, но они требуют применения специальных конструктивных и схемотехнических решений. Наиболее приспособлен для использования в качестве ЧЭ телефонный кабель ТПП. Он устойчив к воздействию температуры и влаги, а кроме того, – доступен и дешев. Число жил в кабеле ТПП составляет 10, 20, 30, 50 или 100 пар. Цена десятипарного – около 1 у.е. за метр, стопарного – 3 у.е. за метр.

Оценим уровни полезных сигналов петлевого ЧЭ. Модель сигналаобразования здесь несколько отличается от модели описанного ранее точечного индукционного ЧЭ. Рассмотрим следующий пример. Пусть провод располагается вдоль оси Ox , а вертикальный магнитный момент M движется на высоте H вдоль оси Oy с постоянной скоростью v (рис. 2.15.8). В этом случае вертикальная составляющая индукции магнитного поля момента M в точке с координатой x на оси Ox в произвольный момент времени t будет равна $V(x,t) = (\mu_0 M / 4\pi R^3) \times (3\cos^2\theta - 1) = (\mu_0 M / 4\pi) \times (2H^2 - (vt)^2 - x^2) / (H^2 + (vt)^2 + x^2)^{3/2}$, где R – расстояние от магнитного момента до точки с координатой x на оси Ox , $R^2 = H^2 + (vt)^2 + x^2$, θ – угол, дополнительный к углу между векторами M и R , $\cos\theta = H/R$, а начало отсчета времени ($t = 0$) соответствует точке прохождения момента M над проводом. В результате воздействия индукции V в каждом элементе провода длиной Δx наводится ЭДС $\Delta E = V(x,t)v\Delta x$. Подставляя выражение для $V(x,t)$ и ин-

тегрируя по длине провода, можно получить зависимость ЭДС от времени $E(t) = (\mu_0 Mv / 2\pi H^2) \times (1 - \tau^2) / (1 + \tau^2)^2$, где введено безразмерное время $\tau = vt/H$.



Рис. 2.15.8 Движение магнитного момента M над проводом

Электрический сигнал, снимаемый с концов провода имеет один максимум в момент времени $t = 0$, который равен $E(0) = (\mu_0 Mv / 2\pi H^2)$, и два минимума при $t = \pm 3^{1/2}H/v = \pm 1,73H/v$ (или $\tau = \pm 3^{1/2}$), величина которых составляет 1/8 от максимума (рис. 2.15.9). Сигнал обращается в ноль при $\tau = \pm 1$. Приведенная оценка соответствует сигналу, снимаемому с одного провода, N проводов дадут в N раз больший сигнал. Изменение направления магнитного момента приводит к изменению знака сигнала.

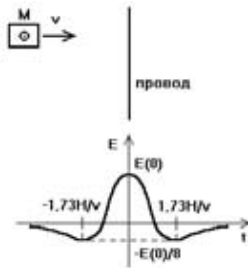


Рис. 2.15.9 Траектория движения магнитного момента M и вид сигнала

При пересечении петли магнитный момент последовательно проходит над прямым и обратным проводами, поэтому результирующий сигнал будет состоять из двух идентичных импульсов противоположной полярности (рис. 2.15.10). Если расстояние между проводами (ширина петли) — $A_{\text{ш}}$, то интервал времени между основным максимумом первого импульса и основным минимумом второго составит $t = A_{\text{ш}}/v$. Ширину петли удобно выбрать таким образом, чтобы импульсы при наложении усиливали друг друга. При совмещении точек 1 и 3 совпадут не только максимумы, но и минимумы (точки 2 и 4) обоих импульсов. В этом случае оптимальная ширина петли составит $A_{\text{ш}} = 3^{1/2}H$. Таким образом, для $H = 1...1,7$ м (человек с инструментом или оружием в рюкзаке, на поясе или за плечом, идущий по земле или по снегу) ширина петли $A_{\text{ш}} = 1,73H = 1,7...3$ м. В этом случае появляется также дополнительная возможность селекции полезных сигналов по их двухполярности.

Полученные оценки соответствуют единственному, хотя и наиболее вероятному, направлению магнитного момента в предположении его равномерного переме-

щения. Они лишь в первом приближении соответствуют действительности, но дают возможность оценивать основной вклад в снимаемый с петли сигнал. Значениям $M = 0,15...1 \text{ А}\times\text{м}^2$, $v = 1...5 \text{ м/с}$, $H = 1...1,7 \text{ м}$, $N = 20$ будет соответствовать диапазон уровней полезных сигналов $E(0) = (\mu_0 MvN / 2\pi H^2) = 0,2...20 \text{ мкВ}$. Длительность главного выброса составляет около $T = 1,73H/v$. Основные частоты полезных сигналов лежат в пределах $f = (0,016...1,6) / T = (0,016...1,6) \times v / 1,73H = 0,005...5 \text{ Гц}$. Реально диапазон следует немного расширить как в сторону низких частот в связи растяжением сигнала при движении под углом к линии укладки ЧЭ, так и в сторону высоких — из-за возможности различных ориентаций магнитного момента и его естественных колебаний при движении. Если бы петля не укладывалась восьмерками, то во время магнитной бури ($\Delta B/\Delta t = 4 \text{ нТл/с}$) на петле длиной $L = 100 \text{ м}$ наводился бы помеховый импульс величиной $E_{\text{пом}} = NLA_{\text{ш}}(\Delta B/\Delta t) = 24 \text{ мкВ}$.

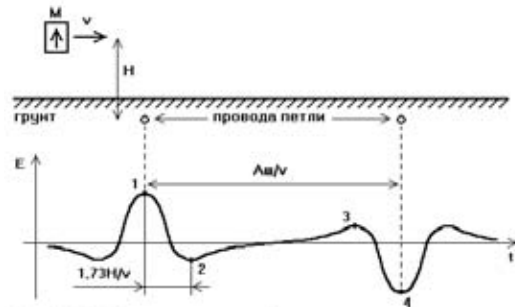


Рис. 2.15.10 Выбор ширины петли $A_{\text{ш}}$

Кроме обычных электромагнитных помех — флуктуаций магнитного поля Земли, ЛЭП, грозных разрядов, — петлевое СО подвержено влиянию еще одного вида воздействий — механических колебаний грунта. Петля находится в земном магнитном поле, индукция которого составляет около $B = 50 \text{ мкТл}$. Если одна из сторон петли длиной $l = 5 \text{ м}$ сместится на $\Delta a = 1 \text{ мм}$ за время $\Delta t = 1 \text{ с}$, то площадь петли изменится на $\Delta S = l\Delta a$, в результате чего на одном витке петли наведется ЭДС индукции величиной до $U = B\Delta S/\Delta t = Bl\Delta a/\Delta t = 250 \text{ нВ}$. Уровень помехи сравним с уровнем полезных сигналов, но частота вибрации лежит выше диапазона полезных сигналов, благодаря чему возможно эффективное подавление помех данного вида. Впрочем, вибрационная составляющая магнитометрического сигнала может использоваться и в качестве самостоятельного полезного сигнала. Площадь витков жесткой катушки не меняется, поэтому вибрационные помехи не характерны для точечных индукционных СО (если катушка только смещается, но не поворачивается во время вибрации).

Петлевое СО в силу своей конструкции не может содержать много витков, при этом сами витки имеют большую протяженность, а минимальный снимаемый с одного витка сигнал составляет до $U_1 = 5 \text{ нВ}$. Поэтому имеется ограничение на допустимый диаметр провода. Если взять слишком тонкий провод, то тепловой шум петли превысит уровень полезного сигнала. Сред-

няя ЭДС E теплового шума на сопротивлении R составляет $E = (4kTR\Delta f)^{1/2}$, где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, T – абсолютная температура в кельвинах, при нормальных условиях $T = 293$ К, Δf – полоса частот в герцах. Сопротивление N витков медного провода примерно равно $R = 2\rho NL / S = 8\rho NL / \pi d^2$, где ρ – удельное сопротивление меди, $\rho = 0,018$ Ом \times мм²/м, L – длина участка в метрах, S – площадь поперечного сечения провода в квадратных миллиметрах, $S = \pi d^2/4$, d – диаметр провода, мм. Минимальный уровень полезного сигнала с N витков петли оценивается величиной NU_1 , поэтому уровень шума следует ограничить величиной, на порядок меньшей, то есть $E = NU_1 / 10$. Для длины участка $L = 100$ м, по-

лосы частот $\Delta f = 10$ Гц и количества витков $N = 10$ получим оценку минимального диаметра провода $d = 4(2kT\rho NL\Delta f / \pi)^{1/2} / E = 0,26 \times 10^{-9} \times (\Delta f L / N)^{1/2} / U_1 = 0,5$ мм. Как видно из полученной зависимости, с увеличением числа витков диаметр провода может быть уменьшен, фильтрацию сигналов следует проводить в строго ограниченной полосе Δf , а входной усилитель должен быть согласованным и малошумящим.

Петлевое магнитометрическое СО в среднем имеет следующие характеристики: длина рубежа – 100 м; напряжение питания – 10...30 В; потребляемая мощность – 0,1...0,2 Вт; диапазон рабочих температур – от минус 50°C до плюс 50°C; погонная стоимость – 20...160 \$/м.

2.16. Гравиметрические СО

В основе действия гравиметрического СО лежит изменение поля притяжения, окружающего любой материальный объект, в том числе и человека. Оно называется также гравитационным СО и не требует применения труднодоступных или особо чистых химических соединений, так как датчиком поля является другая масса, на которую в гравитационном поле действует сила притяжения. Все измерения производятся на фоне сильного гравитационного поля Земли. Для регистрации небольших изменений, связанных с появлением массы ОО, требуются специальные высокочувствительные методы и точная измерительная аппаратура.

Гравиметрическое СО относится к пассивным датчикам. Оно может в одинаковой степени работать как внутри помещения, так и вне его. Гравиметрическое СО является точечным и может быть использовано для регистрации приближения нарушителя к отдельным охраняемым предметам – сейфам, стеллажам, экспонатам – или его передвижения по узким коридорам, проходам, порталам.

Абсолютная величина гравитационного поля Земли характеризуется ускорением свободного падения $g_{ЗЕМ}$, которое на поверхности Земли в соответствии с законом всемирного тяготения равно $g_{ЗЕМ} = GM_{ЗЕМ} / (R_{ЗЕМ})^2$, где G – гравитационная постоянная, $G = 6,672 \times 10^{-11}$ Нм²/кг², $M_{ЗЕМ}$ – масса Земли, $M_{ЗЕМ} = 5,98 \times 10^{24}$ кг, $R_{ЗЕМ}$ – радиус Земли, $R_{ЗЕМ} = 6,378 \times 10^6$ м. Отсюда $g_{ЗЕМ} = 9,81$ м/с². Полезное воздействие от человека массой $M_{ЧЕЛ} = 70$ кг на расстоянии $R_{ЧЕЛ} = 1$ м составит $g_{ЧЕЛ} = GM_{ЧЕЛ} / (R_{ЧЕЛ})^2 = 6,672 \times 10^{-11} \times 70 = 4,7 \times 10^{-9}$ м/с². Полезное воздействие на девять порядков меньше того постоянного уровня, на фоне которого необходимо его обнаруживать.

Основной помеховый фактор, изменяющий величину измеряемого ускорения, – гравитационное поле нашего ближайшего спутника – Луны. Вклад ее поля составляет $g_{ЛУН} = GM_{ЛУН} / (R_{ЛУН})^2$, где $M_{ЛУН}$ – масса Луны, $M_{ЛУН} = 7,35 \times 10^{22}$ кг, $R_{ЛУН}$ – расстояние до Луны, $R_{ЛУН} = 3,84 \times 10^8$ м. Подставляя значения, получим $g_{ЛУН}$

$= 3,3 \times 10^{-5}$ м/с². Абсолютная величина помехового воздействия на четыре порядка превосходит величину полезного.

Оценим возможность измерения небольших вариаций гравитационного поля Земли, вызванных появлением человека. Наряду с единицей (м/с²) для измерения поля часто используется гал, 1 Гал = 1 см/с² = 10⁻² м/с². Чувствительность типичного гравиметра, используемого для изучения гравитационного поля Земли (например, ГНУ-КВ), составляет 0,01 мГал = 10⁻⁷ м/с². Высокоточные гравиметры (например, CG-3 канадской фирмы LaCoste & Romberg – Scintrex Inc.) имеют чувствительность до 1 мкГал = 10⁻⁸ м/с². Сверхпроводящий магнитный подвес пробного тела позволяет еще более снизить порог чувствительности гравиметра. Максимальная чувствительность достигает 10⁻¹¹ м/с².

Таким образом, возможность обнаружения человека по абсолютной величине гравитационного поля в принципе реализуема. Способствующим этому фактором является разнонаправленность полей. Гравитационное поле Земли направлено вертикально вниз, человека – горизонтально (при установке ЧЭ на высоте центра тяжести среднего человека, равной 0,95 м). Любой современный нивелир оборудован автокомпенсатором горизонтальности. Типичный автокомпенсатор обеспечивает горизонтальность порядка 0,1 угловой секунды или десятых долей миллиметра на дальности 1 км. Следовательно, использование разнонаправленности гравитационного поля Земли и человека совместно с простейшим автокомпенсатором позволяет повысить отношение сигнал/помеха на семь порядков, что довольно близко к требуемым девяти.

Возможности создания гравиметрических СО способствуют еще два фактора: быстрое передвижение человека (причем, в горизонтальном направлении) и его близость к ЧЭ. Благодаря этому возможно принятие решения на основании анализа либо скорости изменения ускорения свободного падения g в единицу време-

ни, либо градиента поля (разности показаний в двух близлежащих точках), либо и того и другого.

Изменение гравитационного поля в случае приближения человека происходит за время порядка $T_{\text{ЧЕЛ}} = 1$ с, поэтому полезное воздействие в дифференциальной схеме измерения составит $D_{\text{ЧЕЛ}} = g_{\text{ЧЕЛ}} / T_{\text{ЧЕЛ}} = 5 \times 10^{-9}$ м/с³. Помеховые изменения происходят более медленно. Проекция поля Луны на горизонтальную плоскость меняется от нуля до максимального значения за время, равное четверти суток, $T_{\text{ЛУН}} = 6 \times 3600$ с = $2,2 \times 10^4$ с. Скорость изменения поля $D_{\text{ЛУН}} = g_{\text{ЛУН}} / T_{\text{ЛУН}} = 3,3 \times 10^{-5} / 2,2 \times 10^4$ с = $1,5 \times 10^{-9}$ м/с³. Итак, если измерять изменения гравитационного поля, то полезный сигнал не только лежит в другом частотном диапазоне по сравнению с естественными изменениями, но и превосходит последние.

Градиент гравитационного поля Земли $\text{grad}(g_{\text{ЗЕМ}}) = GM_{\text{ЗЕМ}} / (R_{\text{ЗЕМ}})^3 = 1,54 \times 10^{-6}$ 1/с². Градиент поля человека $\text{grad}(g_{\text{ЧЕЛ}}) = GM_{\text{ЧЕЛ}} / (R_{\text{ЧЕЛ}})^3 = 4,7 \times 10^{-9}$ 1/с². Градиент поля Луны $\text{grad}(g_{\text{ЛУН}}) = GM_{\text{ЛУН}} / (R_{\text{ЛУН}})^3 = 0,86 \times 10^{-13}$ 1/с². Сравнение полученных величин показывает, что измерение градиента на шесть порядков поднимает полезный сигнал по отношению к постоянному фону и на восемь порядков – по отношению к его естественным изменениям.

Градиент гравитационного поля измеряется не только в единицах (1/с²), но и в более мелких – этвшах, 1 Этв = 10^{-9} 1/с². Типичная погрешность прибора, измеряющего градиент гравитационного поля (так называемого гравитационного вариометра), составляет 0,1 Этв = 10^{-10} 1/с². Гравитационные градиентометры сверхпроводящего типа обладают еще более высокой чувствительностью – до 10^{-4} Этв = 10^{-13} 1/с².

Подводя итог, можно сказать, что гравиметрическое СО в принципе реализуемо. Его создание требует ком-

бинации трех принципов: измерение горизонтальной составляющей поля, измерение изменений во времени, измерение градиента поля. Причем достигнутый в современных гравиметрах уровень чувствительности достаточен для целей использования в составе СО. Основное препятствие на пути внедрения гравиметрических СО – громоздкость; масса типичного гравиметра – 3...5 кг.

Главные достоинства гравиметрических СО:

- высокая степень маскируемости в связи с пассивным принципом действия; датчиком поля является предмет, обладающий массой; он ничем не отличается от множества других, расположенных вокруг него;
- невозможность обхода ЗО или проведения обманных действий; гравитационное поле неотъемлемо от обладающего массой объекта, его нельзя скрыть или экранировать;
- потенциально высокая помехоустойчивость; чтобы вызвать ложное срабатывание, к датчику должен приблизиться объект с массой, сравнимой с массой человека; дождь, снег, ветер и другие погодные факторы не обладают такой массой в пределах небольшого расстояния от датчика; ложное срабатывание может вызвать разве что снежная лавина, падение дерева или землетрясение;
- высокая надежность обнаружения в обстановке стабильного гравитационного поля, например, вне города, где нет крупных передвигающихся масс (автомобилей, лифтов, транспорта) или под землей, где до этих масс далеко.

Основные недостатки гравиметрических СО:

- малые размеры зоны обнаружения;
- большие габариты и масса аппаратуры;
- высокая стоимость оборудования.

2.17. Емкостные СО

Принцип действия емкостного СО основан на измерении емкости «открытого» конденсатора. Обкладками конденсатора служат либо сами охраняемые металлические объекты, либо проводящие предметы подходящей формы, устанавливаемые в местах приближения или прикосновения нарушителя. Емкость конденсатора может измеряться как между двумя металлическими предметами, выступающими в качестве его обкладок, так и между отдельным предметом и «землей». Смысл «открытого» конденсатора заключается в том, что нарушитель (или его часть) попадает в пространство между обкладками. В этом случае, благодаря высокой диэлектрической проницаемости тела человека, емкость конденсатора возрастает, что фиксирует электронная схема. Порог чувствительности емкостного СО обычно регулируется, его можно настроить на срабатывание в случае приближения к ЧЭ на заданное расстояние (до десятков сантиметров) или на касание ЧЭ.

Емкостные СО могут быть как точечными, так и линейными. Они успешно функционируют не только в помещениях, но и на улице. Точечное емкостное СО обычно является внутренним и применяется для охраны отдельных предметов внутри помещения; линейное – чаще всего внешнее – размещается на стене или заборе и служит для охраны протяженных участков.

В состав емкостного СО входит антенная система (АС), образующая обкладки конденсатора, и блок обработки (БО), реагирующий на изменения емкости антенной системы. АС уличного СО изготавливается из проводящего материала и имеет вид сетки, решетки или ряда параллельных проводов большого диаметра, устанавливаемых на изоляторы вдоль ограды. Сетчатая или проводная конструкция позволяет экономно расходовать материал при изготовлении ЧЭ большой длины. Для уменьшения количества ложных срабатываний она выполняется в виде козырька или декоративной

решетки в верхней части забора или вдоль фасада здания на большой высоте.

АС точечного СО обычно выполняется в виде металлических пластин. Проблема расхода материала стоит здесь не так остро, важнее оказывается технологичность, что и приводит к такой форме ЧЭ. Хотя возможны и другие решения — в виде сетки, решетки или отдельных проводов. Роль ЧЭ могут выполнять и любые другие изолированные от «земли» металлические предметы — сами охраняемые объекты (сейф, стеллаж, автомобиль) или находящиеся на пути нарушителя предметы интерьера (металлические двери, алюминиевые оконные рамы, дверные ручки, шеколды, задвижки, осветительные приборы, мебельная фурнитура).

Прежде всего оценим диапазон измеряемых значений емкости и ее изменений в результате приближения нарушителя или естественных воздействий, что позволит сравнивать полезные и помеховые воздействия, выделять наиболее сильные источники ложных срабатываний и определять наилучшие условия работы СО. Два варианта измерения емкости — между металлическим предметом и землей и между двумя проводниками — отличаются не только величиной емкости и ее изменений, но и рядом других особенностей, таких как применение, характерные виды помех, схемные решения.

В случае измерения неизвестной емкости C_x некоторого предмета относительно земли (рис. 2.17.1) одной из обкладок является земля, другой — линейный провод, плоская пластина или объемный предмет. Данный вариант отличается простотой построения и реализации емкостного принципа действия. В нем экономичнее расходуются материалы, так как половину антенной системы представляет собой богемная земля, а другую составляют в основном предметы, которые необходимо только подсоединить к БО. Последний измеряет текущую величину C_x и проводит анализ сигналов. Наиболее важное преимущество данного ва-

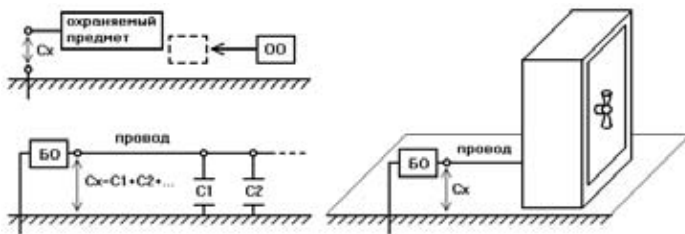


Рис. 2.17.1 Измерение емкости относительно земли

рианта измерения — это возможность последовательного подсоединения многих охраняемых предметов одним проводом к общему БО. Контролируемая емкость складывается в этом случае из емкостей отдельных предметов ($C_x = C_1 + C_2 + \dots$). Количество предметов может достигать нескольких десятков, что дает значительную экономию устанавливаемой электроники. Подобное СО можно использовать для охраны самых разнообразных предметов: сей-

фов, статуй, стеллажей, экспонатов, автомобилей на парковке, самолетов на стоянке, дверей, окон, проходов, предметов мебели. Желательно, чтобы объединяемые предметы были однородными, то есть обладали примерно одинаковыми размерами и емкостью.

Вариант измерения емкости относительно земли имеет ряд недостатков. Параметры земли нестабильны и меняются в зависимости от сезона и текущих погодных условий. Величина C_x заранее неизвестна и при разном расположении окружающих предметов может изменяться в широких пределах. Кроме того, необходимо надежное заземление СО. Вблизи от железных дорог, в промышленных зонах или в черте города по земле распространяются интенсивные наводки, которые осложняют работу связанной с ней аппаратуры. Для ослабления влияния помех между антенной системой и землей часто располагают так называемый охранный электрод, на который подается опорное напряжение. Он охраняет измерительные входы от паразитных утечек и влияния земли. Таким образом, вариант измерения емкости относительно земли обеспечивает наиболее дешевую реализацию емкостного СО, но он сопряжен с решением ряда проблем.

Наиболее стабильные и предсказуемые значения контролируемой емкости C_x обеспечивает вариант ее измерения между двумя электродами (рис. 2.17.2). Человека трудно загнать в зазор между двумя пластинами классического плоско-параллельного конденсатора. Обкладки могут располагаться вблизи друг от друга в одной плоскости, к которой возможно ожидать приближения человека; такой конденсатор называется копланарным. Если охраняемый предмет (металлический или обладающий высокой диэлектрической проницаемостью) установлен сверху на две пластины копланарного конденсатора, то в случае удаления предмета емкость уменьшается. Возможно также, что сам охраняемый металлический предмет является одним из электродов (если предмет неметаллический, то электрод располагается вблизи от него), а другой электрод устанавливается на полу вблизи от этого предмета. Наступив на нижний электрод и приблизившись к охраняемому предмету, человек увеличивает емкость между ними. Таким способом можно охранять любые — металлические или неметаллические — предметы любых размеров или локальные места передвижения ОО.

Межэлектродное измерение емкости обеспечивает неизменные показатели. Соответ-

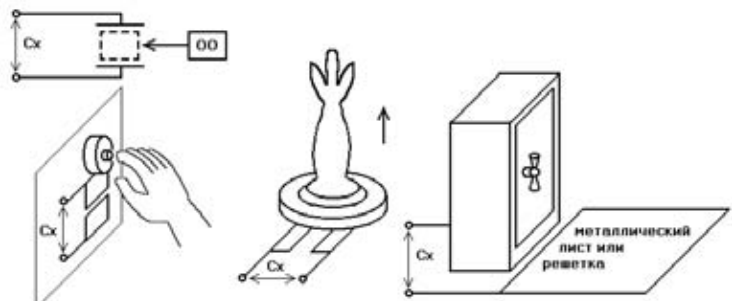


Рис. 2.17.2 Измерение емкости между двумя электродами

твующие емкостные СО практически не требуют настройки или регулировки. Но и они не лишены недостатков. Прежде всего, с помощью одного БО удастся обеспечить охрану лишь одного, максимум – двух-трех предметов, расположенных вблизи друг от друга. Наличие заземленных и проводящих предметов также искажает результаты измерений. Кроме того, каждый электрод потребует самостоятельного изготовления. Выбор одного из вариантов должен производиться в зависимости от расположения конкретных объектов охраны и от толщины кошелька.

Перейдем к оценке емкости для типовых вариантов формы и расположения электродов. В первую очередь необходимо представлять себе, какие значения может принимать начальное значение емкости АС C_0 , так как методы измерений в диапазонах пикофард и микрофард различны. Далее необходимо учитывать влияние земли, окружающих проводящих поверхностей и областей, заполненных диэлектриком. Все три фактора вызывают увеличение емкости C_0 . Наиболее интересны оценки изменений емкости, связанных с приближением ОО $\Delta C_{\text{ПОЛЕЗН}}$ и влиянием различных помеховых факторов $\Delta C_{\text{ПОМЕХ}}$. При этом полезные изменения емкости должны быть сравнимы с ее исходным значением, а помеховые – должны быть существенно меньше полезных. В противном случае трудно ожидать высоких показателей от соответствующего емкостного СО. Сама АС должна быть сконструирована, изготовлена и установлена таким образом, чтобы полезные изменения емкости были максимальными. Фиксация изменений, превышающих 1...5 пФ, обычно не вызывает затруднений, более точные измерения усложняют и удорожают электронные схемы. Необходимо также иметь в виду, что проводящие свойства земли и характеристики диэлектриков зависят от диапазона частот, на которых ведется измерение емкостей.

Вспомним знакомую со школьной скамьи формулу емкости плоского конденсатора (рис. 2.17.3): $C = \epsilon \epsilon_0 LW / G$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость вещества между обкладками конденсатора (или относительная диэлектрическая проницаемость), ϵ_0 – электрическая постоянная (или абсолютная диэлектрическая проницаемость), равная $\epsilon_0 = 1/(36\pi \times 10^9) = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м, L – длина обкладки, W – ее ширина, G – расстояние (зазор) между обкладками. Диэлектрическая проницаемость воздуха близка к единице, ее значения для других окружающих нас (и АС) веществ и материалов приведены в таблице 2.17.1. Указанные значения относятся к сухим веществам, по мере намокания они возрастают пропорционально количеству свободной или химически связанной воды.

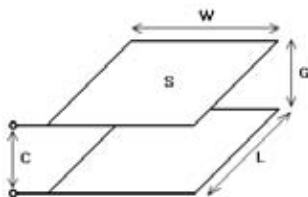


Рис. 2.17.3 Плоский конденсатор

Таблица 2.17.1 Диэлектрическая проницаемость ϵ некоторых веществ

Вещество, среда	Диэлектрическая проницаемость ϵ
Вакуум	1
Воздух	1,0006
Бумага	2...3
Тефлон (фторопласт)	2...3
Древесина	2...4
Полиэтилен	2,3
Полистирол	2,4...3,0
Резина	2,5...4
Асфальт	2,7
Герметик силиконовый	2,8...3,1
Стекло органическое	2,8...3,5
Поливинилхлорид	2,9...3,5
Почва	3...6
Лед	3,2
Песок (чистый)	3,7
Стекло кварцевое	3,7
Фанера	4
Песчаник	4...5
Бетон	4...6
Фарфор	4,4...6,8
Вода химически связанная	4,5...5,8
Скальные породы	5
Кирпич	5...6
Стеклотекстолит	5,5
Стекло оконное	7...8
Текстолит	7,5
Мрамор	8,2...8,4
Спирт этиловый	25,8
Тело человека	46±8
Вода (дистиллированная)	80

Формула плоского конденсатора позволяет оценивать емкости многих предметов охраны, таких как сейф, металлический шкаф, автомобиль, самолет, точнее – той их части, которая заключена между дном и землей или металлической пластиной, установленной под данным предметом. Следует сразу оговориться, что отдельная формула не позволяет точно оценить значение емкости, но с учетом большого разброса параметров объектов найденные диапазоны изменения емкости будут довольно точно отражать параметры, требуемые для построения электронных блоков. Поэтому по мере возможностей все объекты будут заменяться простейшими геометрическими фигурами, что позволит получить оценки в наиболее удобном виде, дающем возможность проследить основные закономерности и особенности, присущие емкостным СО.

Средние значения геометрических параметров типичных объектов даны в таблице 2.17.2. Объекты могут быть представлены в виде параллелепипедов, основания которых параллельны поверхности земли. Кроме длины корпуса L , его ширины W и зазора (просвета) между дном и поверхностью земли или пола G нам по-

Таблица 2.17.2 Средние значения геометрических параметров объектов

Объект	L, м	W, м	H, м	G, м	S _{крыл} , м ²	G _{крыл} , м
Сейф (средний)	0,6±0,1	0,4±0,1	1,5±0,2	0,08±0,02	-	-
Автомобиль (легковой, четырех- пятиместный)	4±0,6	1,7±0,1	1,2±0,1	0,22±0,08	-	-
Самолет (небольшой винтомоторный, одно- двухместный)	9±2	0,95±0,15	1,5±0,3	0,9±0,2	15±5	1,2±0,2

надобятся значения высоты объекта (без просвета) H, а для самолета – площади крыла S_{крыл} и расстояния от крыла до земли G_{крыл}. Подставляя значения в формулу для емкости плоского конденсатора, а при необходимости суммируя емкости параллельных конденсаторов, легко получить оценки частичной емкости различных объектов (между дном и землей): для сейфа – C_{дно,сейф} = 13...52 пФ (среднее – 26 пФ), для автомобиля – C_{дно,автом} = 160...520 пФ, для самолета (вместе с крыльями) – C_{дно,самол} = 110...370 пФ.

Дно объектов дает лишь часть вклада в их полную емкость. Каждая боковая стенка (рис. 2.17.4) вносит свой дополнительный вклад, величину которого можно оценить соотношением для конденсаторов со взаимно перпендикулярными обкладками C = 2εε₀K((1-k²)^{1/2}) / K(k), где значение k определяется геометрическими параметрами обкладок k = ((a² + c²)(b² + d²) / ((a² + d²)(b² + c²)))^{1/2}, а функция K(k) представляет собой полный эллиптический интеграл первого рода:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}}$$

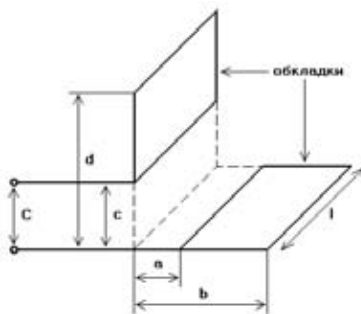


Рис. 2.17.4 Конденсатор со взаимно перпендикулярными обкладками

Данное соотношение выполняется тем точнее, чем больше отношение длины l к поперечным размерам обкладок (b – a) и (d – c). Подставляя в него значения параметров среднего сейфа (табл. 2.17.2) l = 2L + 2W, a = 0, b = ∞, c = G, d = H + G, k = G/(H + G) и учитывая первые члены в разложении эллиптических интегралов при малых значениях k: K(k) = π/2, K((1-k²)^{1/2}) = ln(4/k), получим оценку вклада боковых стенок в емкость C_{бок,сейф} = 8(L + W)εε₀ln(4 + 4H/G)/π = 73...130 пФ. Средний вклад составляет 100 пФ или по 25 пФ на каждую боковую стенку. Поскольку величина емкости каждой части сейфа оценивалась по отношению к своей части земли, можно просуммировать их, чтобы получить полную емкость сейфа относительно земли C_{сейф} = C_{дно,сейф} + C_{бок,сейф} = 86...180 пФ. Найденная оценка соответствует случаю установки сейфа в центре

большой пустой комнаты. Внутри реальных помещений картина меняется. В зданиях и комнатах присутствует множество предметов с диэлектрической проницаемостью ε, значительно превышающей единицу. Кроме того, большое количество протяженных проводящих объектов образует дополнительные паразитные емкости между сейфом и землей. Оба эти фактора приводят к росту емкости. Если задняя стенка располагается параллельно проводящей поверхности на расстоянии G₁ = 0,04 м от нее, то соответствующий вклад в емкость составит C = 8,85×10⁻¹² × LH / G₁ = 200 пФ (вместо 25 пФ). Таким образом, оценка емкости будет лежать в пределах C_{сейф} = 100...600 пФ. Меньшие значения соответствуют установке сейфа в относительно свободных помещениях, большие – вблизи от стен, перегородок, отопительных приборов, арматуры, протяженных металлических конструкций, в углах комнат.

Проведя аналогичные вычисления, получим значения емкости автомобиля C_{автом} = 400...900 пФ и емкости небольшого самолета C_{самол} = 400...1000 пФ. В ходе вычислений необходимо уменьшать площади боковых поверхностей на площадь остекления, а значения эллиптических интегралов для больших значений k определять по таблицам.

Оценим полезные изменения емкости. Приближенно представим человека в виде параллелепипеда высотой H_{чел} = 1,7 м с квадратным основанием, сторона которого L_{чел} = 0,2 м (рис. 2.17.5). Тогда объем параллелепипеда V_{чел} = 1,7×0,2×0,2 = 0,068 м³ соответствует массе среднего человека (68 кг) и можно считать, что весь объем имеет среднюю относительную диэлектрическую проницаемость тела человека ε = 46. Если параллелепипед приближается к сейфу вплотную (расстояние R = 0), то изменение емкости максимально. Для его оценки воспользуемся соотношением ΔC₁ = 2L_{чел}εε₀K((1-k²)^{1/2}) / K(k), где в соответствии с рисунком a = 0, b = L_{чел}, c = G, d = G + H, следовательно, величина k = ((a² + c²)(b² + d²) / ((a² + d²)(b² + c²)))^{1/2} ≈ G / ((L_{чел})² + G²)^{1/2}. Она не зависит ни от высоты человека, ни от высоты объекта. В случае приближения вплотную к сейфу (табл. 2.17.2) величина k = 0,29...0,41, ее нельзя считать малой, так что придется воспользоваться таблицами эллиптических интегралов. Полезное изменение емкости составит ΔC₁ = 2L_{чел}εε₀K((1-k²)^{1/2}) / K(k) = 190...320 пФ. Подобного изменения можно было бы ожидать, если бы человек действительно стоял босиком на листе металла. На самом деле человек приподнят над проводящей поверхностью подошвами обуви и покрытием пола, имеющими (в сухом состоянии) среднюю диэлектрическую проницаемость ε_{стоп} = 3...6, на высоту G_{стоп} = 0,02...0,04 м. Площадь контакта (площадь двух стоп) составляет S_{стоп} = 0,03...0,05 м². В результате последовательно с конден-

сатором емкостью ΔC_1 оказывается подсоединенным плоский конденсатор емкостью $\Delta C_2 = \epsilon_{\text{стоп}} \epsilon_0 S_{\text{стоп}} / G_{\text{стоп}} = 20 \dots 130$ пФ. Полное изменение емкости сейфа в случае приближения человека определяется выражением для емкости последовательно соединенных конденсаторов, оно может достигать величины $\Delta C_{\text{чел-сейф}} = 1 / (1/\Delta C_1 + 1/\Delta C_2) = 20 \dots 90$ пФ. Такие же изменения будут сопровождать приближение к любым объектам, сравнимым по размерам с ОО.

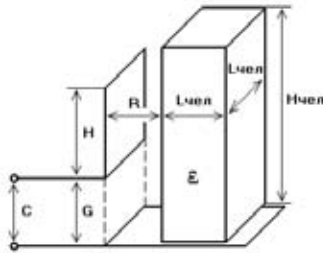


Рис. 2.17.5 Модель оценки полезного изменения емкости

Полученные выше оценки полезных изменений емкости соответствуют случаю полного контакта человека с различными объектами. В случае приближения человека на небольшое расстояние R (рис. 2.17.5) следует ожидать меньшего изменения. Но насколько? Как быстро падает чувствительность при увеличении R ? Приблизительно можно считать, что удаление человека на расстояние R соответствует последовательному подсоединению к исходному конденсатору $\Delta C_{\text{чел-объект}}$ дополнительного плоского конденсатора с площадью обкладок $S_{\text{конт}}$, равной площади контактирующей поверхности человека, и воздушным зазором R . Величина емкости дополнительного конденсатора равна $\Delta C_3 = \epsilon_0 S_{\text{конт}} / R$. С учетом того, что человек может наклоняться, подниматься, шевелить руками и ногами, можно принять величину $S_{\text{конт}}$ (среднюю площадь человека-обкладки), приблизительно равной произведению длины туловища (1,1 м) на его ширину (0,2 м) $S_{\text{конт}} = 1,1 \times 0,2 = 0,22$ м². Тогда $\Delta C_3 = \epsilon_0 S_{\text{конт}} / R = 0,22 \times 8,85 \times 10^{-12} / R = 2,0 \times 10^{-12} / R$, а искомая зависимость изменения емкости от расстояния до человека принимает вид $\Delta C(R) = 1 / (1/\Delta C_{\text{чел-объект}} + 1/\Delta C_3) = 1 / (1/\Delta C_{\text{чел-объект}} + R / (2 \times 10^{-12}))$, где значение $\Delta C_{\text{чел-объект}}$ соответствует минимальному расстоянию $R = 0$.

На расстояниях $R \gg R_0 = \epsilon_0 S_{\text{конт}} / \Delta C_{\text{чел-объект}} = 2 \times 10^{-12} / \Delta C_{\text{чел-объект}}$ зависимость упрощается, тогда $\Delta C(R) = \epsilon_0 S_{\text{конт}} / R = 2 \times 10^{-12} / R$. Так, например, для значения $\Delta C_{\text{чел-объект}} = 50$ пФ величина $R_0 = 2/50 = 0,04$ м. Поэтому на расстоянии $R = 0,2$ м следует ожидать изменения емкости $\Delta C(R) = 2 \times 10^{-12} / R = 10$ пФ, на расстоянии $R = 0,5$ м – 4 пФ, а на расстоянии $R = 1$ м – 2 пФ. Меняя порог срабатывания в пределах от единиц до десятков пикофарад, мы управляем размерами ЗО от 1 м до полного контакта. Приведенные соотношения можно использовать и для объектов с другой площадью $S_{\text{конт}}$ (рука, ладонь, палец).

Из полученных оценок следует, что начальная емкость АС составляет 100...1000 пФ (для одного охраняемого предмета типа сейфа, автомобиля или самолета),

величина изменения емкости в случае касания достигает 20...100 пФ, при приближении – до единиц пикофарад, значение порога срабатывания – 2...30 пФ.

Рассмотренные три варианта объединяет то, что их АС имеет большие размеры. Поэтому соответствующие емкостные СО реагируют на появление человека целиком, они обладают примерно одинаковой величиной полезного изменения емкости $\Delta C_{\text{чел-объект}}$ и дальностью обнаружения R . Большим сходством с ними обладает еще один важный вариант антенной системы – емкостной козырек, устанавливаемый поверху забора или вдоль стены здания (рис. 2.17.6). Козырек имеет большую длину до нескольких сотен метров, он может быть вертикальным, наклонным или горизонтальным. Высота его установки H должна быть не менее 1,8 м, чтобы СО не реагировало на проходящих мимо ограждения или здания людей до тех пор, пока никто из них не предпримет попытку перелезть через забор или взобраться на стену.

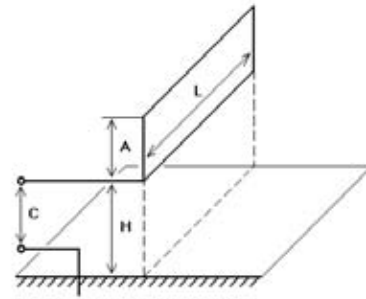


Рис. 2.17.6 Модель протяженной антенной системы

Оценим емкость плоской АС длиной L и шириной A , установленной на высоте H над землей, считая величину A малой по сравнению с L и H . В этом случае емкость $C = 4L\epsilon\epsilon_0 K((1-k^2)^{1/2}) / K(k)$, где параметр $k = ((a^2 + c^2)(b^2 + d^2) / ((a^2 + d^2)(b^2 + c^2)))^{1/2} = H / (H + A)$ близок к единице, а величина $(1-k^2)^{1/2} \rightarrow 0$. Для малых отношений A/H получаем $K((1-k^2)^{1/2}) = \pi/2$, $k = 1 - A/H = (1 - 2A/H)^{1/2}$, $K(k) = \ln(4/(2A/H)^{1/2})$, следовательно, $C = 4\pi L\epsilon\epsilon_0 / \ln(8H/A)$. Для типичных значений $L = 100$ м, $H = 2$ м, $A = 0,5$ м получим оценку начальной емкости антенной системы $C = 4\pi L\epsilon\epsilon_0 / \ln(8H/A) = 3200$ пФ. Если провести аналогичную оценку емкости для наклонного или горизонтального козырька, то окажется, что она почти не зависит от угла наклона (при условии $A/H \ll 1$).

Для получения полной картины начальной емкости АС необходимо провести еще одну оценку – оценку емкости соединительного провода (в случае размещения СО на удалении от охраняемого объекта или последовательного соединения группы объектов). Емкость провода круглого сечения диаметром D , проходящего на высоте H над землей, равна $C = 2\pi L\epsilon\epsilon_0 / \ln(4H/D)$, где L – длина провода. Погонная емкость провода типичного для ОПС диаметра $D = 0,5$ мм = 0,0005 м, идущего на высоте $H = 2$ м, в расчете на один метр длины составит $C/L = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln(4H/D) = 5,7$ пФ/м. Емкость провода прибавляется к емкости АС.

Зная величину начальной емкости и ее полезного изменения, необходимо оценить возможные ее изменения под действием различных помеховых факторов. К таким факторам относятся механические воздействия, изменения диэлектрической проницаемости среды или проводимости окружающих предметов, а также перемещение в ЗЧ объектов с высокой диэлектрической проницаемостью.

Механические воздействия на АС – это различного рода удары, сотрясения или порывы ветра. Они могут привести к смещению обкладок конденсатора и изменению его емкости. Для того, чтобы емкость антенной системы (рис. 2.17.6) $C = 4\pi L\epsilon\epsilon_0 / \ln(8H/A) = 3200$ пФ изменилась на величину $\Delta C = 1$ пФ необходимо сдвинуть антенную систему (по всей длине L) на расстояние ΔH , которое можно найти путем дифференцирования предыдущего выражения $\Delta C/\Delta H = 4\pi L\epsilon\epsilon_0 / (H(\ln(8H/A))^2) = C / (H\ln(8H/A)) = 460$ пФ/м или $\Delta H = 1/460 = 0,002$ м = 2 мм. Локальный сдвиг (на более коротком участке) может быть существенно больше. Например, к такому же изменению емкости $\Delta C = 1$ пФ приведет сдвиг однометровой секции горизонтального козырька вниз или вверх на расстояние 0,2 м. Антенную систему следует надежно фиксировать против перемещения в вертикальной плоскости более чем на несколько миллиметров. Помогает также ветрозащита или снижение парусности АС.

Оценим максимальную длину участка, полагая, что колебания отдельных секций длиной $L_{\text{СЕК}} = 2...3$ м, из которых собрана АС, независимы. Умеренно жесткому монтажу соответствуют смещения секции в пределах $\Delta H = 1$ см = 0,01 м и изменения емкости секции $\Delta C_{\text{СЕК}} = 4\pi L_{\text{СЕК}}\epsilon\epsilon_0\Delta H / (H(\ln(8H/A))^2) = 0,09...0,14$ пФ. Количество секций, составляющих участок длиной L , будет равно $N = L/L_{\text{СЕК}}$. Изменение емкости всей АС, определяемое как сумма независимых случайных изменений отдельных секций, оценивается выражением $\Delta C = \Delta C_{\text{СЕК}}N^{1/2} = \Delta C_{\text{СЕК}} \times (L/L_{\text{СЕК}})^{1/2}$. Задав максимальный уровень помехового воздействия равным $\Delta C = 1$ пФ, получим ограничение на длину участка $L < (\Delta C / \Delta C_{\text{СЕК}})^2 \times L_{\text{СЕК}} = 150...250$ м, причем меньшее значение L соответствует большей длине секции $L_{\text{СЕК}}$. Следовательно, гораздо важнее жестко крепить козырек к основанию, чем отдельные его секции между собой.

Используя найденные ранее зависимости емкости C от величины зазора G для различных объемных предметов (сейф, автомобиль, самолет), можно точно так же оценить устойчивость СО к их смещениям, колебаниям и вибрации. Дифференцируя выражения $C(G)$ и подставляя средние значения параметров, находим, что величина $\Delta C/\Delta G$ находится в пределах (200...1000) пФ/м, то есть изменениям емкости $\Delta C = 1$ пФ соответствуют смещения на $\Delta G = 1...5$ мм. Чувствительность к вибрации довольно высокая. Спасает то, что амплитуда колебаний сейфа или автомобиля (относительно земли) сверх нескольких миллиметров – большая редкость, разве что во время перевозки на железнодорожной платформе. Да и частоты вибрации лежат выше спектра полезных сигналов.

Изменения диэлектрической проницаемости среды или проводимости окружающих предметов связаны в основном с повышением влажности или осадками. Диэлектрическая проницаемость сухого воздуха (при нормальной температуре 20°C) равна $\epsilon = 1,0006$. Относительной влажности 100% соответствует значение $\epsilon = 1,0008$. Если в сухом воздухе емкость антенной системы составляла $C = 3200$ пФ, то во влажном она увеличится на $\Delta C = 3200 \times 0,0002 = 0,6$ пФ. Влияние влажности на емкость пренебрежимо мало, к тому же она не испытывает резких изменений.

Кроме влажности на величину ϵ влияет наличие тумана, снега или дождя. Правда воздействуют они только на внешние СО. Содержание воды в тумане составляет $W = 0,1...0,5$ г/м³, что означает массу воды в единице объема воздуха. Если бы вода занимала весь объем ($W_{\text{ВОДА}} = 10^6$ г/м³), то диэлектрическая проницаемость равнялась бы $\epsilon_{\text{ВОДА}} = 80$. Следовательно, вклад тумана в диэлектрическую проницаемость воздуха равен $\Delta\epsilon_{\text{ТУМАН}} = \epsilon_{\text{ВОДА}} \times W / W_{\text{ВОДА}} = 0,000008...0,00004$. Он на порядок ниже влияния влажности воздуха. Влияние снега также невелико в связи с низкой диэлектрической проницаемостью замерзшей воды.

Содержание воды в воздухе во время дождя меняется в зависимости от его интенсивности. Во время мелкого осеннего дождя интенсивностью $I = 1$ мм/час содержание воды в воздухе составляет около $W = 0,07$ г/м³. Тогда за счет капель воды диэлектрическая проницаемость воздуха возрастает на величину $\Delta\epsilon_{\text{ДОЖДЬ}} = \epsilon_{\text{ВОДА}} \times W / W_{\text{ВОДА}} = 6 \times 10^{-6}$, то есть влияние такого дождя пренебрежимо мало. Однако во время ливня максимальной интенсивности (до сотен мм/час) содержание воды может достигать $W = 10$ г/м³. В этом случае вклад дождя в диэлектрическую проницаемость воздуха доходит до $\Delta\epsilon_{\text{ДОЖДЬ}} = \epsilon_{\text{ВОДА}} \times W / W_{\text{ВОДА}} = 0,0008$. Емкость антенной системы $C = 3200$ пФ во время ливня может измениться на $\Delta C = 3200 \times 0,0008 = 3$ пФ, что уже приближается к величине полезного сигнала. Изменения емкости происходят за единицы или десятки секунд, то есть длительности полезных и помеховых сигналов также совпадают.

Более значительное влияние дождя проявляется еще в одном виде – за счет намокания и возрастания проводимости окружающих предметов. Проводящая поверхность сухой земли после намочения верхнего слоя почвы становится ближе к АС на несколько сантиметров. То же самое может произойти и в случае выпадения росы или таяния снега. Как было видно ранее при оценке влияния вибрации, изменениям расстояния в несколько сантиметров соответствуют изменения емкости в несколько десятков пикофард. В качестве противодействия погодным помеховым факторам антенные системы двух соседних участков подключают к блоку обработки по дифференциальной схеме. Тогда одновременные изменения емкости двух участков взаимно компенсируют друг друга.

Намокает не только земля, но также и ограждение, стены и растительность. Масса дерева превышает массу человека. Если оно намочнет и будет качаться под действием ветра вблизи от АС емкостного СО, то не-

избежны резкие изменения емкости величиной в десятки пикофард. Следовательно, подобную растительность необходимо заранее удалить. Намокание сопровождается изменением не только реактивной составляющей сопротивления АС, но и ее активной составляющей.

Еще один важный помеховый фактор — это перемещение в ЗЧ объектов с высокой диэлектрической проницаемостью, то есть животных и птиц. Диэлектрическая проницаемость любой биологической ткани примерно одинакова. Поэтому изменения емкости фактически пропорциональны массе воздействующего тела. Если для некоторой АС сигнал от среднего человека массой 70 кг составит 20 пФ, то порог срабатывания на уровне 10 пФ обеспечит помехоустойчивость к воздействию средних животных и птиц массой до 35 кг. Но стая птиц или животных при своем перемещении вызовет ложное срабатывание, если масса 35 кг будет превышена. Выходов, как всегда, два — или отпугивать животных и птиц, или не устанавливать емкостные СО вблизи от водоемов, мест водопоя и тому подобных участков скопления живности.

Среди емкостных СО важное место занимают компактные датчики, которые реагируют не на появление человека целиком, а на приближение или прикосновение отдельной его части — руки, ноги, головы, пальца. Они регистрируют небольшие изменения емкости порядка 1 пФ, поэтому устанавливаются преимущественно внутри помещений, где влияние помеховых факторов невелико. К подобному емкостному СО могут подсоединяться дверные или оконные ручки, части осветительных приборов, фурнитура. Если поблизости нет подходящих металлических предметов, то антенную систему могут образовывать небольшие пластины из проводящих материалов.

Предмет типа дверной ручки, щеколды или засова можно представить в виде цилиндра длиной L и диаметром D , расположенного над землей на высоте H (рис. 2.17.7). Емкость между горизонтальным или вертикальным цилиндром и проводящей поверхностью вычисляется (при больших отношениях H/L и H/D) по формуле $C = 2\pi L \epsilon_0 / (\ln(2L/D) - 0,307)$. Для значений $H = 0,8 \dots 1,2$ м, $L = 0,1 \dots 0,15$ м, $D = 0,02 \dots 0,05$ м получаем $C = 3 \dots 6$ пФ. Рядом с ручкой обычно находится дверь, окно или люк. Их наличие всегда повышает значение полученной оценки емкости, так как металл (стальная дверь) образует дополнительный конденсатор, а диэлектрик (деревянная) — обладает диэлектрической проницаемостью более единицы.

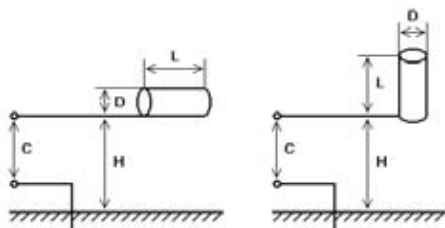


Рис. 2.17.7 Емкость небольшого предмета относительно земли

Как отмечалось ранее, измерение емкости относительно земли сопряжено с дополнительными помехами, связанными с нестабильностью ее параметров. Значительно ослабить влияние подобных помех позволяет измерение емкости между двумя проводниками. Наиболее удобно использовать копланарный конденсатор (рис. 2.17.8), обкладки которого лежат в одной плоскости. Он может быть размещен в любом подходящем месте: рядом с дверной ручкой, под кнопкой звонка, снизу от охраняемого предмета, вблизи от замка или замочной скважины. Приближение руки к обкладкам вызывает возрастание емкости конденсатора, снятие предмета (проводящего или обладающего $\epsilon > 1$) с обкладок — уменьшение емкости. Для увеличения площади СО можно добавить дополнительные пластины, соединив их параллельно через одну (рис. 2.17.8).

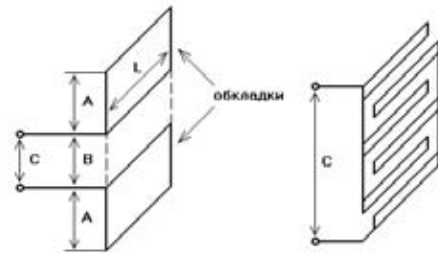


Рис. 2.17.8 Копланарный конденсатор

Емкость копланарного конденсатора равна $C = L \epsilon_0 K((1-k^2)^{1/2}) / K(k)$, где $K(k)$ — полный эллиптический интеграл первого рода, параметр $k = 1 / (1 + 2A/B)$, L — длина обкладки, A — ее ширина ($A < L$), B — расстояние (зазор) между обкладками. Для конденсатора с малым зазором ($B \ll A$) величина k близка к нулю, поэтому выражение для емкости упрощается и принимает вид $C = 2L \epsilon_0 \times \ln(8A/B) / \pi$. Если пластины размещаются вдоль границы раздела двух сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 , то емкость составит $C = L(\epsilon_1 + \epsilon_2)\epsilon_0 \times \ln(8A/B) / \pi$.

Копланарный конденсатор небольших размеров ($L = 0,1$ м, $A = 0,03$ м, $B = 0,002$ м) в случае $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ обладает емкостью $C = 2L \epsilon_0 \times \ln(8A/B) / \pi = 2,7$ пФ. Пластины конденсатора не могут висеть в воздухе. Под ними находится кирпичная или бетонная стена, а сами пластины закреплены на пластмассовом основании или вытравлены на плате из фольгированного текстолита. Поэтому величина диэлектрической проницаемости с одной стороны может достигать $\epsilon_1 = 6$, а начальная емкость — величины $C = L(\epsilon_1 + 1)\epsilon_0 \times \ln(8A/B) / \pi = 9,4$ пФ.

Если копланарный конденсатор размещается над проводящей плоскостью (например, на металлической двери) на расстоянии G от нее, то параллельно ему оказывается подключенной последовательная пара плоских конденсаторов каждый емкостью по $C = \epsilon_0 \epsilon A L / G$. Для минимального расстояния $G = 0,002$ м она равна $C = 13$ пФ. Таким образом, начальная емкость над металлической поверхностью может возрастать на $C/2 = 7$ пФ.

Если рука ($\varepsilon_2 = 46$) касается пластин конденсатора, полностью накрывая обе обкладки с одной стороны, то емкость возрастает на величину $\Delta C = L(\varepsilon_2 - 1)\varepsilon_0 \times \ln(8A/B) / \pi = 60$ пФ. Приближение руки (без касания) вызывает не столь значительные изменения. Достоинством копланарного конденсатора является именно то, что он обладает большим отношением полезного изменения емкости к ее начальному значению.

Зависимость изменения емкости от расстояния до руки R оценивается соотношением $\Delta C(R) = 1 / (1/\Delta C + 2R / \varepsilon_0 S_{\text{конт}}) = 1 / (1/\Delta C + 2R / \varepsilon_0 AL)$. На больших расстояниях $R \gg R_0 = \varepsilon_0 AL / 2\Delta C = 0,2$ мм она имеет вид $\Delta C(R) = \varepsilon_0 AL / 2R = 0,013 \times 10^{-12} / R$. Пороговому изменению емкости 1 пФ соответствует дальность $R = 13$ мм.

Подводя итог, начальная емкость копланарного конденсатора небольшой площади составляет 1...10 пФ, при касании она возрастает на величину до нескольких десятков пикофард. Дальность обнаружения достигает нескольких сантиметров. Датчик отличается высокой помехоустойчивостью. Изменяя форму, размеры, число и расположение пластин, легко придать зоне чувствительности любой заданный вид.

Вообще форма и конфигурация АС любого емкостного СО должны соответствовать задаче обнаружения. Антенны-обкладки следует располагать так, чтобы, во-первых, тело нарушителя (или выбранная его часть) замыкало их по максимально возможной площади, и во-вторых, чтобы посторонние тела не могли контактировать одновременно с обеими обкладками. Такая конфигурация обеспечивает, с одной стороны, максимальные полезные изменения емкости, а с другой — минимальные помеховые изменения. Например, при охране отдельно стоящего металлического предмета, используемого в качестве одной из обкладок, наилучшим вариантом расположения второй (нижней) обкладки будет пластина или решетка, покрывающая ту часть пола, откуда нарушитель может дотянуться до охраняемого предмета (рис. 2.17.9). Между полом (или стеной) и обеими обкладками полезно иметь защитный воздушный зазор, уменьшающий влияние пола (и всего, что перемещается или течет по нему) на измеряемую емкость. Защитный зазор может быть заполнен любым материалом с низкой и стабильной диэлектрической проницаемостью (плита из жесткого пенопласта). Подобное расположение минимизирует начальную емкость при наилучшем соотношении между полезными и помеховыми изменениями емкости. Величина защитного зазора составляет $G = \varepsilon\varepsilon_0 S / C$, где S — площадь обкладки, C — защитная емкость. Так, для охраны небольшой статуи ($S = 0,1$ м²) при пороге срабатывания $C = 1$ пФ, воздушный защитный зазор величиной $G = \varepsilon\varepsilon_0 S / C = 9S = 0,9$ м гарантирует отсутствие ложных срабатываний от появления посторонних предметов, животных, протечек и пр. Из приведенного примера становится ясно, в чем заключается еще одно преимущество измерения емкости между двумя обкладками по сравнению с измерением емкости относительно земли. Обкладки монтируются там, где они необходимы; положение земли нам неподвластно. Если уста-

новка пластины затруднительна, то можно заменить ее сеткой или проводом, лежащим на полу или висящим над полом на небольшой высоте.

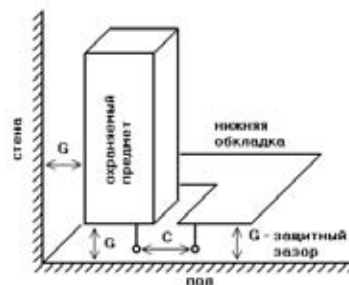


Рис. 2.17.9 Размещение антенной системы

Все приведенные оценки значений емкостей и их изменений без труда проверяются экспериментально с помощью тестера, позволяющего проводить измерения в диапазоне 0,1...1000 пФ. Для определения емкости крупной АС можно воспользоваться принципом подобия, согласно которому макет, все линейные размеры которого уменьшены в $K_{\text{под}}$ раз, обладает во столько же раз меньшей емкостью.

Итак, емкость АС может составлять от единиц до тысяч пикофард. Полезные изменения — от единиц до десятков пикофард. Зная это, перейдем к анализу методов измерения емкости. В данном случае нас интересуют не методы определения емкости в виде числа, например, 1257 пФ, а методы преобразования величины емкости в пропорциональный электрический сигнал, пригодный для последующей обработки, анализа и принятия решения. Преобразователь характеризуется прежде всего своим коэффициентом преобразования, измеряемым в единицах В/Ф. Ряд методов основан на преобразовании емкости в частоту. Методы измерения емкости можно условно разделить на низкочувствительные и высокочувствительные. Низкочувствительные отличаются простотой и невысокой точностью фиксации изменения емкости. Они пригодны для использования совместно с теми АС, которые характеризуются большим отношением полезного изменения емкости к его начальному значению $\Delta C/C$. Высокочувствительные методы позволяют фиксировать малые изменения до $\Delta C/C = 10^{-6}$. К ним относятся мостовые, резонансные и методы на основе биений.

Выбранный метод преобразования емкости в напряжение (или частоту) должен согласовываться с конструкцией АС и ожидаемым отношением $\Delta C/C$. В практике емкостных СО могут использоваться 9 различных методов преобразования и их разновидности, хотя в измерительной технике их существует гораздо больше. Чтобы не запутаться в различных вариантах, пронумеруем методы, придерживаясь последовательности от менее чувствительных к более чувствительным.

1) Преобразователь на основе RC-генератора является наиболее легким для повторения. Он может быть выполнен, например, всего лишь на одном инверторе с гистерезисом или на любом операционном усилителе.

Немного сложнее генератор на двух инверторах. Контролируемая емкость включается в цепь обратной связи. Она определяет частоту генератора. Значениям $R = 1 \text{ МОм}$ и $C = 100 \text{ пФ}$ соответствует частота порядка $f = 1/RC = 10 \text{ кГц}$. Увеличение емкости в случае приближения нарушителя приводит к пропорциональному уменьшению частоты. Частота измеряется непосредственно или преобразуется в напряжение. В связи с общим недостатком RC-генераторов – низкой стабильностью – данный метод не позволяет достичь чувствительности преобразования $\Delta C/C$ выше $0,1 \dots 0,01$.

2) Измерение частоты в предыдущем методе не должно вызывать сложностей. Однако, можно обойтись и без него. Схема упрощается, если воспользоваться RC-генератором на постоянных элементах, но установить на его выходе фильтр, частотная характеристика которого определяется контролируемой емкостью (рис. 2.17.10). Схема «генератор + фильтр» проста и популярна, но и требовать от нее многого не приходится. Частота генератора f устанавливается в диапазоне от одного до ста кГц.

Реализация схемы возможна в двух вариантах. В первом (рис. 2.17.10а) сигнал с выхода RC-генератора проходит на усилитель через контролируемую емкость. Начальные параметры R и C подбираются таким образом, чтобы сигнал испытывал значительное ослабление. После приближения ОО емкость увеличивается на ΔC и амплитуда сигнала на входе усилителя возрастает. Для устойчивой работы такой схемы должны выполняться условия: $1/(2\pi fC) > R$ и $1/(2\pi f(C+\Delta C)) < R$. Выберем конструкцию датчика таким образом, чтобы начальное значение емкости и ее полезное изменение составляли $C = \Delta C = 10 \text{ пФ}$. Тогда значения параметров $f = 10 \text{ кГц}$, $R = 1 \text{ МОм}$ обеспечивают выполнение обоих условий. Основным источником помех в данной схеме будет не дождь и не сырость, а нестабильность самого RC-генератора.

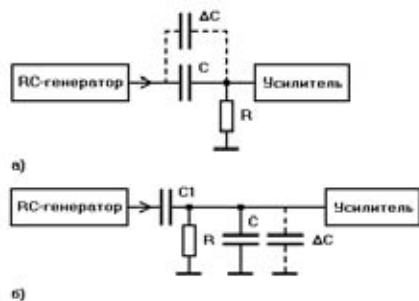


Рис. 2.17.10 Контроль емкости в составе фильтра

Во втором варианте схемы (рис. 2.17.10б) сигнал с выхода RC-генератора поступает на емкостной делитель. В его верхнем плече установлен конденсатор постоянной емкости $C1$, а в нижнем – контролируемая емкость C . Изначально сигнал с выхода генератора свободно проходит на вход усилителя. После приближения нарушителя дополнительная емкость ΔC должна полностью или частично погасить сигнал генератора. Значения параметров f , R и C выбираются аналогично предыдущему случаю. Достоинство схе-

мы – возможность контроля емкости предметов относительно земли.

3) Методы, основанные на срыве генерации, относятся к числу наиболее распространенных. Они широко используются в датчиках промышленной электроники, предназначенных для автоматизации производственных процессов, где точное значение емкости не имеет значения, но важно фиксировать факт появления продукции на конвейере или отслеживать положение рабочего органа какого-либо механизма. Данный метод отличается стабильностью. Однажды настроенное СО, не требует регулировки в течение многих лет эксплуатации. Датчик на срыве генерации является датчиком присутствия, он надежно фиксирует не только момент приближения объекта, но способен выдавать сигнал в течение всего времени нахождения объекта в ЗО.

Практически любую схему генератора можно довести до состояния, близкого к ее срыву. Это осуществляется, например, путем снижения добротности LC-контура или увеличения потерь на активном сопротивлении. Если включить контролируемую емкость в состав контура генератора, то в случае приближения человека в него вносятся дополнительные потери, и добротность уменьшается настолько, что генерация прекращается полностью.

Несколько по другому работает в режиме срыва RC-генератор. Операционные усилители широкого применения имеют ограниченный частотный диапазон. Если емкость контролируемого конденсатора мала, то ей соответствуют частоты $f = 1/RC$, выходящие за пределы допустимых, и генератор не способен формировать периодический сигнал. Приближение обнаруживаемого объекта приводит к возрастанию емкости и уменьшению частоты; в результате генератор начинает работать. При необходимости частотный диапазон ОУ может быть принудительно ограничен навесными элементами. Достоинством данного метода является низкое энергопотребление схемы в дежурном режиме.

4) Зарядовые методы основаны непосредственно на определении емкости. Сообщая конденсатору фиксированный заряд Q , можно измерять величину напряжения U и оценивать емкость по соотношению $C = Q/U$.

Несколько проще заряжать контролируемую емкость фиксированным током I до достижения заданного напряжения. Тогда из соотношения $Q = I\Delta t = CU$, где Δt – время зарядки, ясно, что величина Δt будет прямо пропорциональна измеряемой емкости.

Третий вариант непосредственно связан с измерением заряда. Если поддерживать на конденсаторе постоянное стабильное напряжение, величина поступающего на него заряда будет меняться строго пропорционально изменениям емкости $\Delta Q = \Delta CU$. Заряд будет уходить во внешнюю цепь при уменьшении емкости и втекать при ее увеличении. Дополнив цепь зарядовым усилителем, получаем готовый преобразователь изменения емкости в напряжение.

Зарядовые методы не получают широкого распространения. Они неизбежно сталкиваются с необходимостью работы с высокими входными сопротивлениями

ми и проблемой утечек заряда во влажном воздухе. Однако они позволяют снижать энергопотребление при высокой скважности импульсов заряда.

5) LC-генератор стабильнее RC-генератора. Он позволяет достичь точности измерения емкости $\Delta C/C$ до 0,01...0,001. Рабочие частоты лежат в диапазоне от десятков до сотен кГц. Контролируемая емкость подключается непосредственно в цепь колебательного контура. Появление ОО приводит к увеличению емкости и падению частоты генератора. Частота может измеряться непосредственно или с помощью преобразователя частоты в напряжение.

6) На ступеньку выше стоят мостовые схемы. Они позволяют достичь абсолютной погрешности измерения $\Delta C = 0,01$ пФ. Их относительная чувствительность $\Delta C/C$ составляет до $10^{-3} \dots 10^{-4}$, что эквивалентно изменениям в 1...10 пФ на фоне начальной емкости 1000...10000 пФ. При сравнительной простоте они вполне удовлетворяют потребностям емкостных СО.

Известны две основные схемы измерительных мостов (рис. 2.17.11). С генератора на мост подается синусоидальный сигнал $U_{ГЕН}$. В первом случае, когда потери в измеряемой емкости C_x малы, они представляются в виде неизвестного активного сопротивления R_x , подсоединяемого последовательно C_x . Во втором – когда потери велики – в виде параллельного сопротивления R_x . Условия равновесия обеих схем одинаковы. Для активной составляющей – $R_x/R_2 = R_1/R_3$ или $R_x = R_1 \times R_2 / R_3$. Для реактивной составляющей – $C_x/C_2 = R_3/R_1$ или $C_x = C_2 \times R_3 / R_1$. В лабораторных исследованиях мостовая схема балансируется вручную. При этом величины R_1, R_2, R_3 последовательно изменяются и подбираются до тех пор, пока на выходе моста не будет достигнуто нулевое показание измерительного прибора $U_{ВЫХ} = 0$. Тогда условия равновесия дают значения C_x и R_x . Процедура балансировки повторяется для каждого нового значения C_x .

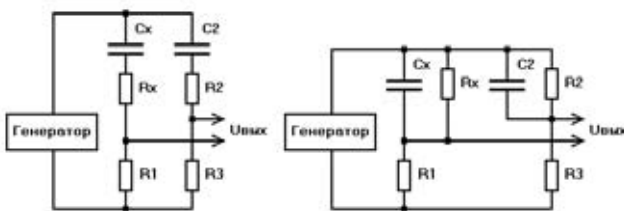


Рис. 2.17.11 Мостовая схема измерения емкости

Для использования в емкостных СО такая процедура слишком трудоемка. На практике ее можно заменить следующей последовательностью действий. Мост балансируется один раз во время установки СО, а затем измеряется сигнал разбаланса моста $U_{ВЫХ}$, величина которого пропорциональна изменению ΔC контролируемой емкости C_x . Изменения внешних условий приводят к медленной флуктуации сигнала $U_{ВЫХ}$ вокруг нулевого уровня. Появление ОО сопровождается быстрым изменением ΔC в течение короткого промежутка времени Δt , что фиксирует БО. В таком варианте не требуется постоянная балансировка моста, но емкост-

ное СО становится датчиком движения; оно не реагирует на неподвижные объекты.

Все параметры схемы известны, поэтому определить зависимость $U_{ВЫХ}(\Delta C)$ несложно, но получаемые при этом выражения весьма громоздки. Они упрощаются для случая малых потерь ($R_x = R_2 = 0$), если мост сбалансирован таким образом, что $R_1 = R_3 = 1/2\pi f C_x = 1/2\pi f C_2$. Напряжение на выходе моста равно разности напряжений двух делителей $U_{ВЫХ} = U_{ГЕН} \times (R_1 / (R_1 + 1/2\pi f j C_x) - R_3 / (R_3 + 1/2\pi f j C_2))$, где j – мнимая единица. Тогда после дифференцирования по C_x с учетом балансировки моста получаем $\Delta U_{ВЫХ} / \Delta C = U_{ГЕН} / 2C_x$. Из полученного соотношения следует три важных вывода. Во-первых, изменение выходного сигнала $\Delta U_{ВЫХ}$ синфазно с сигналом генератора $U_{ГЕН}$. Во-вторых, чувствительность не зависит от частоты f , поэтому сигнал $U_{ГЕН}$ может быть не вполне синусоидальным, а частота генератора – не очень стабильной. В-третьих, относительная чувствительность по сравнению с резистивным мостом, в котором меняется сопротивление одного из резисторов (в тех же обозначениях – $\Delta U_{ВЫХ} / \Delta R = U_{ГЕН} / 4R$), выше в два раза.

Пример. Пусть имеется датчик с $C_x = 100$ пФ, $R_x = 100$ Ом и $\Delta C = 10$ пФ. Воспользуемся первой мостовой схемой (рис. 2.17.11), выбрав $C_2 = C_x = 100$ пФ, а частоту генератора $f = 10$ кГц. Тогда реактивное сопротивление каждого из конденсаторов на данной частоте составит $1/(2\pi f C_2) = 160$ кОм. Возьмем оба резистора моста равными $R_1 = R_3 = 160$ кОм. Величиной R_x можно пренебречь. Окончательная балансировка моста производится небольшими изменениями величин R_1 и R_3 . Если на мост подается сигнал напряжением $U_{ГЕН} = 10$ В, то чувствительность моста составит $\Delta U_{ВЫХ} / \Delta C = U_{ГЕН} / 2C_x = (10 \text{ В}) / (2 \times 100 \text{ пФ}) = 0,05 \text{ В/пФ}$. Это значит, что при увеличении емкости C_x на $\Delta C = 10$ пФ выходной сигнал изменится на 0,5 В. Необходимо отметить, что сигнал $U_{ГЕН}$ периодический, поэтому отличить увеличение емкости от ее уменьшения возможно только с использованием синхронного детектора, учитывающего фазу сигнала.

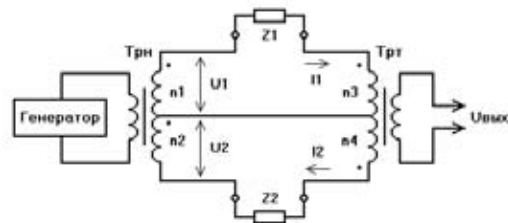


Рис. 2.17.12 Трансформаторный мост

7) Важной разновидностью мостовых схем является трансформаторный мост (Рис. 2.17.12). Генератор формирует синусоидальный сигнал и подает его на трансформатор напряжения Трн, две выходные обмотки которого включены согласно и содержат n_1 и n_2 витков. В результате напряжения на выходах обмоток U_1 и U_2 связаны соотношением $U_1/U_2 = n_1/n_2$. Если к каждой из обмоток подсоединить нагрузку с комплексным сопротивлением Z_1 и Z_2 соответственно, то через них

будут протекать токи $I_1 = U_1/Z_1$ и $I_2 = U_2/Z_2$. Подсоединив к обеим цепям трансформатор тока Трт с двумя входными обмотками, включенными встречно, получим выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$, пропорциональный разности данных токов. Если мост сбалансирован, то выходной сигнал равен нулю, а условие равновесия запишется в виде $I_1 n_3 = I_2 n_4$, где n_3 и n_4 — количество витков в соответствующих обмотках.

Объединяя приведенные соотношения, получим условие балансировки моста $Z_1 = Z_2 \times (n_1/n_2) \times (n_3/n_4)$. В лабораторных условиях на место Z_2 устанавливается образцовый конденсатор (при необходимости — с последовательно включенным резистором), а на место Z_1 — неизвестный. Обмотки трансформаторов имеют много отводов и возможность переключения числа витков. Подбирая их количество n_1, n_2, n_3, n_4 или изменяя величину Z_2 , добиваются нулевого выходного сигнала и вычисляют Z_1 по приведенному соотношению. Для удобства балансировки соотношение витков в одном из трансформаторов переключается с крупным шагом, а в другом — с мелким. Трансформаторный мост позволяет измерять емкости от долей пикофард до сотен микрофард на частотах 1...10 кГц с относительной погрешностью менее 0,001.

Трансформаторный мост по своим параметрам вполне подходит для реализации емкостного СО. В качестве Z_1 и Z_2 можно подключить две идентичные АС, например, емкостные козырьки двух соседних участков ограждения. Выходной сигнал разбаланса моста будет пропорционален изменению емкости одной АС относительно другой. В случае появления ОО емкость возрастает только в одном из плеч моста, поэтому на выходе будет наблюдаться ненулевой сигнал. Если же происходят погодные изменения, то обе емкости меняются одинаковым образом и баланс моста не нарушается. Начальные значения Z_1 и Z_2 должны быть равны, то есть размеры, длина и высота установки козырьков обоих флангов должны совпадать. Небольшую начальную балансировку моста удобнее проводить не с помощью малонадежных механических переключателей, а путем установки корректирующих конденсаторов малой емкости параллельно Z_1 или Z_2 . Количество витков в обмотках каждого трансформатора совпадает ($n_1 = n_2, n_3 = n_4$). Трансформаторный мост отличается простотой, он не требует согласования выходного импеданса генератора со входным импедансом АС.

8) Вариант RC-генератора с RC-фильтром допускает установку контролируемой емкости, как в генератор, так и в фильтр, не обеспечивая в обоих случаях высокой стабильности. Применение LC-генератора повышает точность измерения. Однако, еще более повысить точность позволяет вариант, в котором на выходе LC-генератора устанавливается резонансный LC-фильтр. Резонансный метод измерения позволяет добиться чувствительности до $\Delta C/C = 10^{-5}$.

Контролируемая емкость чаще всего встраивается в цепь LC-генератора. Начальная частота генератора $f_{\text{ГЕН}}$ — около 100 кГц. При появлении ОО она уменьшается на величину Δf , пропорциональную изменению емкости. Фильтр состоит из элементов R, L, C (рис. 2.17.13).

Он имеет стабильную резонансную частоту $f_{\text{РЕЗ}} = 1/(2\pi(LC)^{1/2})$. Зависимость выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ от частоты генератора f имеет вид колокола. Фильтр настраивается не точно на частоту генератора, а с небольшим рассогласованием, чтобы обеспечивать максимальную чувствительность. Тогда даже при небольших изменениях частоты Δf наблюдается значительное изменение амплитуды выходного сигнала ΔU . При высокой точности резонансный метод не всегда удобен, так как требует или периодической ручной подстройки, что трудоемко, или автоматического слежения за рабочей точкой, что усложняет схему.

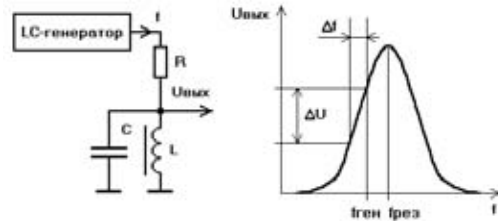


Рис. 2.17.13 Резонансный фильтр

9) Наиболее чувствительный метод измерения емкости — метод биений. Он реализуется с использованием двух генераторов, один из которых — стабильный кварцевый, а другой — LC-генератор, содержащий контролируемую емкость. Возможен вариант с двумя идентичными LC-генераторами при условии воздействия объекта на конденсатор одного из них. Наличие одинаковых генераторов повышает устойчивость к изменениям внешних условий. Выходные сигналы обоих генераторов суммируются. На выходе сумматора возникают биения с частотой, равной разности частот двух генераторов. Чувствительность метода биений $\Delta C/C$ достигает 10^{-5} ... 10^{-6} . Он редко используется в емкостных СО, так как излишне высокая чувствительность приводит к значительным изменениям величины сигнала при малейших изменениях емкости. В результате сужается динамический диапазон измеряемых значений емкости, рабочая точка уходит при незначительных изменениях окружающей обстановки, а прибор спустя непродолжительное время требует подстройки (установки нулевой частоты биений). Чувствительность метода измерений должна быть достаточной для фиксации заданных изменений $\Delta C/C$, но не более того. Метод биений находит применение в металлоискателях, где оператор в любой момент имеет возможность настроить прибор.

0) Есть и еще один — десятый (или нулевой) — метод измерения емкости. Его чувствительность невелика, но благодаря предельной простоте, он часто используется в любительских конструкциях. Метод фиксирует наводки на емкостную антенну от обычной электрической сети (50 Гц). Антенна (металлическая пластина) подсоединяется к базе биполярного транзистора, затвору полевого транзистора, входу ОУ или входу КМОП-логической микросхемы. Данный метод характеризуется нестабильностью работы, большим количеством ложных срабатываний при изменении пара-

метров сети, полной потерей работоспособности в случае отключения сетевого напряжения. Для повышения чувствительности иногда фазное напряжение подается непосредственно на схему обработки через разделительных конденсатор, что небезопасно при касании человеком антенны. От такого метода трудно ожидать высоких контролируемых показателей и лучше не использовать его вовсе.

Измерение емкости производится с помощью переменного напряжения. Важное значение имеет выбор его частоты f , на котором следует остановиться подробнее. В лабораторной практике измерения проводят на частотах 100...1000 Гц, чтобы избежать многочисленных паразитных связей на более высоких частотах, особенно при измерениях с точностью менее 1 пФ. Для нас важно отслеживать текущие параметры воздействий. Поэтому частота генерируемого сигнала должна хотя бы на порядок превышать частоты процессов, характеризующих изменение емкости при перемещении человека. Последние могут составлять до 10...100 Гц (движение человека со скоростью 5...10 м/с в пределах ЗО размером 0,1...0,2 м) с учетом того, что касание человеком АС происходит хаотически. Следовательно, частота генератора должна быть не менее 1000 Гц. Это ограничение согласуется также с необходимостью удаления рабочей частоты от основного источника наводок на АС – сети питания 50 Гц.

С другой стороны, частота не должна быть слишком высокой. Желательно избежать попадания в диапазон длинноволнового радиовещания (150...300 кГц) и более коротких волн. Хотя при небольших размерах АС ее влияние на радиоприемники ограничивается радиусом в несколько метров и может помешать наслаждаться музыкой или слушать новости разве что самому нарушителю. Таким образом, наилучшим следует считать диапазон 1...150 кГц (среднее значение – 12 кГц). Хотя в каждом конкретном случае все определяется не только значениями C и ΔC , размерами ЗО и скоростью перемещения объектов, но и возможностью использования недорогих низкочастотных ОУ, трудоемкостью намотки больших индуктивностей и т.п.

Диэлектрическая проницаемость различных материалов ϵ зависит от выбранной частоты. Проводимость окружающих предметов, в том числе земли, также меняется с изменением частоты. Поэтому после выбора определенного технического решения всегда полезно проверить степень согласования теоретических оценок с результатами практических измерений. Основные закономерности изменения параметров сохраняются, но их начальные значения, возможно, потребуют корректировки.

После емкостного ЧЭ и преобразователя емкости в электрический сигнал должна находиться хотя бы простейшая схема обработки сигнала, анализирующая его параметры и принимающая решение, отнести ли его к классу полезных и инициировать сигнал тревоги или признать помеховым и проигнорировать. Алгоритм принятия решения обычно проверяет три основных параметра сигнала – его амплитуду, скорость изменения и длительность выброса. Амплитуда изменения сигнала приблизительно пропорциональна значению массы ОО. Селекция по амплитуде позволяет отличить человека от менее крупных объектов. Скорость изменения сигнала связана со скоростью перемещения нарушителя. Она дает возможность отсеивать помеховые импульсы. Длительность выброса (продолжительность превышения заданного порога) характеризует время активного движения человека в зоне чувствительности датчика. Обычно злоумышленнику не сразу удается открыть замок, взломать дверь или сейф. Активация сигнала тревоги только в ответ на длительное воздействие обеспечивает высокую помехоустойчивость, хотя и замедляет реакцию на появление нарушителя.

Полученных оценок достаточно для того, чтобы перейти к реализации одного из вариантов емкостного СО. Возьмем в качестве ЧЭ копланарный конденсатор (рис. 2.17.8) небольших размеров ($L = 0,1$ м, $A = 0,03$ м, $B = 0,002$ м), начальная емкость которого составляет 2...10 пФ, изменение емкости при касании рукой (с учетом защитного покрытия) может достигать 30 пФ, а при ее приближении – 0,3...30 пФ. В данном случае наиболее подходит мостовая схема измерения емкости

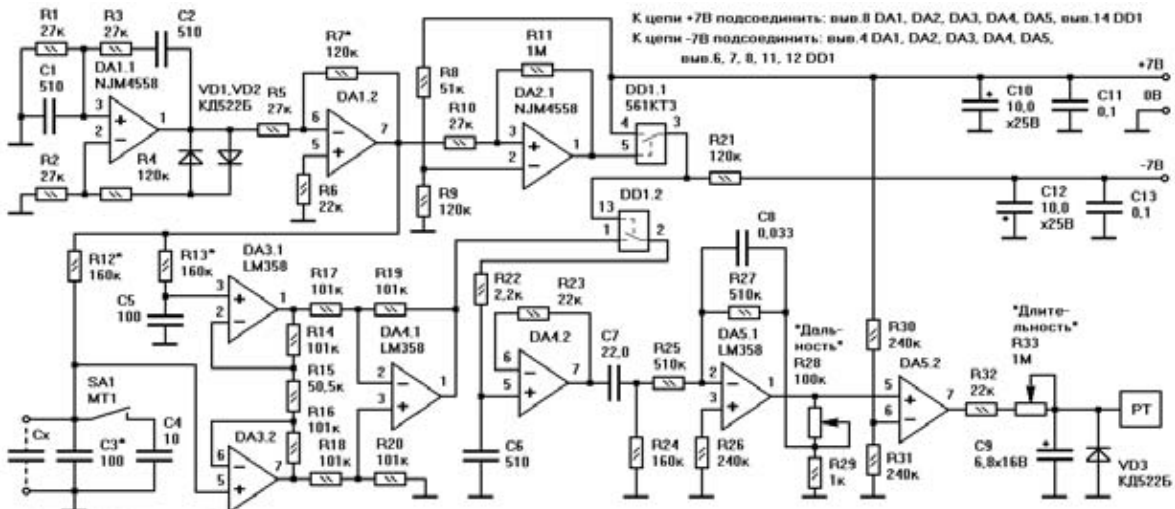


Рис. 2.17.14 Емкостное СО

(рис. 2.17.14). Генератор синусоидального сигнала выполнен на элементах DA1.1, R1, R2, R3, R4, C1, C2, VD1, VD2. Значения сопротивлений $R1 = R3 = R$ и емкостей $C1 = C2 = C$ определяют частоту сигнала $f = 1/(2\pi RC) = 10$ кГц. Она не вполне постоянна, да нам и не надо. Диоды VD1, VD2 в цепи обратной связи стабилизируют амплитуду колебаний. Параметры диодов меняются при нагревании и охлаждении, поэтому при необходимости работы в широком диапазоне температур следует применить более стабильную схему генератора.

Амплитуда генерируемого сигнала невелика, она усиливается каскадом на ОУ DA1.2 и резисторах R5, R6, R7 до максимального значения 6 В. Вспомогательная цепочка из компаратора на DA2.1 и формирователя на DD1.1 выделяет импульсы, соответствующие максимумам синусоидального сигнала. Порог компаратора определяется делителем R8, R9, он равен +5 В. Резисторы R10, R11 задают небольшой гистерезис.

Собственно мост состоит из резисторов R12, R13 и конденсаторов C3, C5. Контролируемая емкость C_x устанавливается параллельно C3. Конденсатор C4 емкостью 10 пФ может подключаться к измерительной цепи переключателем SA1. Он служит для проверки работы устройства и оценки его реальной чувствительности. Начальная балансировка моста может быть выполнена небольшой подстройкой значений R12, R13, C3 после подсоединения C_x . Чувствительность моста, измеряемая по максимальному значению синусоиды, $\Delta U_{\text{вых}}/\Delta C = U_{\text{ген}} / 2C3 = (6 \text{ В}) / (2 \times 100 \text{ пФ}) = 0,03 \text{ В/пФ}$. Диапазону изменений емкости $\Delta C = 0,3...30 \text{ пФ}$ соответствуют изменения максимума выходного сигнала моста $\Delta U_{\text{вых}} = 0,01...1 \text{ В}$.

Выходной сигнал рассогласования моста подается на инструментальный усилитель, выполненный на элементах DA3.1, DA3.2, DA4.1, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20. Для правильной работы должны с высокой степенью точности (1%) выполняться условия $R14 = R16, R17 = R18 = R19 = R20$. Коэффициент усиления равен $K_{\text{ус}} = 1 + 2R14/R15 = 5$. Текущее значение выходного сигнала данного усилителя измеряется относительно потенциала 0 В. Коэффициент усиления $K_{\text{ус}}$ выбран таким образом, чтобы максимально возможное изменение емкости $\Delta C = 30 \text{ пФ}$ не приводило к насыщению сигнала. Выбранному диапазону $\Delta C = 0,3...30 \text{ пФ}$ будет соответствовать изменение амплитуды на выходе 1 микросхемы DA4.1, равное $0,05...5 \text{ В}$.

Сигнал на выходе инструментального усилителя – по-прежнему синусоидальный с переменной амплитудой. Для определения величины амплитуды необходим детектор, для определения амплитуды со знаком – синхронный детектор. Если бы контролируемая емкость C_x содержала переменную активную составляющую $\Delta R \neq 0$, то понадобился бы еще и фазовый детектор. В данном случае, считая $\Delta R = 0$, достаточно ограничиться синхронным детектором, позволяющим отличить возрастание емкости ($\Delta C > 0$) от уменьшения ($\Delta C < 0$) (рис. 2.17.15). В идеале синхронный детектор состоит из множителя выходного сигнала моста $U_{\text{вых}}$ на сигнал генератора $U_{\text{ген}}$ и последующего интегратора. С

целью упрощения схемы заменим детектор схемой выборки-хранения, которая запоминает значения анализируемого сигнала в моменты максимумов генерируемого сигнала. Она содержит всего три элемента: DD1.2, R22, C6. Сигнал с вывода 1 DA4.1 заряжает конденсатор C6 в выбранные моменты времени.

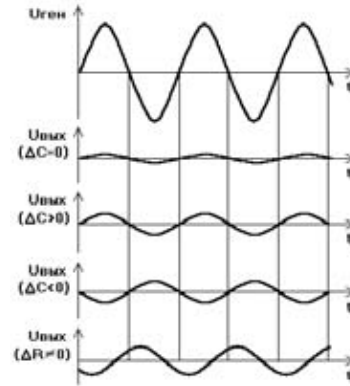


Рис. 2.17.15 Вид сигналов на выходе моста

Для развязки схемы выборки-хранения от последующих цепей установлен повторитель на микросхеме DA4.2 и резисторе R23. Последующий активный фильтр на элементах DA5.1, C7, C8, R24, R25, R26, R27, R28, R29 имеет коэффициент усиления, регулируемый в пределах $K_{\text{ус}} = 1 + R28/R29 = 1...100$. В результате до уровня +5 В может быть доведен любой сигнал, соответствующий диапазону изменений емкости $\Delta C = 0,3...30 \text{ пФ}$. Резистор R28 регулирует дальность обнаружения в пределах от непосредственного касания ($\Delta C = 30 \text{ пФ}$) до нескольких сантиметров ($\Delta C = 0,3 \text{ пФ}$). Одновременно с усилением сигнал фильтруется в диапазоне $0,1...10 \text{ Гц}$, соответствующем вероятным частотам полезных сигналов.

Усиленный и отфильтрованный сигнал поступает на компаратор, выполненный на элементе DA5.2, порог срабатывания которого +3,5 В задается делителем R30, R31. Селектор длительности на конденсаторе C9 и резисторах R32, R33 обеспечивает активацию сигнала тревоги только от тех воздействий, продолжительность которых превышает заданное значение. Пороговая длительность регулируется резистором R33 в пределах $T = 0,69(R32 + R33)C9 = 0,1...5 \text{ с}$. Увеличение напряжения на C9 сверх 3,5 В активирует РТ.

В случае установки АС на улице может меняться не только ее реактивная, но и активная составляющая (рис. 2.17.15, $\Delta R \neq 0$). Это связано с намоканием, изменением проводимости или загрязнением АС и окружающих предметов. Если нет желания регулярно чистить и драить датчики, то необходимо вести постоянный анализ полного импеданса антенны, то есть как амплитуды, так и фазы сигнала с выхода моста. Учет фазы обычно производится с помощью двухканальной обработки. В первом канале выделяется составляющая, синфазная с генерируемым сигналом, а во втором – сдвинутая на $\pi/2$. Если изменение емкости сопровождается изменением проводимости, то налицо воздействие метеофакторов, а отнюдь не нарушителя.

Прикосновение человека – и не только нарушителя – к АС емкостного СО является обычным событием. При этом накопленный на теле электростатический заряд мгновенно поступает внутрь электронной схемы прибора. Кроме того, АС часто имеют большую длину или подсоединяются к БО длинными проводами. Емкостные СО в большей степени, чем СО других типов, необходимо защищать от статических разрядов и различного типа наводок. АС внутреннего СО необходимо хотя бы покрыть лаком или пластиком для изоляции проводящих поверхностей. Внешние СО подвергаются более суровым воздействиям стихии и фауны и требуют более серьезной защиты. Между АС и БО должна быть установлена стандартная трехступенчатая схема грозозащиты. Без нее редкое емкостное СО выдержит более года работы.

Средние показатели уличного варианта емкостного СО составляют: длина участка – 200...500 м; напряжение питания – 20...30 В; потребляемый ток – 20...100 мА; диапазон рабочих температур – от минус 50°C до плюс 50°C; время наработки на ложную тревогу – 200...2000 часов; погонная стоимость – около 150...200 руб./м или 5...7 \$/м. Средние показатели комнатного варианта емкостного СО составляют: емкость охраняемых предметов – до 2000...5000 пФ; чувствительность – до 0,2 м; напряжение питания – 10...30 В; потребляемый ток – 15...80 мА; диапазон рабочих температур – от минус 10...50°C до плюс 50°C; стоимость – 6...30 тыс.руб. или 200...1000 \$ (на 10...20 предметов).

Основные достоинства емкостных СО:

- высокая помехоустойчивость; отсутствие ложных срабатываний при воздействии дождя, снега, ветра;
- равномерная чувствительность вдоль антенной системы; отсутствие мертвых зон;
- возможность регулировки ширины ЗО в пределах от касания до десятков сантиметров;

- произвольная конфигурация помещений или форма ограждения; проводники антенной системы легко соединяют любые охраняемые предметы или отслеживают повороты и перепады высоты забора;
- простота и универсальность в выборе ЧЭ; возможность последовательного подсоединения нескольких охраняемых предметов ко входу одного БО, что удешевляет систему охраны;
- непритязательность к окружающей обстановке; на работу СО, установленного на заборе, не влияет наличие ворот, калиток, канав, трубопроводов;
- возможность организации автоматического контроля работоспособности;
- простота настройки, обслуживания и ремонта;
- безопасность для человека в случае приближения или касания ЧЭ.

Основные недостатки (или особенности) емкостных СО:

- необходимость жесткой фиксации АС; она не должна смещаться более чем на несколько миллиметров (или сантиметров – в зависимости от размеров и конструкции ЧЭ);
- необходимость качественного заземления с сопротивлением растекания не выше 5...10 Ом;
- необходимость надежного электрического соединения токоведущих элементов; при этом следует помнить, что сварка надежнее пайки, пайка надежнее клеммника или соединения под винт, надежность скрутки близка к нулю;
- необходимость очистки пространства вокруг АС от растительности и посторонних предметов;
- возможность срабатывания от крупных животных или стай птиц.

2.18. Индуктивные СО

Если есть емкостные СО, то должны быть и индуктивные. И они действительно существуют, даже несмотря на то, что магнитная проницаемость тела человека почти не отличается от магнитной проницаемости воздуха и большинства окружающих предметов. Антенная система индуктивного СО имеет вид петли из непрерывного провода, например, натянутого между опорами ограждения (рис. 2.18.1). При смещении, раздвижении, обрыве или перекусывании проводов петли ее индуктивность меняется, что фиксируется электронным блоком обработки. В качестве ЧЭ может использоваться обычный изолированный провод (типа полевки), закрепляемый на полотне забора. Но также возможно натянуть между столбами прочную стальную или колючую проволоку, обеспечивая непрерывность петли.

Тогда сам чувствительный элемент будет выполнять роль ограждения. Индуктивные СО имеют ограниченную зону обнаружения и реагируют даже не на касание, а лишь на деформацию ЧЭ.

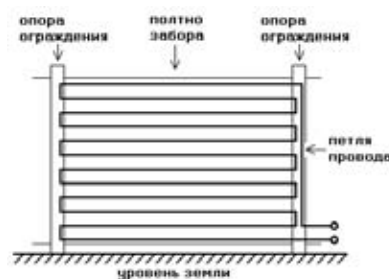


Рис. 2.18.1 ЧЭ индуктивного СО

Индуктивное СО существует не только в линейном, но и в точечном варианте исполнения, — когда петля провода имеет небольшие размеры. Она может закрывать люк, форточку или вентиляционное отверстие. Индуктивные СО эффективно используются и на улице, и внутри помещений. Методы измерения индуктивности в большинстве своем аналогичны рассмотренным ранее методам измерения емкости.

Оценим значения полезных и помеховых сигналов индуктивного СО. Величина индуктивности отдельной двухпроводной прямоугольной петли провода длиной l и шириной a (рис. 2.18.2) может быть найдена непосредственным интегрированием выражения для потока магнитной индукции через контур. Если $l \gg a$, то основной вклад в индукцию B поля внутри петли дают ее горизонтальные участки, поэтому $B = \mu_0 I / (2\pi y) + \mu_0 I / (2\pi(a-y))$, где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м = $1,26 \times 10^{-6}$ Гн/м = 1,26 мкГн/м, I — ток, протекающий по петле. Первое слагаемое представляет собой вклад от нижнего провода, второе — от верхнего. Если провод имеет круговое сечение диаметром d ($d \ll a$), то непосредственно из определения индуктивности L получаем выражение:

$$L = \iint B dx dy / I = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^l dx \int_{d/2}^{a-d/2} dy \left(\frac{1}{y} + \frac{1}{a-y} \right) = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln(2a/d).$$

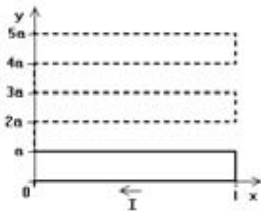


Рис. 2.18.2 К оценке индуктивности

Сверху и снизу от пары проводов, образующих данную отдельную петлю, находятся другие такие же петли (показаны на рис. 2.18.2 пунктиром). Однако их влияние на индуктивность одной петли L несущественно. Действительно, аналогично предыдущему можно получить оценку вклада от проводов, расположенных на расстоянии $2a$ и $3a$. Он составит $\Delta L_{23} = \mu_0 I / (2\pi) \times \ln(3/4)$, то есть на порядок меньше значения L , так как $\ln(3/4)/2 = -0,14$, а $\ln(2a/d) > 3$ (при $a/d > 10$). Вклад следующей петли от проводов, расположенных на расстоянии $4a$ и $5a$ будет равен $\Delta L_{45} = \mu_0 I / (2\pi) \times \ln(15/16)$, что меньше еще на порядок, поскольку $\ln(15/16)/2 = -0,03$. Таким образом, полная индуктивность одной секции ограждения, состоящей из N проводов (или $N/2$ двухпроводных петель) оценивается выражением $L_{\text{CEK}} = \mu_0 I N \ln(2a/d) / (2\pi)$.

Определим величину полезного изменения индуктивности ΔL_{CEK} . Если один из проводов петли смещается на длине $l_{\text{СМЕЩ}}$ почти до полного соприкосновения проводов (рис. 2.18.3), то величина изменения составит $\Delta L_{\text{CEK}} = -\mu_0 I_{\text{СМЕЩ}} \ln(2a/d) / \pi$. При сближении проводов индуктивность уменьшается, но она будет увели-

чиваться при сдвиге в противоположном направлении. Относительное изменение индуктивности $\Delta L_{\text{CEK}} / L_{\text{CEK}} = -2l_{\text{СМЕЩ}} / lN$. Ему можно придать более общий вид, умножив числитель и знаменатель на ширину петли a . Тогда оценка максимального полезного относительного изменения индуктивности будет выглядеть следующим образом $\Delta L_{\text{CEK}} / L_{\text{CEK}} = 2al_{\text{СМЕЩ}} / aI N = \Delta S / S$, где S — площадь охраняемой поверхности, ΔS — площадь проделанного отверстия. Если считать, что для пролаза человека необходимо отверстие размером $0,5 \times 0,3$ м, то минимальное значение ΔS составит $\Delta S = 0,15 \text{ м}^2$. Отсюда следует, что при охране площадей порядка $S = 1 \text{ м}^2$ обеспечиваются высокие отношения $\Delta L_{\text{CEK}} / L_{\text{CEK}}$ около 10%. Принимая минимально допустимое отношение $\Delta L_{\text{CEK}} / L_{\text{CEK}} = 0,01$, получим оценку максимального значения площади одной секции индуктивного СО, $S = \Delta S (L_{\text{CEK}} / \Delta L_{\text{CEK}}) = 15 \text{ м}^2$.

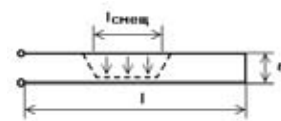


Рис. 2.18.3 Смещение провода петли

Основное помеховое воздействие на улице — ветер, вызывающий смещение проводов, в помещении — их колебания или вибрация. Дифференцируя выражение для индуктивности секции $L_{\text{CEK}} = \mu_0 I N \ln(2a/d) / (2\pi)$ по a (то есть предполагая одновременное и одинаковое смещение всех проводов петли друг относительно друга на величину Δa), получим оценку изменения индуктивности в результате воздействия помехи $\Delta L_{\text{ПОМ}} = \mu_0 I N \Delta a / (2\pi a)$.

Оценим ожидаемые значения индуктивностей. Расстояние между проводами находится в пределах $a = 0,1 \dots 0,12$ м, так как меньшие значения увеличивают расход провода, а большие — позволяют нарушителю пролезть незамеченным, найдя место провисания проводов. Длина секции ограждения $l = 2 \dots 5$ м, число нитей $N = 16 \dots 22$ перекрывает высоту около двух метров, а площадь секции составляет $S = 4 \dots 10 \text{ м}^2$. Диаметр провода примерно равен $d = 2$ мм, более тонкий не обеспечивает прочности, более толстый — утяжеляет и удорожает конструкцию. Тогда индуктивность одной секции ограждения $L_{\text{CEK}} = \mu_0 I N \ln(2a/d) / (2\pi) = 30 \dots 100$ мкГн. Полезное относительное изменение индуктивности $\Delta L_{\text{CEK}} / L_{\text{CEK}} = \Delta S / S = 0,015 \dots 0,04$, а его абсолютная величина $\Delta L_{\text{CEK}} = 1 \dots 1,5$ мкГн. Помеховое изменение при $\Delta a = 0,001$ м (что соответствует смещению крайнего провода во время сильного ветра на $N \Delta a = 0,02$ м) может достигать $\Delta L_{\text{ПОМ}} = \mu_0 I N \Delta a / (2\pi a) = 0,2$ мкГн. Погонное сопротивление провода находится в пределах $\sigma = 0,01 \dots 0,1$ Ом/м (медь, алюминий, сталь и т.п.), поэтому активное сопротивление секции оценивается величиной $R = lN\sigma = 0,3 \dots 10$ Ом.

Стальной провод обладает высоким значением относительной магнитной проницаемости μ , которое может достигать $\mu = 500 \dots 1000$, а следовательно — дополнительной внутренней индуктивности провода, которая пропорциональна его длине $L_{\text{ПРОВ}} = \mu_0 \mu I N \xi(f) /$

(8π). Внутренняя индуктивность добавляется к внешней, а выражение для индуктивности секции из стального провода приобретает вид $L_{\text{СЕК}} = \mu_0 N / (2\pi) \times (\ln(2a/d) + \mu\zeta(f)/4)$, где f – частота, на которой проводятся измерения, $\zeta(f)$ – безразмерная функция, которая имеет сложный вид. Она зависит от магнитной проницаемости, проводимости, диаметра провода и частоты; на низких частотах она равна $\zeta(0) = 1$, на высоких – $\zeta(\infty) = 0$. При этом величина μ , входящая в выражение для $L_{\text{СЕК}}$, также зависит от f . Первое слагаемое в скобках $\ln(2a/d) = 4...5$, второе на низких частотах – $\mu\zeta(0)/4 = 125...250$. Начальное значение индуктивности секции из стального провода может в несколько десятков раз превышать значение индуктивности для медного или алюминиевого провода. При этом относительное полезное изменение индуктивности $\Delta L_{\text{СЕК}} / L_{\text{СЕК}}$ остается на прежнем уровне. На высоких частотах величина индуктивности не зависит от материала провода. Некоторое представление о том, какие частоты считать низкими, а какие – высокими, дает таблица 2.18.1, в которой приведены расчетные значения функции $\zeta(f)$ в зависимости от частоты f для провода диаметром $d = 2$ мм из мягкой стали (удельное сопротивление $\rho = 15 \times 10^{-8}$ Ом \times м, $\mu = 700$, влияние частоты на μ не учитывалось). Электрические и магнитные свойства различных сортов стали меняются в широких пределах и не отличаются стабильностью, тем не менее на частотах до десятков килогерц магнитную проницаемость материала провода необходимо учитывать.

Индуктивность петли невелика, даже если ее площадь составляет десятки квадратных метров. Чтобы измерить индуктивность L порядка 10...100 мкГн, желательно подать на нее переменное напряжение частотой f не менее 10...100 кГц. Тогда индуктивная составляющая импеданса $Z = 2\pi fL > 6$ Ом не потеряется на фоне активной составляющей.

Влияние земли на индуктивность секции в основном несущественно. Если приблизить землю (или другую проводящую поверхность) к отдельной двухпроводной петле на расстояние h , то индуктивность петли уменьшится на величину $\Delta L_{\text{ЗЕМ}} = -\mu_0 l / (2\pi) \times \ln(1 + a^2/4h^2)$. Сравнивая сомножители $\ln(2a/d) = 4...5$ и $\ln(1 + a^2/4h^2)/2$, можно сказать, что при условии $h > 2a$ наличие земли уменьшает индуктивность нижней петли менее, чем на одну сотую, а всей секции – менее, чем на одну тысячную и будет на порядок меньше полезного изменения. Если проводящая поверхность, например, крона крупного дерева во время дождя, располагается параллельно полотну забора, то ее колебания под действием ветра будут менять индуктивность в тех же пределах $\Delta L_{\text{ЗЕМ}} = -\mu_0 l / (2\pi) \times \ln(1 + a^2/4h^2)$, где величина h будет представлять собой расстояние до проводящей поверхности листьев. В данной ситуации смещение кроны дерева воздействует одновременно на все петли секции, а относительное изменение индуктивности в пределах 0,001 обеспечивается при выполнении усло-

вия $\ln(1 + a^2/4h^2) / 2\ln(2a/d) = a^2/32h^2 < 0,001$ или $h > 6a = 0,6$ м. Установив секцию ограждения на кирпичный или бетонный цоколь высотой не менее 20 см, а также отдалив ЧЭ от крупных подвижных проводящих или намакающих предметов, идущих вдоль плоскости полотна ограждения, более чем на 0,6 м, можно не беспокоиться о помехах, вызываемых колебаниями или перемещениями, связанными с изменением расстояния h .

Очевидно, что в случае с землей или кроной деревьев речь идет не о добавке к индуктивности, как таковой, а о возможности ее быстрого появления или исчезновения. Стабильная добавка не страшна, даже когда она сравнима по величине с индуктивностью секции. Проблема связана с тем, что параметры земли и окружающих предметов меняются со временем. После начала дождя, выпадения росы или таяния снега сухие предметы намакают, а проводящие поверхности меняют свое положение, приближаясь к полотну забора.

Полотно забора – не единственное место, где может быть полезно индуктивное СО. Любой проем, люк, шахта без особых затрат оборудуется проволочной сеткой, способной реагировать на ее незначительные смещения. Индуктивное СО с чувствительным элементом в виде готового листа пластика с наклеенной или запрессованной петлей провода может защитить дверь от пролома или участок стены от разрушения. Провод легко вмонтировать в имеющиеся вентиляционные решетки или канализационные люки. Здесь индуктивное СО особенно эффективно в связи с большим отношением $\Delta S/S$. Еще одно интересное применение – оперативная охрана мест временного размещения груза при его перевозке. Багаж туристов после их выхода из автобуса перед устройством в гостинице складывается в холле и накрывается сеткой индуктивного СО, сигнализирующей о любой попытке снять или изменить ее положение. Для предварительных оценок индуктивности ЧЭ, имеющего вид петли произвольной формы, будет полезна формула $L = \mu_0 I_{\text{КОНТ}} (\ln(4S/dI_{\text{КОНТ}}) - \phi) / 2\pi$, где $I_{\text{КОНТ}}$ – периметр контура, S – его площадь, d – диаметр провода, ϕ – форм-фактор, определяемый формой контура и не зависящий от его размеров, его значение в среднем можно принять равным $\phi = 0,15$.

Не надо напоминать о том, что блок обработки (БО) индуктивного СО контролирует не только изменение индуктивности ΔL , но и целостность самого провода, то есть активирует сигнал тревоги в случае обрыва ЧЭ. Более того, БО может фиксировать еще и уменьшение активного сопротивления R на величину ΔR сверх определенного уровня, свидетельствующее о замыкании проводов петли. Очевидно, что замыкание двух соседних проводов (рис. 2.18.1) приводит к уменьшению сопротивления на величину до $\Delta R = 2R/N$. Грех не воспользоваться информацией, которая сама плывет к нам в руки. Возникает естественный вопрос, а нужно ли вообще контролировать величину индуктивности?

Таблица 2.18.1 Значения функции $\zeta(f)$ в зависимости от частоты f

f	0 Гц	100 Гц	1 кГц	10 кГц	100 кГц	1 МГц	10 МГц	100 МГц
$\zeta(f)$	1	0,97	0,46	0,15	0,047	0,015	0,005	0,001

Нужно. Потому что, во-первых, величина ΔR зависит от места замыкания и может быть незаметной на фоне малых значений R , особенно с учетом сопротивления самого контакта. Во-вторых, величина ΔL пропорциональна площади отверстия. Порог срабатывания может быть настроен на объект определенного размера. Нарушителю не поможет установка проволочных переключек перед перекусыванием проводов.

Способ установки провода «змейкой» (рис. 2.18.1) отличается простотой и обеспечивает быстрый монтаж. Но он не является единственным, и уж тем более – самым лучшим по всем возможным параметрам. Спиральный вариант установки петли (рис. 2.18.4) дает максимальное значение начальной индуктивности L и наибольшую чувствительность в центральной части ограждения, так как здесь векторы индукции магнитного поля всех токов суммируются. Правда по этой же причине секция провода имеет неравномерную по высоте чувствительность.

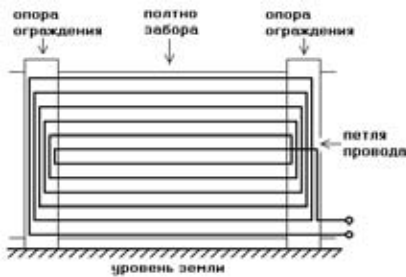


Рис. 2.18.4 Спиральная петля

Бифилярный встречный вариант размещения провода (рис. 2.18.5) обеспечивает повышенную скорость монтажа, так как провода устанавливаются сразу парой. Бифилярный согласный способ установки (рис. 2.18.6) дает почти такую же скорость. Провода вновь закрепляются парой, а затем устанавливается переключка, соединяющая конец одного провода с началом второго. На это теряется некоторое время, однако выгода оказывается весьма существенной. При замыкании двух соседних проводов (любых!) активное сопротивление петли уменьшается почти ровно вдвое. Чувствительность по данному показателю оказывается максимально возможной и равномерной по всему полотну забора. Если переключку заменить стабильной индуктивностью, то и изменение ΔL при замыкании двух соседних проводов будет не меньше. Установка на



Рис. 2.18.5 Бифилярная встречная петля

месте переключки другого пассивного элемента (резистора, конденсатора) еще более расширяет возможности петли и индуктивного СО в целом. Количество различных способов монтажа петли провода не ограничивается приведенными четырьмя. Их гораздо больше, и выбор конкретного способа во многом зависит от поставленной задачи.

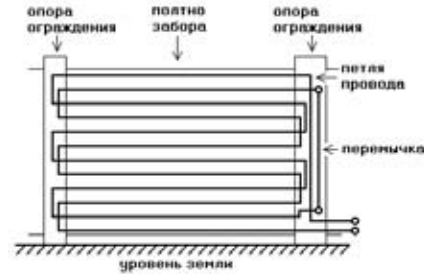


Рис. 2.18.6 Бифилярная согласная петля

Способы измерения индуктивности полностью аналогичны способам измерения емкости (п. 2.17). В диапазоне $\Delta L_{CEK} / L_{CEK} = 0,001...0,01$ наиболее подходят мостовые методы. Индуктивные мосты несколько отличаются от емкостных, поскольку изготовление и применение переменных (или подборных) индуктивностей вызывает значительные сложности. В случае малой добротности Q измеряемой индуктивности L_x , то есть при выполнении условия $Q = \omega L_x / R_x < 30$, где ω – круговая частота сигнала генератора, R_x – активная составляющая индуктивности, мост уравнивается параллельно соединенными резистором R_3 и конденсатором C_3 (рис. 2.18.7а). Условия равновесия моста определяются из очевидного соотношения $(j\omega L_x + R_x) / R_1 = R_2 \times (1/R_3 + j\omega C_3)$. Они преобразуются к виду $L_x = C_3 R_1 R_2$, $R_x = R_1 R_2 / R_3$. Условия равновесия не зависят от частоты генератора.

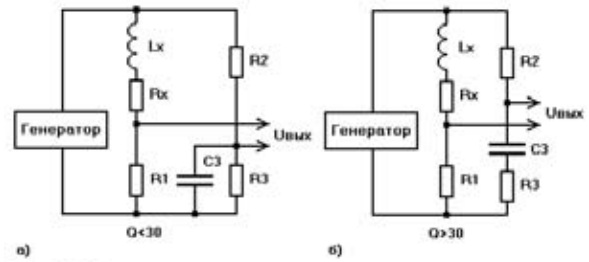


Рис. 2.18.7 Мостовая схема измерения индуктивности

В случае большой добротности $Q > 30$ мост уравнивается последовательно соединенными резистором R_3 и конденсатором C_3 (рис. 2.18.7б). Условия равновесия в данном случае определяются из соотношения $(j\omega L_x + R_x) / R_1 = R_2 / (R_3 + 1/(j\omega C_3))$ и принимают вид $L_x = R_1 R_2 C_3 / (1 + (\omega R_3 C_3)^2)$, $R_x = \omega^2 C_3^2 R_1 R_2 R_3 / (1 + (\omega R_3 C_3)^2)$. Они зависят от частоты ω , поэтому в данном случае должны предъявляться повышенные требования к синусоидальности генерируемого сигнала и к стабильности его частоты.

В лабораторной практике равновесие устанавливается подбором значений R_1 , R_2 , R_3 . На частотах $f = \omega/2\pi = 100 \dots 1000$ Гц удается достигнуть абсолютной погрешности измерений до $0,1$ мкГн и относительной – до $0,001 \dots 0,0001$. Индуктивное СО может быть реализовано аналогично схеме емкостного СО (рис. 2.17.14) с небольшими изменениями.

Основные достоинства индуктивных СО:

- невосприимчивость к многим помеховым факторам, таким как дождь, снег, туман, наличие травы или снежного покрова, поскольку они не влияют на величину индуктивности датчика; отсутствие ложных срабатываний при воздействии вибрации и колебаний ЧЭ, не сопровождающихся изменением его формы и размеров; узкая зона чувствительности;
- срабатывание при любой скорости раздвижения нитей проволочной петли; для активации сигнала тревоги важна величина абсолютного изменения индуктивности и не имеет значения, за какой интервал времени оно произошло;
- почти полное отсутствие влияния земли; индуктивные СО не требуют качественного заземления;
- постоянный автоматический контроль целостности проводного ЧЭ;
- возможность охраны больших площадей поверхности; по сравнению с электрообрывными СО индуктивные СО срабатывают и при отсутствии повреждения ЧЭ, а также при попытке установки проволочной перемычки;
- возможность использования индуктивных СО в качестве противоподкопных датчиков при за-

глублении петли изолированного провода в грунт; по сравнению с другими противоподкопными СО обеспечивается больший срок службы, так как провод индуктивного СО прочнее и менее восприимчив к влаге, повреждениям изоляции и т.п.;

- простота и дешевизна ЧЭ и электронного блока обработки;
- высокая скорость монтажа, необходимость минимальной регулировки устройства и, как следствие, низкая стоимость установки СО;
- почти полное отсутствие необходимых работ по поддержанию работоспособности; простота ремонта ЧЭ в случае повреждения.

Основные недостатки индуктивных СО:

- ограниченность ЗО; срабатывание только при непосредственном воздействии на ЧЭ;
- необходимость фиксации малых изменений индуктивности;
- возможность ложного срабатывания от разветвленных деревьев во время дождя с ветром;
- необходимость оборудования протяженных проводных линий устройствами грозозащиты, особенно при размещении СО на улице;
- повышенные требования к тщательности монтажа; необходимость жесткого крепления проволочной петли без провисания; неизолированный провод крепится через изоляторы; заданная последовательность подсоединения отдельных нитей не должна быть нарушена; ошибочное подсоединение, допущенное во время монтажа, с трудом обнаруживается визуально.

2.19. Проводно-волновые СО

Проводно-волновое СО состоит из предающего блока (ПРД), двухпроводной линии и приемного блока (ПРМ), совмещенного с блоком обработки (БО). Линия подсоединяется с одной стороны к передатчику электромагнитного излучения, а с другой – к приемнику (рис. 2.19.1). ЗО формируется вокруг проводов данной линии. СО работает на частотах диапазона УКВ порядка 100 МГц. Провода линии располагаются параллельно на расстоянии $a = 0,4 \dots 1,8$ м друг от друга и образуют так называемую открытую антенну. Длина проводов может достигать $200 \dots 250$ м.

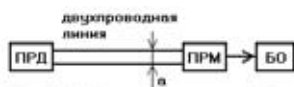


Рис. 2.19.1 Проводно-волновое СО

Оба провода, формирующие ЗО, однотипны, но не равнозначны. Один из них, обычно размещаемый сверху и называемый горячим или верхним проводом (ВП),

соединяет выход передатчика со входом приемника, другой провод, размещаемый внизу и называемый холодным или нижним проводом (НП), выполняет роль общего. В случае приближения к антенне человека (или другого массивного проводящего объекта) меняются параметры принимаемого излучения, что фиксируется блоком обработки.

Проводно-волновое СО называется также проводно-радиоволновым, проводноволновым, радиоволновым проводным или просто радиоволновым извещателем или датчиком. Это сравнительно новый тип СО, находящийся в стадии интенсивного развития. Проводно-волновые СО могут быть как линейными, так и точечными. Линейные являются преимущественно внешними и применяются для охраны протяженных рубежей. Точечные используются в основном внутри помещений для обнаружения приближения человека к отдельным охраняемым предметам.

Протяженные проводно-волновые СО используются в двух конструктивных вариантах – козырьковым и

приземном. В козырьковом варианте антенная система (АС) устанавливается в верхней части ограждения через изолирующие кронштейны (консоли), удерживающие провода на небольшом расстоянии от полотна забора (рис. 2.19.2). Расстояние между проводами соответствует размерам объекта обнаружения и составляет $a = 0,4 \dots 1$ м. Кронштейны монтируются с шагом $3 \dots 8$ м. Небольшое провисание проводов не влияет на обнаружительную способность СО, а расстояние между точками крепления зависит в основном от соотношения прочности провода и ожидаемой силы ветра в месте установки. Зона обнаружения занимает объем радиусом около $b = 0,2 \dots 0,5$ м вокруг проводов ЧЭ, полностью перекрывая промежуток между ними. Для правильного формирования зоны важно проконтролировать, чтобы на расстоянии менее a от верхнего провода не было никаких проводящих предметов. В противном случае ЗО «растекается» вдоль этого проводника. Обычно используемые провода – недорогие изолированные типов П-274, П-279 или подобные. Угол наклона козырька может быть произвольным, козырек может располагаться горизонтально, вертикально или наклонно.

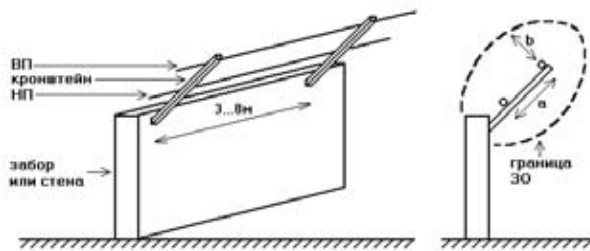


Рис. 2.19.2 Козырьковый вариант

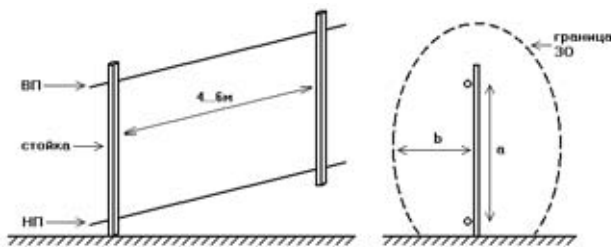


Рис. 2.19.3 Приземный вариант

В приземном варианте верхний и нижний провод закрепляются на специальных стойках, изготовленных из изоляционного материала, например, стеклопластика (рис. 2.19.3). Нижний провод может лежать на земле, висеть на стойке на высоте $0,1 \dots 0,2$ м или находиться в земле на глубине $0,1 \dots 0,2$ м. Расстояние между проводами лежит в пределах $a = 0,5 \dots 1,8$ м. Стойки устанавливаются через $4 \dots 6$ м. Данный вариант монтажа позволяет быстро развернуть мобильное СО вокруг места временной стоянки. Зона обнаружения занимает пространство в пределах радиуса $b = 0,2 \dots 0,5$ м от верхнего провода и $b = 0,5 \dots 1,5$ м от нижнего. Здесь проявляется упоминавшийся ранее эффект растекания вокруг проводящей поверхности, в данном случае – поверхности земли; чем ближе к ней нижний провод, тем шире нижняя часть ЗО.

Проводно-волновое СО по принципу сигналообразования имеет определенное сходство с емкостным СО. Его ЗО формируется между ВП и НП; попадание проводящего предмета в пространство между проводами изменяет связь между ними. Многие закономерности и помеховые факторы, характерные для емкостных СО, сохраняются и для проводно-волновых. Однако, в принцип обнаружения вносится много нового. Высокая частота зондирующего сигнала способствует установлению стоячих волн. Их положение весьма чувствительно к проводящим свойствам окружающих предметов. Рабочая частота генерируемых электромагнитных колебаний выбирается таким образом, чтобы обеспечить наибольшее их взаимодействие с обнаруживаемым объектом. Принимая характерный размер человека равным $l = 0,5 \dots 1,5$ м (поперек или вдоль) и приравнивая его к четверти длины волны излучения (расстояние между соседними узлами и пучностями в стоячей волне), получим выражение $c/4f = l$, где c – скорость света, $c = 3 \times 10^8$ м/с, f – частота излучения. Отсюда $f = c/4l = 50 \dots 150$ МГц. Предметы, размеры которых существенно меньше принятого значения l , (мелкие животные, птицы, ветки, переносимый ветром мусор и т.п.) не будут оказывать на распространение электромагнитных колебаний существенного влияния. Волновой характер взаимодействия излучения с человеком проявляется в том, что амплитуда принимаемого сигнала может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от установившейся в данный момент картины узлов и пучностей в проводах антенны и от места взаимодействия (в отличие от емкостного СО, где приращение емкости всегда положительно). Изменение амплитуды принимаемых колебаний является основным, хотя и не единственным признаком, по которому формируется сигнал тревоги.

Непрерывное излучение электромагнитных волн требует большого расхода энергии. Поэтому целесообразно организовать импульсный режим работы передатчика. Количество периодов в излучаемом импульсе должно значительно превосходить значения добротностей цепей передатчика и приемника, иначе полезная информация будет потеряна на фоне переходных процессов. При добротности порядка 100 необходимо, чтобы импульс содержал не менее 1000 периодов (частотой 100 МГц), то есть длительность импульса должна быть не менее 10 мкс. Если частота следования импульсов будет слишком малой, то мы можем пропустить важную информацию, попавшую в промежуток между ними. При максимальной скорости движения нарушителя 10 м/с и минимальном размере ЗО $0,4$ м продолжительность полезного сигнала составляет всего лишь $0,4/10 = 0,04$ с. Поэтому время между импульсами следует выбрать не более $0,004$ с, что соответствует частоте следования импульсов 250 Гц. Получаемая скважность $(0,004 \text{ с} / 10 \text{ мкс}) = 400$ определяет максимально достижимый выигрыш в мощности, расходуемой на излучение, при переходе на импульсный режим работы. Выигрыш вполне оправдывает те небольшие усложнения схемы, которые потребуются для его реализации. Кроме того, во столько же раз повышается надежность ап-

паратуры, так как все элементы работают в ослабленных режимах нагрузки. Еще одно существенное преимущество импульсного режима работы, которое часто используется при реализации проводно-волновых СО, заключается в возможности подавать питание от ПРМ к ПРД по проводам АС в паузах работы передатчика. Экономия пары проводов (длиной, равной длине участка) – это не только удешевление СО, но также упрощение и ускорение процесса монтажа.

Чтобы организовать охрану рубежа большой длины несколькими однотипными СО, необходимо, чтобы они работали либо на различных частотах, либо в импульсном режиме, выходя в эфир поочередно за счет взаимной синхронизации передатчиков. Однако, для проводно-волновых СО проще воспользоваться ограниченным размером ЗО и, взяв одинаковые СО, расположить рядом друг с другом поочередно их приемники и передатчики (рис. 2.19.4).



Рис. 2.19.4 Размещение нескольких СО в одну линию

Продолжая аналогию с емкостными СО, можно предложить два варианта реализации проводно-волнового СО. В первом (основном) варианте электромагнитная энергия, распространяющаяся вдоль излучающего провода (ВП), шунтируется проводящим телом человека на общий провод (НП), идущий параллельно излучающему. Расстояние между проводами должно соответствовать размеру ОО. Такой вариант реализуется наиболее просто, например, в соответствии с блок-схемой, изображенной на рис. 2.19.5. Генератор высокочастотных колебаний (ГВЧ, около 100 МГц) управляется генератором прямоугольных импульсов (ГИ) длительностью 10...40 мкс, следующих с частотой 250...500 Гц. После усилителя (У) излучение подается в двухпроводную антенную систему. Принятый импульс проходит полосовой фильтр (ПФ), отсеивающий многочисленные помеховые сигналы и наводки на частотах, отличающихся от частоты передатчика. Детектор огибающей (ДО) выделяет из последовательности импульсов переменной амплитуды их огибающую. В дежурном режиме на выходе ДО постоянный сигнал, при появлении ОО его уровень меняется, что обнаруживает компаратор (К). Накопитель (Н) ведет подсчет количества срабатываний компаратора и при достижении заданного их числа инициирует РТ.

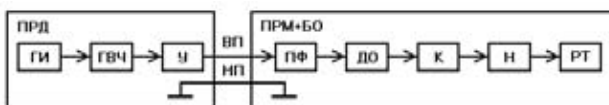


Рис. 2.19.5 Блок-схема проводно-волнового СО

Во втором варианте электромагнитная энергия из излучающего провода наводится через тело приближающегося человека в другой – приемный – провод, также проходящий параллельно излучающему. Сигнал из приемного провода усиливается и подвергается анализу на предмет появления в нем изменений. Расстояние между

проводами должно несколько превосходить размеры ОО. Подобная идея находит реализацию в средствах обнаружения, называемых линией вытекающей волны (ЛВВ). Благодаря сходству принципов действия проводно-волновых СО и ЛВВ иногда их объединяют в одну группу, называя и те и другие проводно-волновыми.

Достоинства проводно-волновых СО состоят в следующем:

- возможность формирования ЗО произвольной формы; рубеж охраны может быть непрямолинейным; ЗО следует за проводами ЧЭ, повторяя их изгибы, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости;
- ограниченность ЗО; проводно-волновые СО нечувствительны к перемещению людей и транспорта на расстояниях более 1,5...2 м;
- отсутствие ложных срабатываний от мелких животных;
- равномерность ЗО вдоль линии охраны;
- отсутствие специальных требований к проводам ЧЭ; их дешевизна;
- высокая помехоустойчивость к осадкам; при соблюдении правил монтажа – отсутствие срабатываний при воздействии ветра; невосприимчивость к снежному или травяному покрову;
- сигнализация в случае обрыва одного из проводов линии;
- простота монтажа; высокая скорость утановки СО;
- низкие затраты на обслуживание;
- легкость ремонта; в случае повреждения проводов антенной системы дефектный участок провода удаляется, а на его место устанавливается недостающий отрезок провода.

Недостатки проводно-волновых СО заключаются в следующем:

- низкая помехоустойчивость в городской черте в условиях сильных электромагнитных помех: промышленного производства, автотранспорта, работающих электродвигателей, ЛЭП;
- необходимость очистки ЗО от кустов и веток деревьев; качающаяся мокрая крона может вызывать ложные срабатывания;
- сложность монтажа СО на воротах;
- каждый излом участка увеличивает потери излучения в окружающее пространство и поэтому сокращает допустимую длину участка на величину до десяти процентов; то же самое относится и к проводящим предметам, находящимся ближе 1 м от ВП;
- СО требует заземления с сопротивлением растекания не менее 30...300 Ом.

Средние показатели и характеристики проводно-волнового СО: длина рубежа – до 200...250 м (при большом количестве изгибов сокращается до 100 м); вероятность обнаружения – 0,98; время наработки на ложную тревогу – 1000 часов; напряжение питания – 10...30 В; потребляемый ток – 40...70 мА; диапазон рабочих температур – от минус 50°С до плюс 50°С; погонная стоимость – 60...450 руб/м (2...15 \$/м).

2.20. Линия вытекающей волны

Принцип действия СО, называемого линией вытекающей волны (ЛВВ), основан на передаче электромагнитного излучения в окружающее пространство, приеме излучения после его взаимодействия с близлежащими предметами и выявлении в нем изменений, вызванных появлением нарушителя. Отличительной особенностью ЛВВ является использование для излучения и приема специального кабеля. ЛВВ состоит из передатчика (ПРД), приемника (ПРМ), оконечного устройства (ОУ), блока обработки (БО) и двух однопроводных кабелей, один из которых служит распределенной излучающей антенной, а другой – приемной (рис. 2.20.1). Кабели располагаются параллельно друг другу на расстоянии около $a = 2$ м и имеют длину до 150 м.

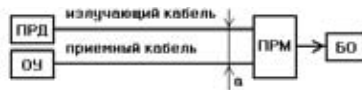


Рис. 2.20.1 Линия вытекающей волны

ЛВВ называется также линией истекающей волны (ЛИВ), а ее кабель – перфорированным коаксиальным кабелем или кабелем вытекающей волны (КВВ). Иногда ЛВВ относят к проводно-волновым СО, с которыми у них имеется много общего. Также можно встретить название радиотехнические кабельные СО. ЛВВ является активным линейным СО. Оно используется на улице для охраны протяженных участков ограждения или свободного пространства. ЛВВ может работать в непрерывном или в импульсном режиме. Непрерывному режиму сопутствует повышенное энергопотребление и текущие расходы, импульсному – более сложный алгоритм обработки и повышенная начальная стоимость аппаратуры.

Передатчик генерирует и направляет в излучающий кабель электромагнитные колебания частотой 40...60 МГц. Соответствующая длина волны составляет около 6 м и выбрана таким образом, чтобы $1/4$ от нее (1,5 м) была сопоставима с характерным размером человека. Благодаря этому СО все еще реагирует на человека, но оказывается невосприимчивым к объектам меньших размеров (животным и птицам). Основная часть энергии генерируемого сигнала излучается в окружающее пространство. Небольшая часть поступает через излучающий кабель на приемник в качестве опорного сигнала.

Кабель (излучающий и приемный) является коаксиальным. Он содержит внутреннюю жилу и внешний экран, разделенные слоем диэлектрика (рис. 2.20.2). Равномерное излучение (и прием) электромагнитных волн обеспечивается благодаря прорезям (перфорации), сделанным в экране через равные расстояния. Такой кабель изначально прокладывался вдоль железных дорог (за рубежом), где он обеспечивал устойчивую радиосвязь с подвижными объектами.

Вышедшее из передающего кабеля излучение, отражаясь от окружающих предметов, поступает в приемный кабель и далее – в блок ПРМ. Оконечное устройство ОУ представляет собой согласованную нагруз-



Рис. 2.20.2 Кабель ЛВВ

ку, необходимую для подавления отражений в длинной линии и установления режима бегущей волны. ОУ также служит для контроля целостности приемного кабеля. Отсутствие повреждений излучающего кабеля контролируется по наличию сигнала передатчика на выходе кабеля. Распространяясь вдоль кабеля, излучение ослабевает. Установка передатчика и приемника на противоположных концах кабелей выравнивает чувствительность вдоль длины участка.

ЛВВ применяется в двух основных вариантах: в грунте и на ограждении. При размещении в грунте (рис. 2.20.3) передающий и приемный кабель закапываются на глубину 0,1...0,2 м (штык лопаты). Оба кабеля располагаются параллельно на расстоянии $a = 1...3$ м друг от друга. Тогда ЗО следует вдоль кабелей, она имеет высоту $h = 1...1,5$ м и ширину, на 1 м превосходящую расстояние между кабелями (по 0,5 м в каждую из сторон). СО в данном варианте полностью маскируемое.

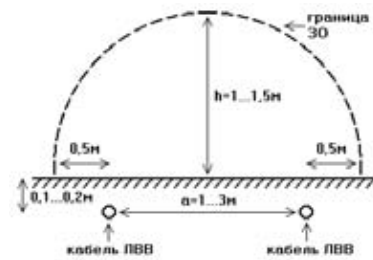


Рис. 2.20.3 Размещение ЛВВ в грунте



Рис. 2.20.4 Размещение ЛВВ на ограждении

Другой вариант размещения кабелей – на ограждении (рис. 2.20.4). В этом случае кабели закрепляются горизонтально на полотне забора на расстоянии $a = 1,5$ м друг от друга (один выше, другой ниже), а ЗО имеет высоту 2,5 м и ширину 1,5 м со стороны установки кабелей. СО размещается на неметаллическом заборе, так что ЗО выходит на его противоположную сторону на те же 1,5 м.

Принятое излучение поступает на блок ПРМ, где выделяются его амплитудные и фазовые (по сравнению с опорным сигналом генератора) изменения. Все изменения анализируются блоком обработки, который в случае превышения ими заданных пороговых значений формирует сигнал тревоги. Основными параметрами для активации срабатывания являются изменение амплитуды принимаемого сигнала и длительность изменения. Амплитуда пропорциональна размерам появившегося в ЗО объекта (точнее – его эффективной площади рассеяния – ЭПР), а длительность – обратно пропорциональна его скорости. Селекции по размерам и скорости вполне достаточно для достижения высокой помехоустойчивости. Учет фазовых изменений служит для выравнивания чувствительности СО вдоль кабелей; в ряде ЛВВ они не используются, и тогда передающий кабель может подсоединяться только к генератору, а приемный – только к приемнику и БО.

Принцип действия ЛВВ поясняет его блок-схема (рис. 2.20.5). Передатчик (ПРД) содержит высокочастотный генератор (ГВЧ) и усилитель (У1). На его выходе – непрерывный периодический сигнал с частотой около 50 МГц, подаваемый в излучающий кабель. По мере прохождения кабеля электромагнитные волны проникают через прорезы в окружающее пространство. Отражаясь от окружающих предметов, испытывая амплитудные и фазовые изменения, излучение поступает в приемный кабель и далее в блок ПРМ. Усиленный сигнал с излучающего кабеля (выход У2) используется в качестве опорного. Усиленный сигнал с приемного кабеля (выход У3) содержит информацию об изменениях, происходящих вокруг кабелей. Он подается на множитель (ПМ), выделяющий синфазную составляющую. После прохождения интегратора (ИН) или фильтра нижних частот формируется сигнал огибающей, изменения которой сравниваются с заданным порогом в компараторе (К). Накопитель (Н) импульсов срабатывания компаратора повышает помехоустойчивость СО. Реле тревоги (РТ) активирует сигнал тревоги при превышении количеством импульсов определенного порогового значения. Детектор с интегратором (Д+ИН) выделяют огибающую опорного сигнала, инициируя сигнал тревоги в случае ее провала (вызванного обрывом излучающего кабеля или неисправностью ПРД).

В составе ЛВВ бывает не два, а три кабеля. Возможна установка пары приемных кабелей, располагаемых по разные стороны от центрального передающего. Это повышает помехоустойчивость от импульсных наводок, одновременно воздействующих на оба приемных канала, а также позволяет определять направление движения нарушителя.

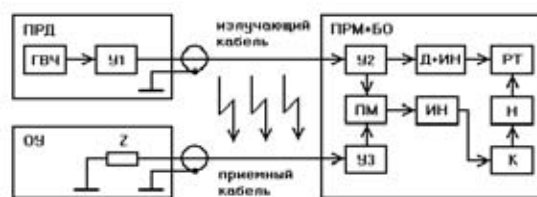


Рис. 2.20.5 Блок-схема ЛВВ

Главные источники помех ЛВВ – все то, что производит, отклоняет или отражает электромагнитное излучение в диапазоне 50 МГц:

- движущиеся крупные проводящие предметы; к ним относятся подвижные металлические заборы, транспорт на автомобильных дорогах с интенсивным движением, проточная вода, небольшие реки, ручьи, водопровод, канализация, деревья с пышной кроной в дождливую ветреную погоду; чем больше площадь отражающей поверхности предмета, тем дальше может ощущаться его влияние;
- источники сильного электромагнитного излучения (ЭМИ); радиостанции диапазона УКВ;
- крупные животные.

Основные достоинства ЛВВ:

- высокая помехоустойчивость; излучение с большой длиной волны имеет слабое затухание по сравнению с миллиметровым или ИК излучением; оно не ослабевает во время дождя, снегопада, тумана; его распространению не мешают трава, снежный покров или мелкий кустарник;
- охрана непрямолинейных участков произвольной формы;
- полная визуальная маскируемость;
- уверенное обнаружение ползущего нарушителя благодаря близости траектории его движения к закопанным кабелям; высокая вероятность обнаружения при использовании в качестве противоподкопного средства;
- чувствительные кабели могут быть установлены в землю, под асфальт или бетон в связи со слабым затуханием излучения в данных средах; при необходимости глубина закапывания может быть увеличена до 0,5...0,6 м.

Основные недостатки ЛВВ:

- снижение чувствительности при высоте снежного покрова более 0,5...1 м в связи с подъемом траектории нарушителя вверх от закопанных в земле кабелей;
- искажение ЗО близлежащими неподвижными проводящими предметами, решетками, стальными листами, трубами, лужами; возможность возникновения вблизи от них мертвых зон или участков пониженной чувствительности;
- высокая стоимость.

Характеристики среднего СО на основе ЛВВ: длина участка – 100...150 м; вероятность обнаружения – 0,95...0,98; напряжение питания – 10...30 В; потребляемый ток – от 30 до 700 мА; диапазон рабочих температур – от минус 50°C до плюс 50°C; погонная стоимость – 2000...4000 руб/м (70...130 \$/м).

2.21. Антенные СО

Основу антенного СО составляет обычный УКВ-приемник не слишком высокого качества. Для улучшения работы в качестве СО он не содержит цепей автоматической подстройки частоты (АПЧ) и автоматической регулировки усиления (АРУ). Приемник настраивается на частоту одной из местных УКВ-радиостанций диапазона 100 МГц (длина волны $\lambda = 3$ м). Отражаясь от различных предметов (в том числе, и от людей), электромагнитные колебания образуют сложную суперпозицию бегущих и стоячих волн. Приближение человека к антенне меняет установившуюся картину стоячих волн. Сместившись на четверть длины волны (около $l = \lambda/4 = 0,75$ м), человек превращает узел (в точке размещения антенны) в пучность или наоборот. В результате амплитуда несущей радиосигнала испытывает небольшие изменения, фиксируя и накапливая которые можно сформировать сигнал тревоги.

Антенное СО относится к пассивным средствам. Оно не производит излучения в окружающее пространство. Антенное СО является точечным внутренним и используется для охраны отдельных предметов, находящихся в помещениях. Более того, оно является городским, так как требует для работы наличия какой-либо круглосуточной радиостанции.

Если человек смещается на 2l в направлении антенны, то несущая радиосигнала претерпевает полный период изменения амплитуды. Диапазону скоростей передвижения $v = 0,1 \dots 10$ м/с соответствует модуляция несущей с частотой $f = v/2l = 0,07 \dots 7$ Гц. В связи с этим

блок-схема антенного СО имеет следующий вид (рис. 2.21.1). Приемник (ПРМ) диапазона 100 МГц подает усиленный сигнал с антенны на амплитудный (не частотный) детектор (АД). Полосовой фильтр (ПФ) выделяет низкочастотную составляющую в полосе 0,05...10 Гц. Далее идет стандартная цепочка из компаратора (К), накопителя (Н) и реле тревоги (РТ).

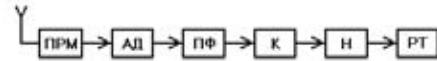


Рис. 2.21.1 Блок-схема антенного СО

Основной недостаток антенного СО – нестабильность его параметров. Используемая радиостанция может увеличить или уменьшить мощность излучения, выйти на профилактический ремонт или сделать вынужденный перерыв в работе. Уровень сигнала меняется в зависимости от материала стен, места размещения антенны внутри помещения и положения окружающих проводящих предметов (металлических шкафов, батарей отопления, кабелей). Простая перестановка мебели может потребовать перенастройки СО. Антенное СО не отличается ни высокой вероятностью обнаружения, ни помехоустойчивостью. Оно используется преимущественно в любительской практике, да и то благодаря простоте конструкции и монтажа. Перспективы антенных СО связаны с переходом на диапазоны сотовой связи, находящей все более широкое распространение.

2.22. Радиолучевые СО

Радиолучевое СО состоит из передатчика (ПРД) и приемника (ПРМ), располагаемых на противоположных концах участка (рис. 2.22.1). Передатчик формирует луч электромагнитного излучения, направленного в сторону приемника. Частота излучения лежит в диапазоне $f = 1 \dots 60$ ГГц. Приемник, обращенный в сторону передатчика, постоянно регистрирует излучение. В случае появления между передатчиком и приемником нарушителя интенсивность излучения изменяется. При изменении на заранее установленную величину в течение заданного времени формируется сигнал тревоги. Чтобы поднять ЗО над уровнем земли (травы, снега), ПРД и ПРМ устанавливаются на стойках.

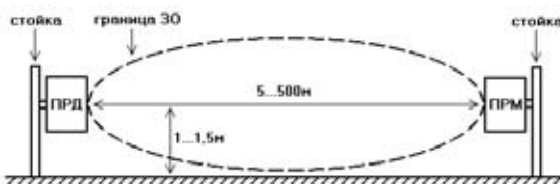


Рис. 2.22.1 Радиолучевое СО

Длина луча составляет 5...500 метров, ширина – от нескольких сантиметров до 6 метров. Форма луча – сильно вытянутый эллипсоид со строго прямолинейной осью. Радиолучевое СО является активным двухпозиционным незаградительным. Оно относится к обширному классу микроволновых или сверхвысокочастотных (СВЧ) СО, работающих на частотах 0,3...300 ГГц. Радиолучевые СО называются также радиоволновыми линейными или радиоволновыми двухпозиционными извещателями, также можно встретить выражения микроволновой барьер или СВЧ-барьер, хотя они не являются препятствиями на пути передвижения. Радиолучевые СО используются для охраны протяженных внешних участков. Иногда их применяют внутри зданий, например, для блокирования длинных прямолинейных коридоров в ночное время. Их ЗО практически незаметна; они предназначены преимущественно для обнаружения нарушителей, передвигающихся в рост или согнувшись. Большинство радиолучевых СО располагает возможностью увеличения чувствительности для обнаружения ползущего нару-

шителя при некотором ухудшении наработки на ложное срабатывание. Широкому распространению радиолучевых СО способствуют высокая помехоустойчивость и низкая погонная стоимость. Однако, в любительской практике они встречаются редко, так как для их настройки требуется сложная и дорогостоящая измерительная аппаратура.

На открытой местности радиолучевое СО устанавливается на стойках. При наличии забора (или стены) оно может размещаться не только на стойках, но и на кронштейнах, монтируемых на опорах ограждения или на стене охраняемого здания. В этом случае радиолучевое СО часто является дополнительным по отношению к основному СО, установленному на ограждении.

Первые радиолучевые СО были непрерывными, их передатчик постоянно излучал электромагнитные волны. Однако, это приводило к большому энергопотреблению СО. В настоящее время почти все радиолучевые средства являются импульсными, что не только способствует снижению потребляемого тока, но и повышает надежность, а также обеспечивает возможность совместной работы вблизи друг от друга множества однотипных СО (с поочередным выходом в эфир на одной рабочей частоте). Реализация импульсного режима работы требует, чтобы между ПРД и ПРМ были проложены кабели взаимной синхронизации. Возможен вариант импульсного радиолучевого СО с синхронизацией по СВЧ сигналу (радиолучу); он позволяет обходиться без кабелей синхронизации.

В основе физической модели обнаружения радиолучевого СО лежит представление луча с помощью зон Френеля. Оно определяется волновым характером излучения и позволяет оценивать вид и параметры сигналов. Обозначим длину волны излучения λ . Расположив ПРД в точке А, а ПРМ – в точке В на расстоянии L от ПРД, проведем через точку D, находящуюся на отрезке АВ на расстоянии a от точки А, плоскость, перпендикулярную к АВ (рис. 2.22.2). В данном случае величина L представляет собой длину участка, а величина a – расстояние до объекта, пересекающего луч. Определим значение радиуса k -ой зоны Френеля $R_k = CD$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) таким образом, чтобы длина пути по траектории АСВ превосходила длину АDB на целое число половин длины волны $k\lambda/2$. Тогда, если излучение, проходящее через первую зону Френеля (круг радиусом R_1), имеет определенную фазу, то излучение через вторую зону Френеля (кольцо с радиусами R_1 и R_2) будет к нему в противофазе, через третью (кольцо с радиусами R_2 и R_3) – вновь в фазе и т.д. Попеременное перекрытие четных и нечетных зон будет приводить к последовательному увеличению и ослаблению интенсивности принимаемого излучения. При частичном перекрытии зоны изменение интенсивности пропорционально перекрываемой площади.

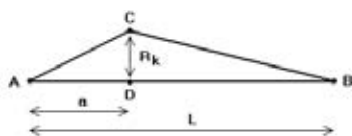


Рис. 2.22.2 Определение зон Френеля

Непосредственно из определения радиусов зон Френеля следует соотношение $AC + CB = AB + k\lambda/2$ или $((R_k)^2 + a^2)^{1/2} + ((R_k)^2 + (L-a)^2)^{1/2} = L + k\lambda/2$. Выражая R_k через остальные параметры, в случае малых длин волн ($k\lambda \ll L$, $k\lambda \ll a$, $k\lambda \ll L-a$) можно получить простое соотношение $R_k = (k\lambda a(L-a) / L)^{1/2}$. Из него следует, что площади всех зон Френеля с различными номерами k одинаковы и равны $S_k = \pi((R_k)^2 - (R_{k-1})^2) = \pi\lambda a(L-a)/L$. По мере увеличения номера k радиус зоны R_k возрастает, а ширина соответствующего кольца уменьшается. В середине участка ($a = L/2$) радиусы зон Френеля составляют $R_k = (k\lambda L)^{1/2}/2$. При смещении в сторону ПРД или ПРМ они медленно уменьшаются. Так, например, на расстоянии $a = L/4$ (или $a = 3L/4$) они составят $R_k = (3k\lambda L/4)^{1/2}/2$ или 0,87 от значений в середине участка.

Для средних значений $L = 100$ м, $\lambda = 0,03$ м (частота $f = 10$ ГГц), $a = L/2$ получим $R_1 = (\lambda L)^{1/2}/2 = 0,87$ м, $R_2 = (2\lambda L)^{1/2}/2 = 1,22$ м, $R_3 = (3\lambda L)^{1/2}/2 = 1,5$ м, $R_4 = (4\lambda L)^{1/2}/2 = 1,73$ м, $R_5 = (5\lambda L)^{1/2}/2 = 1,94$ м и т.д. Размеры зон Френеля примерно соответствуют размерам человека, поэтому изменение интенсивности принимаемого сигнала максимально (рис. 2.22.3). Пересечение первой зоны уменьшает интенсивность. Смещение от оси, соответствующее перекрытию второй зоны, вызывает изменение противоположного знака и меньшей величины и длительности. Пересечение четных зон дает положительные выбросы, а нечетных – отрицательные. Таким образом, сигнал $U(t)$ на выходе приемника будет иметь вид колебательного процесса относительно начального уровня U_0 . В моменты пересечения границ зон Френеля положительные и отрицательные добавки компенсируют друг друга, так что результирующая величина сигнала близка к U_0 . Практически можно наблюдать выбросы до седьмой-девятой зоны Френеля, когда человек начинает одновременно перекрывать сразу несколько соседних зон.

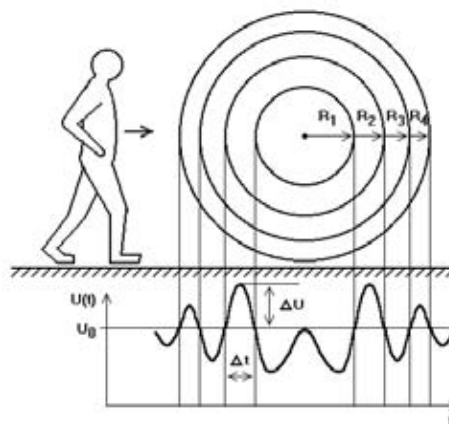


Рис. 2.22.3 Вид сигнала при пересечении зон Френеля

Анализ зон Френеля дает качественную картину сигналов. Считается, что вся зона дает положительный или отрицательный вклад в электромагнитные колебания. В действительности фаза колебаний плавно меняется при увеличении расстояния от оси луча, а сигналы в центре первой зоны и на ее внешней границе находятся в противофазе друг к другу. То же относится и ко

всем остальным зонам, так как именно это условие лежит в основе построения их границ. Более точные количественные оценки уровней сигналов при перекрытии части луча дает анализ так называемой спирали Френеля, которая изображает суммарное действие от каждого самостоятельного элемента сечения луча с учетом его относительной фазы. В частности, анализ спирали Френеля для объектов небольших размеров и площади $S_{\text{обь}} \ll S_1$ дает оценку $\Delta A / A_0 = \pi S_{\text{обь}} / S_1$, где A_0 – начальное значение амплитуды электромагнитных колебаний в точке приема при отсутствии перекрытия, ΔA – ее максимальное изменение при частичном перекрытии первой зоны. ЧЭ обычно измеряет мощность излучения, которая пропорциональна квадрату амплитуды. Поэтому максимальная глубина модуляции выходного электрического сигнала ЧЭ $U(t)$ оценивается величиной $m = \Delta U / U_0 = 2\Delta A / A_0 = 2\pi S_{\text{обь}} / S_1$, где U_0 – начальный уровень принимаемого сигнала в дежурном режиме, ΔU – его наибольшее изменение. При тех же исходных данных площадь первой зоны Френеля равна $S_1 = \pi \lambda L / 4 = 2,4 \text{ м}^2$. Площадь сечения человека примерно равна $S_{\text{чел}} = 0,4 \dots 0,5 \text{ м}^2$. Ее доля по отношению к зоне Френеля составляет $\gamma = S_{\text{чел}} / S_1 = 0,17 \dots 0,2$. Глубина модуляции сигнала на выходе ЧЭ $m = 2\pi \gamma$ в данном случае достигает 100%. Полученные выводы справедливы для траектории объекта, проходящей через ось луча. При отклонении траектории движения вверх или вниз глубина модуляции будет несколько меньше.

Оценим длительности выбросов Δt (рис. 2.22.3). Радиус первой зоны Френеля в середине участка $R_1 = 0,87 \text{ м}$. При скорости движения нарушителя $v = 0,5 \dots 5 \text{ м/с}$ длительность центрального выброса составит $\Delta t_1 = R_1 / v = 0,17 \dots 1,7 \text{ с}$. Длительности выбросов при прохождении второй и третьей зоны составят $\Delta t_2 = (R_2 - R_1) / v = 0,07 \dots 0,7 \text{ с}$ и $\Delta t_3 = (R_3 - R_2) / v = 0,06 \dots 0,6 \text{ с}$ соответственно. Учитывая возможность движения под углом к оси луча, получим диапазон длительностей выбросов при прохождении центральной части луча $\Delta t = 0,06 \dots 5 \text{ с}$. По мере удаления ОО от оси луча ширина зон Френеля уменьшается. В связи с этим объект перекрывает одновременно несколько зон, его воздействие на результирующий сигнал ослабевает, амплитуда выбросов ΔU падает, а длительность Δt – сокращается.

Как изменится сигнал при проходе ОО ближе к передатчику или приемнику? В этом случае линейные размеры зон Френеля сокращаются, поэтому глубина модуляции будет возрастать, а длительности выбросов – уменьшаться. Общий вид сигнала сохранится. Например, при $a = L/4$ (или $a = 3L/4$) линейные размеры всех зон уменьшаются в $(4/3)^{1/2} = 1,15$ раза, длительности выбросов уменьшаются в те же 1,15 раза, а глубина модуляции – увеличивается в $4/3 = 1,33$ раза.

Еще ближе к передатчику или приемнику, например, на расстоянии $a = 2 \text{ м}$ (или $L-a = 2 \text{ м}$) радиус первой зоны Френеля составит $R_1 = (\lambda(L-a)/L)^{1/2} = 0,24 \text{ м}$, то есть $0,24/0,87 = 0,28$ или примерно четверть от того же радиуса в центре участка. Длительности выбросов сокращаются примерно в четыре раза. Радиус пятой зоны $R_5 = (5\lambda(L-a)/L)^{1/2} = 0,54 \text{ м}$. Ближе двух метров

луч оказывается настолько узким, что под ним можно проползти или пройти согнувшись.

В случае пролета птицы через луч помеховый сигнал будет иметь тот же вид колебаний на фоне начального уровня U_0 . Однако, даже крупная птица размером $0,2 \times 0,2 \text{ м}$ имеет площадь $S_{\text{птиц}} = 0,04 \text{ м}^2$. Она меньше площади человека примерно в 10 раз. Глубина модуляции будет во столько же раз меньше. Скорость летящей птицы обычно превышает 10 м/с, и следовательно, длительности выбросов оказываются значительно короче, чем в сигнале от человека. Поэтому помеховые сигналы от данного вида воздействий легко подавляются амплитудной дискриминацией и частотной фильтрацией сигналов.

Физическая модель, основанная на анализе зон Френеля, подходит практически для любого радиолучевого СО, так как угол диаграммы направленности передающей и приемной антенны, в пределах которого излучается электромагнитная волна, почти всегда оказывается шире первых пяти-семи зон Френеля. Например, в условиях предыдущего примера радиус седьмой зоны $R_7 = (7\lambda L)^{1/2} / 2 = 2,29 \text{ м}$; ему соответствует угол диаграммы направленности всего лишь $\alpha = 4R_7 / L = 0,09$ радиан = 5° ; направить столь узкие лучи передатчика и приемника друг на друга будет непросто.

Положение зон Френеля относительно оси, соединяющей ПРД и ПРМ, определяет высоту установки блоков над уровнем земли. Для человека, идущего в рост, ось должна проходить на уровне живота или груди. При высоте установки 1...1,5 м не только выполняется это условие, но также первые две-три зоны Френеля располагаются выше уровня земли, что обеспечивает помехоустойчивость от воздействия мелких и средних животных. Если необходимо обнаруживать человека, передвигающегося согнувшись или ползком, высоту установки следует уменьшить до 0,5...1 м. При этом возможно некоторое повышение вероятности ложных срабатываний за счет влияния земли и перемещающихся по ней предметов и животных. Если ожидается выпадение слоя снега, то блоки придется приподнять, сохраняя высоту 0,5...1,5 м над его уровнем.

Ширина зоны обнаружения радиолучевого СО полностью определяется алгоритмом формирования сигнала тревоги. Простейший алгоритм фиксирует пересечение первой зоны Френеля: если в сигнале наблюдается выброс с глубиной модуляции, превышающей заданный уровень, и его длительность укладывается в установленные границы, то активируется сигнал тревоги. Подобный алгоритм характеризуется быстрой реакцией на появление нарушителя и узкой зоной обнаружения, ее ширина составляет около половины диаметра первой зоны Френеля. В центральной части участка ширина ЗО равна $R_1 = (\lambda L)^{1/2} / 2 = 0,08 \dots 6 \text{ м}$ (для $f = 1 \dots 60 \text{ ГГц}$, $\lambda = 0,005 \dots 0,3 \text{ м}$, $L = 5 \dots 500 \text{ м}$); по краям участка она несколько уже. Если алгоритм обнаружения учитывает две зоны Френеля, то сигнал тревоги формируется после появления трех-четырех последовательных выбросов (положительного, одного или двух отрицательных и вновь положительного) при соблюдении заданных длительностей выбросов и интервалов

между ними. Такой алгоритм обеспечивает повышенную помехоустойчивость, правда, за счет более позднего формирования сигнала тревоги и увеличения ширины ЗО до размеров второй зоны Френеля. Еще большую помехоустойчивость обеспечивают алгоритмы, фиксирующие последовательное пересечение более старших зон Френеля, хотя для них необходимо учитывать влияние на форму зон Френеля отражающей поверхности земли.

Радиолучевые СО обладают высокой помехоустойчивостью к различного вида осадкам: дождю, снегу, туману, граду, — поскольку электромагнитное излучение огибает препятствия с размерами меньше длины волны. Они нечувствительны к пыли, мелким веткам, насекомым, небольшим птицам, загрязнению поверхности аппаратуры. Составные части СО не нуждаются в регулярной очистке или протирке.

При установке радиолучевых СО следует обращать особое внимание на близлежащие предметы, отражающие электромагнитное излучение, такие как железные заборы, калитки, другие проводящие поверхности. Металлический забор, находящийся на небольшом расстоянии от предполагаемого рубежа радиолучевого СО, может привести к формированию ложного луча (рис. 2.22.4). Смещение ЗО от планируемой линии чревато, в свою очередь, возможностью пропуска нарушителя. Кроме того, колебания забора (или металлического листа) вызывают модуляцию принимаемого сигнала, что может стать источником ложных срабатываний. По этой причине ПРД и ПРМ, размещаемые вблизи от металлических заборов, должны быть отъюстированы с особой тщательностью, а крупные проводящие предметы в пределах диаграммы направленности — надежно закреплены.



Рис. 2.22.4 Формирование ложного луча

Если параллельно лучу располагается проводящая поверхность (стальной забор, железобетонная стена, поверхность земли), то блок ПРД (или ПРМ) не следует устанавливать ближе $\lambda/2$ от нее (рис. 2.22.5). Это объясняется тем, что при отражении электромагнитного излучения его фаза меняется на противоположную. В результате в любую точку пространства (А) одновременно приходит прямое излучение от ПРД и противофазное излучение от его зеркального отражения ПРД-. Их интенсивности примерно равны и они взаимно гасят друг друга. Чем ближе блок ПРД (или ПРМ) находится к отражающей поверхности, и чем меньше угол между этой поверхностью и осью диаграммы направленности, тем шире окажется мертвая зона, в которую излучение не доходит (или из которой оно не может быть принято).

Сигналы радиолучевого СО обладают свойством подобия. В середине участка (при $a = L/2$) радиусы зон Френеля равны $R_k = (k\lambda L)^{1/2}/2$, при другом значении а

они составляют $R_k = (k\lambda(L-a)/L)^{1/2}$, то есть все радиусы оказываются умноженными на коэффициент подобия $K_{\text{под}} = 2(a(L-a))^{1/2}/L < 1$. Если некоторый объект пересекает луч в середине участка, а его уменьшенная в $(1/K_{\text{под}})$ раз копия пересекает луч со скоростью в $(1/K_{\text{под}})$ раз медленнее на расстоянии а, то сигналы от обоих пересечений окажутся идентичными.

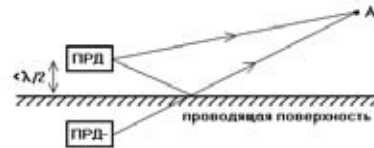


Рис. 2.22.5 Образование мертвой зоны при размещении ПРД вблизи от проводящей поверхности

При длине участка $L = 100$ м и частоте излучения $f = 10$ ГГц диаметр первой зоны Френеля равен $2R_1 = (\lambda L)^{1/2} = 1,74$ м, он соответствует длине тела человека и значительно превосходит размеры различных помеховых объектов: птиц, мелких животных, снежинок, капель дождя. Этим определяется высокая обнаружительная способность и высокая помехоустойчивость радиолучевых СО. В принципе частота излучения могла бы быть несколько увеличена, так как ширина человека в 3...6 раз меньше его длины. Тем не менее, обычно радиолучевые СО работают в диапазоне 9...11 ГГц, поскольку здесь наиболее широко представлена доступная элементная база и технические решения, созданные для радиолокации. Для сохранения размеров зон Френеля необходимо, чтобы с увеличением длины участка осуществлялся переход на более высокую частоту излучения, а при ее уменьшении — на более низкую.

Излучение передатчика формируется с помощью антенны. Ее тип и размеры определяют эффективность работы радиолучевого СО. Такая же антенна содержится в приемнике. В радиолучевых СО могут применяться антенны пяти типов: вибраторные, рупорные, щелевые, зеркальные и полосковые. Они отличаются диаграммой направленности (ДН), входным сопротивлением, коэффициентом полезного действия (КПД), усилением, коэффициентом стоячей волны (КСВ) и направлением поляризации. Антенны с узкой ДН позволяют концентрировать излучаемую мощность в заданном направлении. Благодаря этому они обеспечивают повышенную дальность и помехоустойчивость, так как отсутствуют паразитные отражения от окружающих предметов. Однако, остронаправленные антенны нуждаются в более длительной и тщательной юстировке. КСВ антенны меняется от 1 до ∞ . В любой антенне наблюдается суперпозиция бегущей и стоячей волны. Чем ближе значение КСВ к единице (или, как говорят, единице-и-ичке), тем большую долю имеет бегущая волна по сравнению со стоячей, и тем выше эффективность излучения (или приема). Если КСВ антенны велик, то превалирует стоячая волна, не способная покинуть антенну. Ее энергия уходит на нагрев передатчика (как в СВЧ-печи). КСВ определяется через напряжение падающей волны U_1 и напряжение отраженной волны U_R соотношением $КСВ = (U_1 + U_R) / (U_1 - U_R)$. Оно позволяет установить связь

между величиной КСВ и долей проходящей и отраженной мощности (табл. 2.22.1).

Таблица 2.22.1 Связь КСВ и мощности

КСВ	Доля проходящей мощности	Доля отраженной мощности
1	1	0
1,2	0,99	0,01
1,9	0,9	0,1
2,5	0,8	0,2
3,5	0,7	0,3
4,5	0,6	0,4
6	0,5	0,5
8	0,4	0,6
11	0,3	0,7
18	0,2	0,8

Эффективность излучения (и приема) определяется не только типом и согласованием антенны, но и наличием радиопрозрачного корпуса, защищающего антенну от грязи, влаги и пыли, но пропускающего электромагнитное излучение. Хорошие показатели обеспечивает акриловый пластик или твердый пенопласт, покрытый защитным лаком. Они ослабляют излучение в диапазоне 10 ГГц не более, чем на 1...2 дБ. Излучающая и приемная антенна одного СО всегда имеют один и тот же тип, что объясняется их лучшим взаимным согласованием, одинаковой поляризацией и соображениями технологичности производства, хотя использование в ПРД и ПРМ разных антенн может иметь положительные стороны.

Прежде чем перейти к описанию антенн, используемых в радиолучевых СО, необходимо сделать ряд замечаний общего характера. Мощность СВЧ-излучения часто измеряется в единицах дБм, то есть в децибелах относительно начального уровня, за который принимается 1 мВт. Перевод мощности W из одних единиц в другие производится по формулам $W(\text{дБм}) = 10\lg(W(\text{мВт}))$ и $W(\text{мВт}) = 10^{W(\text{дБм})/10}$. Обычному для радиолучевых СО диапазону мощностей $W = 10...1000$ мВт соответствуют значения $W = 10...30$ дБм. Удобство использования логарифмических единиц заключается в том, что излучаемый сигнал на пути своего следования (в передающей антенне, в воздухе, при взаимодействии с различными объектами, в приемной антенне) все время уменьшается в определенное число раз. Многочисленные умножения чисел проще заменить на сложение их логарифмов.

При удалении от источника излучения уровень принимаемой мощности падает. На пути приема сигналов низкого уровня (и следовательно — увеличения длины участка) стоит предел, называемый тепловым шумом. Он является неотъемлемой частью любого нагретого тела. Мощность теплового шума в полосе частот Δf равна $W = kT\Delta f$, где k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К, T — абсолютная температура в градусах Кельвина. Взяв обычные значения температуры окружающей среды $T = 293$ К (20°C) и полосы частот приемного тракта $\Delta f = 0,02...100$ МГц, получим для

мощности теплового шума $W = kT\Delta f = 8,1 \times 10^{-14}...4,0 \times 10^{-10}$ мВт = -131...-94 дБм. Эти значения пригодятся нам впоследствии. Окажется, что они не так уж малы, как кажется на первый взгляд. Мощность сигнала в точке приема должна значительно превосходить уровень теплового шума, так как, во-первых, последующие каскады усиления и преобразования вносят свои дополнительные шумы, и во-вторых, результирующее отношение сигнал/шум должно быть достаточно большим для уверенного распознавания параметров полезного сигнала. Отсюда же явно следует необходимость сужения полосы принимаемых частот, то есть применения высококачественных узкополосных антенн и повышения тщательности их настройки, особенно при больших расстояниях между ПРД и ПРМ.

Оценим уровень сигнала, поступающего на приемный блок. Обозначим за $W_{\text{ПРД}}$ мощность, подводимую к передающей антенне. Обычно она находится в пределах $W_{\text{ПРД}} = 0,01...1$ Вт. Более высокая мощность превратила бы радиолучевое СО в печку, так как КПД преобразования электрической энергии в СВЧ находится на уровне нескольких процентов. Кроме того, большая плотность потока электромагнитной энергии небезопасна для здоровья.

Антенна излучает в пространство не всю подводимую мощность, а только ее часть, равную $\eta_{\text{ПРД}} W_{\text{ПРД}}$, где $\eta_{\text{ПРД}}$ — КПД передающей антенны, составляющий около $\eta_{\text{ПРД}} \approx 0,5$. Антенны спутниковой связи или радиолокационных станций могут обладать и большими значениями КПД, но это достигается применением специальных материалов, повышенной точностью изготовления и тщательной настройкой, которые приводят к удорожанию антенн. Уровень КПД $\eta_{\text{ПРД}} \approx 0,5$ соответствует высококачественным, но не слишком дорогим антеннам.

Для повышения дальности действия передающей антенны излучение направляется не равномерно во все стороны (то есть в телесный угол 4π), а сосредотачивается в пределах заданного сектора. Его границы не могут быть абсолютно резкими. Имеется направление, вдоль которого интенсивность излучения максимальна; по мере отклонения от этого направления интенсивность постепенно уменьшается. Зависимость мощности излучения ΔW , приходящегося на небольшой телесный угол $\Delta\Omega$, от направления излучения описывается так называемой диаграммой направленности (ДН) антенны. ДН является пространственной функцией, но для наглядности ее изображают в каком-либо плоском сечении, проходящем через ось наибольшего излучения антенны. Плоский угол θ , характеризующий степень направленности, обычно измеряется по уровню половинной мощности относительно ее максимального значения (рис. 2.22.6). Чтобы подчеркнуть это, а также, чтобы показать, что угол измеряется в обе стороны от оси максимального излучения, его часто обозначают $\theta = 2\theta_{0,5}$. Величина угла зависит от типа антенны и находится (для радиолучевых СО) в пределах $\theta = 0,1...0,5$ рад, чтобы, с одной стороны, не расходовать энергию напрасно, а с другой — не слишком усложнять процесс юстировки антенн (совмещения осей ДН пе-

редающей и приемной антенн). Данный процесс осложняется тем, что совмещения необходимо добиться в горизонтальной и вертикальной плоскостях (четыре степени свободы), а невидимая ось излучения не всегда совпадает с какой-либо из сторон корпуса. Здесь и далее плоские углы измеряются в радианах; это наиболее удобно, так как позволяет сразу находить размеры луча при заданной дальности. Например, углу $\theta = 0,15$ рад на расстоянии 40 м соответствует пятно диаметром $0,15 \times 40 = 6$ м.

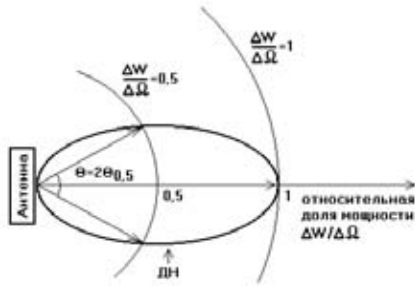


Рис. 2.22.6 Диаграмма направленности антенны

Точка приема располагается на расстоянии L от передатчика. Плотность потока энергии Π в ней равна отношению мощности к площади, вырезаемой телесным углом Ω , в пределах которого распространяется излучение, на сфере радиусом L . Таким образом, $\Pi = \eta_{\text{прд}} W_{\text{прд}} / \Omega L^2$. Если ДН одинакова в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, а плоский угол θ мал, то $\Omega \approx \theta^2$, поэтому $\Pi = \eta_{\text{прд}} W_{\text{прд}} / (\theta L)^2$. Часто можно встретить такой показатель, как коэффициент усиления антенны $G_{\text{прд}} = \eta_{\text{прд}} D_{\text{прд}} = \eta_{\text{прд}} \times 4\pi / \Omega = \eta_{\text{прд}} \times 4\pi / \theta^2$, где $D_{\text{прд}}$ – коэффициент направленного действия (КНД) антенны, равный отношению полного телесного угла 4π к телесному углу Ω , ограничивающему основную часть потока энергии. КНД показывает, во сколько раз плотность потока данной антенны (вдоль оси) возрастает по сравнению с изотропной антенной, излучающей равномерно во все стороны. Коэффициент усиления учитывает, кроме этого, еще и потери мощности в самой антенне.

Умножив плотность потока Π на геометрическую площадь приемной антенны S и на КПД преобразования антенны $\eta_{\text{прм}}$, получим выражение для принимаемой мощности $W_{\text{прм}} = \eta_{\text{прм}} \Pi S = W_{\text{прд}} \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}} S / (\theta L)^2$. Значение $\eta_{\text{прм}} \approx 0,5$ по тем же причинам, что и для передающей антенны. Усиление приемной антенны связано с ее площадью соотношением $G_{\text{прм}} = \eta_{\text{прм}} \times 4\pi S / \lambda^2$, где λ – длина волны излучения. В таком случае КПД $\eta_{\text{прм}}$ может называться коэффициентом использования площади (КИП) антенны, хотя чаще в нем выделяют два множителя: коэффициент преобразования энергии (или собственно КПД) $\eta_{\text{преобр}}$ и КИП $\eta_{\text{кип}}$, то есть $\eta_{\text{прм}} = \eta_{\text{преобр}} \eta_{\text{кип}}$. Тогда под эффективной площадью антенны понимают $S_{\text{эфф}} = \eta_{\text{кип}} S$, а КНД антенны $D = 4\pi S_{\text{эфф}} / \lambda^2$. Введение коэффициентов усиления G позволяет записать выражение для принимаемой мощности в симметричном виде $W_{\text{прм}} = W_{\text{прд}} \times G_{\text{прд}} \times G_{\text{прм}} \times (\lambda/4\pi L)^2$.

В соответствии с полученными выражениями, считая площадь антенны $S = (0,02 \times 0,02 \dots 0,2 \times 0,2) \text{ м}^2$, длину рупежа $L = 5 \dots 500$ м, получим, что принимаемая мощность находится в диапазоне $W_{\text{прм}} = W_{\text{прд}} \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}} S / (\theta L)^2 = (1,6 \times 10^{-11} \dots 0,2) \text{ Вт}$. Большая величина верхней границы говорит о том, что на малых расстояниях до нескольких десятков метров нет необходимости использовать остронаправленные антенны и большую мощность передатчика. Нижняя граница диапазона требует дополнительного анализа. Прежде всего, необходимо сравнить ее с уровнем теплового шума ($W_{\text{ш}} \approx 10^{-13} \text{ Вт}$), относительно которого необходим некоторый запас, так как антенна, преобразователь и усилитель вносят дополнительные шумы, оцениваемые (относительно тепловых шумов) коэффициентом шума, и реально составляющие не менее $10 \dots 20$ дБ (при разумной стоимости оборудования). Кроме того, потери в воздухе (во время дождя, тумана), защитных поверхностях корпуса, пыли и грязи могут доходить до 10 дБ. Например, ослабление излучения с длиной волны $\lambda = 3$ см при прохождении через ливневый дождь интенсивностью $I = 100$ мм/час составляет около 3 дБ/км; пенопластовая или акриловая крышка дает еще 1...2 дБ. Помимо этого, отношение сигнал/шум должно быть все еще не ниже 10 дБ для выделения и распознавания полезного сигнала. Поэтому принимаемая мощность будет примерно на порядок меньше $W_{\text{прм0}} = W_{\text{прм}}/10$ и она должна превышать величину $W_{\text{пор}} = 1000 \times W_{\text{ш}} \approx 10^{-10} \text{ Вт}$. Сравнение полученных оценок показывает, что на больших расстояниях (от 100 м) невозможно обойтись без остронаправленных антенн большой площади или передатчиков повышенной мощности. В целом можно отметить, что диапазон $W_{\text{прд}} = 0,01 \dots 1 \text{ Вт}$ вполне удовлетворителен для использования в радиолучевых СО, а сильная зависимость $W_{\text{прм}}$ от L требует применения АРУ.

Величина излучаемой мощности является основным параметром, определяющим безопасность СО, работающих в диапазоне СВЧ. Характер воздействия электромагнитных волн на человека изучен не в полной мере, поэтому в разных странах и в различных областях использования действуют не совпадающие нормы. В настоящее время наиболее употребима норма, связывающая допустимый уровень Π (мкВт/см²) со временем работы с излучением T (час) в соответствии с соотношением $\Pi < 200/T$ (при $0,2 < T < 8$). Например, при работе с включенными источниками излучения в течение двух часов (из полного рабочего дня), его уровень не должен превышать $\Pi = 200/2 = 100$ мкВт/см². Неопределенно долго можно находиться в зоне с уровнем $\Pi < 200/8 = 25$ мкВт/см². Однако, существует дополнительное ограничение, не допускающее даже кратковременного нахождения в зоне облучения при $\Pi > 1000$ мкВт/см² = 10 Вт/м². При повышенной температуре (более 28°C) ограничение становится более строгим $\Pi < 100$ мкВт/см². Примерно такие же нормы действуют в быту по отношению к СВЧ-печам.

Во время настройки аппаратуры монтажники находятся в зоне облучения непродолжительное время и не касаются рабочих поверхностей приборов. Тогда безопасный уровень $\Pi < 1$ мВт/см² на расстояниях бо-

лее 10 см от ПРД будет обеспечиваться при непрерывной мощности излучения $W_{\text{ПРД}} < 0,1$ Вт. Степень воздействия определяется средней мощностью. В связи с этим импульсный режим работы передатчика позволяет увеличивать мгновенную мощность излучения $W_{\text{ПРД}}$ до нескольких ватт, сохраняя средний уровень в пределах допустимого. Если длительность импульса равна τ и они следуют с интервалом T , то средняя мощность $W_{\text{СР}} = W_{\text{ПРД}} \times (\tau/T)$, а выигрыш пропорционален отношению (T/τ) .

Длительность импульса τ определяется продолжительностью переходных процессов в излучающих и приемных элементах, а также возможностью использования в цепях управления и обработки сигналов недорогих ОУ и микросхем серий КМОП. Обычно она составляет $\tau = 10 \dots 100$ мкс. Период следования импульсов должен быть достаточно малым, чтобы успевать отслеживать происходящие изменения при максимальной скорости пересечения зон Френеля минимальных размеров. Так, для минимальной длительности выброса $\Delta t = 0,1$ с следует выбрать интервал T хотя бы на порядок меньше $T = \Delta t/10 = 0,01$ с. Тогда выигрыш составит не менее $T/\tau = 0,01$ с / 100 мкс = 100 раз, а безопасный уровень $P < 1$ мВт/см² обеспечивается при импульсной мощности $W_{\text{ПРД}} < 10$ Вт.

Многие полупроводниковые элементы СВЧ техники не только являются источниками скрытой опасности для человека, но и сами весьма чувствительны к внешним воздействиям. Такие элементы, как генераторные диоды Ганна, смесительные и детекторные диоды и многие другие полупроводниковые элементы, обладают низким пробивным напряжением и малой собственной емкостью (менее 1 пФ). По этой причине даже небольшой статический заряд способен вывести их из строя. При работе с полупроводниковыми СВЧ элементами необходимо придерживаться следующих правил:

- заземлять рабочую поверхность стола, выполнив ее из листа проводящего материала;
- надевать на руки заземленные (через резистор сопротивлением 1 МОм) браслеты, пользоваться заземленным инструментом;
- заземлять жало паяльника; отключать паяльник от питающей сети на время пайки;
- установку, снятие или замену СВЧ элементов проводить только при отключенном напряжении питания;
- носить антистатическую одежду.

Передача сигналов СВЧ диапазона с помощью обычных двухпроводных линий затруднена из-за высокой степени излучения в окружающее пространство и значительного затухания. Для передачи СВЧ сигналов используются специальные тракты: коаксиальные, волноводные и полосковые. Элементы трактов, обладающие минимальным затуханием, технически проработаны и доступны для широкого применения.

Типичный коаксиальный кабель состоит из центральной медной жилы и металлического экрана круглого сечения, пространство между которыми заполнено диэлектриком (рис. 2.22.7). Сверху кабель защи-

щает пластиковая оболочка. В качестве диэлектрика обычно используется вспененный полиэтилен, благодаря низким потерям СВЧ излучения в данном материале. Еще меньшие потери обеспечивает воздушный диэлектрик, но тогда возникают проблемы обеспечения жесткости крепления центрального проводника. Коаксиальные тракты применяются в диапазоне от 20 МГц до 12 ГГц. Их стандартное волновое сопротивление составляет 50, 75, 100, 150 или 200 Ом, первые два используются в трактах передачи сигналов, последние три – преимущественно в цепях согласования. Выпускаются кабели с наружным диаметром 2...18 мм и затуханием 0,2...1,5 дБ/м (на частоте 1 ГГц). С повышением частоты затухание коаксиальных кабелей возрастает, поэтому они редко используются на частотах выше 3...5 ГГц, да и то – в виде коротких отрезков кабеля или коаксиальных трактов с воздушным диэлектриком.



Рис. 2.22.7 Коаксиальный кабель

Волновод представляет собой полую металлическую трубу постоянного сечения, внутри которой распространяется электромагнитная волна. Материалом трубы обычно является медь, алюминий или медные сплавы. Наиболее популярная форма сечения – прямоугольник с отношением сторон $a/b \approx 2$ (рис. 2.22.8), хотя встречаются волноводы и другой формы: плоские прямоугольные ($a/b > 2,5$), круглые, П-образные и Н-образные. Чем ниже частота излучения, тем большего сечения требуется волновод. Толщина стенки невелика – около 1...2 мм. Изготавливаются волноводы ряда стандартных сечений, перекрывающие диапазон частот от 0,3 до 300 ГГц. Однако, наиболее часто они используются на частотах выше 1...3 ГГц, где с ними не могут конкурировать коаксиальные кабели. Параметры некоторых стандартных волноводов приведены в таблице 2.22.2. Их волновое сопротивление находится вблизи 500...600 Ом. Затухание минимально для медных волноводов, применение других материалов приводит к увеличению затухания. Длина волны λ должна удовлетворять условиям распространения: $a < \lambda < 2a$, $\lambda > 2b$. Точность, выдерживаемая при изготовлении волноводов, – порядка 0,1 мм.

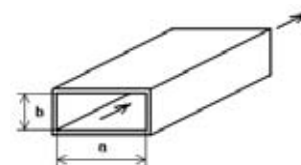


Рис. 2.22.8 Волновод

Полосковая линия представляет собой тонкую металлическую полоску, вдоль которой распространяется электромагнитная волна. Параллельно одной полоске

Таблица 2.22.2 Параметры стандартных волноводов

а, мм	в, мм	Диапазон частот, ГГц	Затухание для меди, дБ/м
110	55	1,72...2,59	0,010
90	45	2,14...3,2	0,014
72	34	2,6...3,9	0,019
58	25	3,2...4,8	0,025
40	20	4,8...6,85	0,043
35	15	5,55...8,33	0,058
28,5	12,5	6,3...10,0	0,080
23	10	8,15...12,42	0,11
10,6	4,3	16...27	0,37
7,2	3,4	26...40	0,58

могут проходить другие, они могут находиться в воздухе или в слое твердого диэлектрика, могут быть окружены замкнутым или односторонним экраном. Наиболее распространенный несимметричный полосковый волновод состоит из заземленной и токонесущей пластин, разделенных слоем диэлектрика (рис. 2.22.9). Он изготавливается печатным методом (травлением фольгированных листов фторопласта), либо напылением или осаждением слоя металла на подложку из ситалла или поликора. Процесс изготовления полосковых волноводов технологичен и дешев, он легко интегрируется с монтажом радиодеталей на общую плату. Получаемые узлы компактны и надежны.

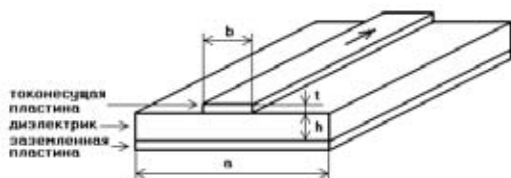


Рис. 2.22.9 Полосковая линия

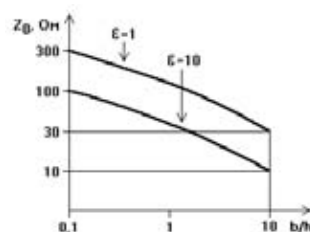
Размеры полосковых линий выбираются из условий $h \leq \lambda/2$; $0,5 \text{ мм} \leq (1,05 \dots 1,1)b < \lambda/2$; $a \geq b + 2h$; $t = 0,025 \dots 0,05 \text{ мм}$. Если слой диэлектрика тонкий ($h \leq 2 \text{ мм}$) и он обладает высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \gg 1$, а нижняя проводящая пластинка заземлена, то волновод называется микрополосковым. Чтобы волна в линии не затухала, диэлектрик должен обладать малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta < 10^{-3}$. Параметры некоторых наиболее распространенных диэлектриков, применяемых в диапазоне СВЧ, приведены в таблице 2.22.3.

Таблица 2.22.3 Диэлектрики для полосковых линий

Название	ϵ (на частоте 10 ГГц)	$\text{tg} \delta$ (на частоте 10 ГГц)
Фторопласт	2,0...2,1	$2,5 \times 10^{-4}$
Полиэтилен	2,3	3×10^{-4}
Полистирол	2,6	$(3 \dots 4) \times 10^{-4}$
ФАФ-4	2,6	10×10^{-4}
Ситаллы	7...25	$(4 \dots 12) \times 10^{-4}$
Поликор	9,6	1×10^{-4}

Полосковые волноводы применяются в диапазоне частот 0,3...30 ГГц. Они характеризуются небольшим, но главное — управляемым волновым сопротивлением,

которое можно менять в пределах $Z_0 = 10 \dots 300 \text{ Ом}$ путем подбора ширины полосковой линии b (рис. 2.22.10). Потери СВЧ энергии в полосковых линиях складываются из потерь в проводнике, в диэлектрике и на излучение. Они превышают погонные потери в объемных волноводах и коаксиальных линиях, но на коротких расстояниях — незначительны.

Рис. 2.22.10 Зависимость волнового сопротивления Z_0 от параметров полосковой линии

В диапазоне СВЧ часто требуется использовать конденсаторы малой емкости и небольшие индуктивности. Если полосковые линии изготавливаются из фольгированного фторопласта (или другого диэлектрика), то данные элементы могут быть вытравлены вместе с линиями волноводов (и антенными системами — о чем будет сказано несколько позже). Небольшое утолщение линии станет конденсатором, а завиток — индуктивностью (рис. 2.22.11); мановение руки — и готов фильтр.

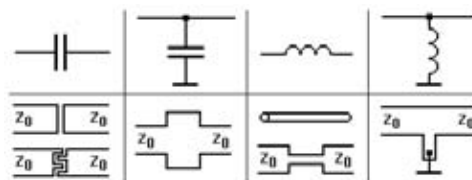


Рис. 2.22.11 Полосковые элементы

Подсоединив к СВЧ генератору через волновод антенну и подав на генератор постоянное напряжение, мы получим блок ПРД, работающий в непрерывном режиме. Если добавить генератор импульсов, управляющий напряжением питания, то будет готов импульсный ПРД. Точно так же цепочка из антенны, волновода и СВЧ детектора составляет основу блока ПРМ, на выходе которой возникает низкочастотный электрический сигнал, пропорциональный принимаемой мощности излучения. Для получения ПРМ останется добавить к ней схему выделения информативных признаков и активации сигнала тревоги. Собственно волновод может отсутствовать, к чему всячески стремятся с целью упрощения конструкции, хотя его элементы остаются всегда. Особенностью СВЧ устройств является то, что на распространение излучения влияет множество факторов, точный учет которых затруднен, и новые технические решения часто нуждаются в экспериментальной проверке.

Соединяя между собой отдельные элементы (антенну с волноводом, волноводы между собой) важно согласовывать их волновые сопротивления. Если оба

волновых сопротивления равны, то излучение проходит без отражения, а само соединение называется согласованным. Если же подсоединить к передающей антенне с волновым сопротивлением $R_1 = 150$ Ом питающий волновод (так называемый фидер) с волновым сопротивлением $R_2 = 50$ Ом, то часть энергии отразится от места соединения и потери рассогласования составят $\chi = ((R_1 - R_2) / (R_1 + R_2))^2$. КПД сочленения будет равен $\eta = 1 - \chi = 1 - ((150 - 50) / (150 + 50))^2 = 0,75$, то есть четверть мощности потеряется впустую.

Но все не так страшно, как может показаться на первый взгляд. Для соединения различных трактов (коаксиальных, волноводных, полосковых и других, здесь не упоминавшихся) разработано и выпускается множество различных переходов, способных удовлетворить любую потребность. Они позволяют не только согласовывать волновые сопротивления линий разных типов с минимальными потерями, но и преобразовывать тип, поляризацию и другие параметры излучения. Так, например, наиболее востребованные переходы между коаксиальной линией и объемным волноводом (для возбуждения волновода или, наоборот, для его связи с нагрузкой) выполняются в виде емкостного штыря (зонда), размещаемого в пучности электрического поля, или индуктивной петли, размещаемой в пучности магнитного поля (рис. 2.22.12).

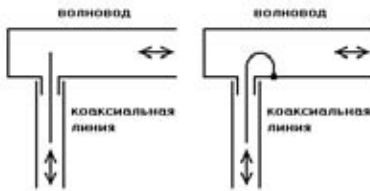


Рис. 2.22.12 Переходы между коаксиальной линией и объемным волноводом

Установив место, занимаемое каждым узлом ПРД и ПРМ, самое время вернуться к наиболее важному их элементу — антенне — и рассмотреть возможности каждого из пяти упоминавшихся их типов (вibratorные, рупорные, щелевые, зеркальные, полосковые). Типом антенны определяются такие ее параметры, как ДН, КНД D и усиление $G = \eta D$, которые уже рассматривались ранее. Необходимо добавить, что оба параметра D и G могут фигурировать не только в относительных единицах, но и в логарифмических (дБ), рассчитываемых по формулам $D(\text{дБ}) = 10 \lg D$ и $G(\text{дБ}) = 10 \lg G$. КНД различных антенн может меняться в пределах от $D = 1,5 = 1,76$ дБ для короткого диполя до более чем $D = 100000 = 50$ дБ для большой спутниковой тарелки. Столь же важно обращать внимание на такие параметры, как входное сопротивление антенны и полосу ее пропускания.

Вibratorные антенны представляют собой наиболее простой тип антенн. Они состоят из различных комбинаций активных и пассивных vibratorов, имеющих вид металлических пластин, прутков или трубок. Всем известен полуволновой диполь — одна из разновидностей vibratorных антенн (рис. 2.22.13). Полная длина vibratorа выбирается равной половине длины

волны излучения $\lambda/2$, точнее, чуть меньше (на 5%). В качестве фидера используется двухпроводная или коаксиальная линия. КНД антенны равен всего лишь $D = 1,64$. Диаграмма направленности равномерна в плоскости, перпендикулярной к оси vibratorа, и лишь в направлении самой оси наблюдаются провалы излучаемой мощности. Vibratorные антенны используются в диапазоне до нескольких гигагерц. Их широкая диаграмма согласуется с потребностями радиолучевых СО только на малых расстояниях L . Но без них картина была бы неполной. Полуволновой диполь находит применение в качестве облучателя в других типах антенн (благодаря широкой равномерной ДН), а также — в микроволновых СО объемного типа (радиолокационных и радиометрических), где ЗО должна заполнять все контролируемое помещение.

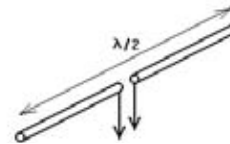


Рис. 2.22.13 Полуволновой диполь

Рупорные антенны согласуются с волноводными трактами и работают во всем диапазоне СВЧ от 0,3 до 300 ГГц. Различные их типы отличаются формой и размерами рупора. Широко распространен пирамидальный рупор (рис. 2.22.14). Прямоугольный волновод размером $a \times b$, соответствующим выбранной частоте излучения, равномерно расширяется до размеров раскрытия $A \times B$. Раскрытием антенны называется ее внешний контур — граница между антенной и свободным пространством. Площадь раскрытия равна $S = A \times B$. Длина волноводной части l не имеет существенного значения и часто выбирается примерно равной длине волны излучения λ . Длина рупора L_p (высота пирамиды) определяется оптимальным образом из условия максимального коэффициента усиления антенны.

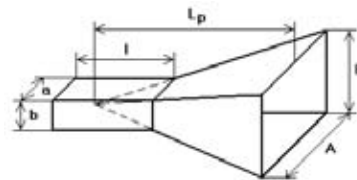


Рис. 2.22.14 Рупорная антенна

Открытый конец волновода является частным случаем рупора ($A = a$, $B = b$, $L_p = 0$). Он дает широкую диаграмму направленности с углом около $\theta = 120^\circ$ и небольшим коэффициентом усиления. Главный его недостаток — плохая согласованность со свободным пространством. Из-за высокого коэффициента отражения значительная доля мощности не в состоянии покинуть волновод.

По мере увеличения размеров рупора (A , B , L_p) угол ДН θ уменьшается, коэффициент усиления G растет, а КСВ приближается к единице. По сравнению с открытым концом волновода угол θ_A в плоскости стороны A

уменьшается в (A/a) раз, а угол θ_B в плоскости стороны B – в (B/b) раз. Углы ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях могут быть выбраны независимо друг от друга. Коэффициент усиления рупорной антенны (с длинным рупором) примерно равен $G = \eta 4\pi S / \lambda^2 \approx 10AB/\lambda^2$, поскольку ее КПД $\eta \approx 0,8$ (для коротких антенн он будет несколько ниже).

Выбрав длину волны λ и углы ДН θ_A и θ_B , можно оценить геометрические параметры рупора $A = 1,4\lambda/\theta_A$, $B = 0,92\lambda/\theta_B$, а по ним – выбрать его оптимальную длину $L_p = A^2/3\lambda$ или $L_p = B^2/2\lambda$. Если последние числа не совпадают, то следует взять наибольшее значение. Приведенные соотношения тем точнее, чем больше длина рупора. В случае малых величин L_p расчеты следует проверять экспериментально. Вычислив A , B и L_p , далее легко определить все недостающие размеры рупора, изготовить его выкройку из листовой меди и припаять к волноводу.

Пример. Оценим размеры рупорной антенны для длины волны $\lambda = 3$ см ($f = 10$ ГГц) и углов ДН $\theta_A = \theta_B = 0,2 = 12^\circ$. Берем прямоугольный волновод с размерами поперечного сечения $a = 23$ мм, $b = 10$ мм (табл. 2.22.2). Тогда размеры раскрыва рупора $A = 1,4\lambda/\theta_A = 210$ мм, $B = 0,92\lambda/\theta_B = 140$ мм, длина $L_p = A^2/3\lambda = 490$ мм ($L_p = B^2/2\lambda = 310$ мм оказывается меньше). Коэффициент усиления $G = 10AB/\lambda^2 = 300$. Из примера видно, что рупорная антенна с узкой ДН имеет большие размеры.

Щелевые антенны обязаны своим существованием уравнениям Максвелла, в соответствии с которыми излучение проводящей плоской геометрической фигуры эквивалентно излучению проводящей плоскости с вырезом в виде той же фигуры. Щелевые антенны существуют во множестве вариантов. Любой антенне, выполненной из металла, можно представить ее щелевой аналог. Обычно щель требует большего расхода материала, чем ее прототип. Но в ряде случаев, определяемых методом возбуждения, подобные антенны дают преимущества по сравнению с другими типами антенн, например, когда металлическая поверхность уже существует (автомобиль, самолет, корпус прибора) или выполнение щелей осуществляется проще, чем изготовление множества отдельных антенн с самостоятельными фидерами.

Волноводно-щелевая антенна превращает отрезок волновода в источник направленного электромагнитного излучения. Она позволяет обойтись без каких-либо промежуточных трактов передачи энергии. Волноводно-щелевая антенна представляет собой массив регулярных прорезей в одной из боковых поверхностей волновода (рис. 2.22.15). Каждая из них является отдельным миниатюрным излучателем, причем все они согласованы между собой. С одной из сторон волновод открыт, с этой стороны подводится излучение (нижняя на рисунке). С другой стороны находится заглушка, направляющая поступающую энергию в щели-антенны.

Прорези располагаются на широкой или на узкой стороне волновода. Они могут иметь различный наклон. От их рисунка и количества зависит ДН антенны. Если прорезы имеют длину $\lambda/2$, направлены вдоль оси волновода и расположены в шахматном порядке на его широкой стороне (в пучностях поля), то КПД антенны дости-

гает $\eta = 0,9$ при КНД $D = 3,2n$, где n – число прорезей. Диаграмма направленности антенны (при вертикальном расположении волновода) сильно сплюснута сверху и снизу, она имеет форму горизонтального веера. Такая ориентация снижает влияние земли, травы и мелких животных на работу СО. Сама антенна очень технологична и изготавливается на фрезерном станке из закрытого с одной стороны волновода подходящей длины.

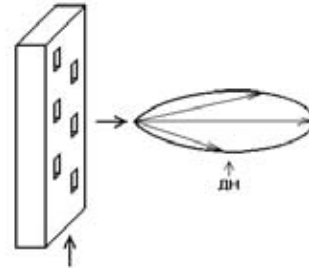


Рис. 2.22.15 Волноводно-щелевая антенна

Зеркальные антенны состоят из облучателя (источника СВЧ сигнала) и отражающей поверхности (металлического зеркала), направляющей излучение в нужном направлении. Чаще всего зеркало имеет форму параболоида вращения, оно концентрирует электромагнитную волну в виде узкого симметричного луча (рис. 2.22.16). Облучатель устанавливается в фокусе (или в фокальной плоскости) зеркала. В качестве облучателя можно использовать открытый конец волновода, небольшой рупор или диполь с отражателем, направляющим все излучение диполя на поверхность зеркала. Излучение облучателя должно равномерно покрывать площадь зеркала, но не более того; излучение, проходящее мимо зеркала теряется безвозвратно и снижает КПД.

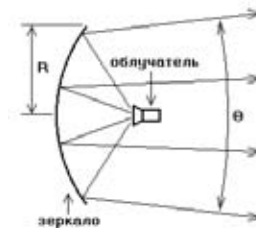


Рис. 2.22.16 Зеркальная антенна

Направленность действия антенны возрастает с увеличением радиуса ее раскрыва R . На величину угла ДН θ влияют также другие факторы: близость формы зеркала к параболе, точность установки облучателя в фокусе зеркала, вид ДН облучателя. Для определения угла θ можно воспользоваться соотношением $\theta = (1,02 \dots 1,4)\lambda/2R$ или средней оценкой $\theta = 1,2\lambda/2R$. Минимальное значение коэффициента 1,02 соответствует случаю равномерного облучения поверхности зеркала и его строго параболической форме, что достигается с трудом; значение 1,4 – не слишком тщательному согласованию облучателя с зеркалом, изготовлению и сборке в условиях поточного производства. Приведенная формула дает возможность находить размер зеркала антенны по требуемому углу ДН.

Величина коэффициента усиления G определяется рядом дополнительных факторов: КСВ облучателя, качеством поверхности зеркала, долей энергии облучателя, попадающей на зеркало. Тем не менее, здесь, как и везде, применима формула $G = \eta 4\pi S/\lambda^2 = \eta(2\pi R/\lambda)^2$. КПД η меняется в пределах от 0 до 1. Для антенн среднего качества, которые применяются в недорогих радиолучевых СО, он составляет в среднем $\eta = 0,5$, редко опускаясь ниже 0,4 или поднимаясь выше 0,6. Увеличение коэффициента усиления достигается за счет применения антенн с большой площадью раскрыва. Например, антенна диаметром $2R = 1$ м, работающая на длине волны $\lambda = 10$ см, обладает усилением $G = 0,5 \times (\pi / 0,1)^2 = 500 = 27$ дБ.

Зеркальная антенна обеспечивает высокую эффективность, она направляет в свободное пространство значительную долю падающей на ее поверхность энергии. Кроме того, она согласована в широком диапазоне длин волн, а также компактна (по сравнению с рупорной). Вместе с тем, ее применению сопутствует усложнение конструкции, необходимость изготовления зеркала специфической формы и отдельного облучателя, устанавливаемого в определенную точку относительно зеркала. Смещение облучателя приводит к расширению луча и изменению его направления, что может вызвать сложности при юстировке СО. Границы ДН облучателя не могут быть абсолютно резкими, поэтому либо часть энергии проходит мимо зеркала, либо значительная доля энергии попадает на центральную часть зеркала, что приводит к увеличению угла ДН антенны.

Зеркальные антенны предоставляют широкий набор ДН различной формы. Заменяя параболоид вращения на цилиндрический параболоид и применив линейный облучатель, можно получить ДН в виде узкого горизонтального веера (рис. 2.22.17). Если ДН излучателя сконцентрирована в горизонтальной плоскости, а приемника – в вертикальной, то процесс юстировки СО упрощается, так как каждый из блоков потребует изменения его направления только в одной плоскости (излучатель – наклонить, а приемник – повернуть относительно вертикальной оси).

Пример. Оценим размеры зеркальной антенны для длины волны $\lambda = 3$ см и угла ДН $\theta = 0,2$. Диаметр антенны $2R = 1,2\lambda/\theta = 180$ мм. Коэффициент усиления $G = \eta(2\pi R/\lambda)^2 = 0,5 \times (3,14 \times 0,18 / 0,03)^2 = 180$.

Полосковые антенны выполняются в виде плоских металлических поверхностей различной формы. Они вытравливаются на тех же платах, на которых проходят полосковые линии и устанавливаются элементы генераторов или приемников СВЧ излучения. Полосковые антенны предоставляют возможность компактных, технологичных и недорогих решений различных устройств.

Многочисленные варианты полосковых антенн отличаются формой, размерами, исполнением и способом подачи возбуждения. Среди них есть как цельно-

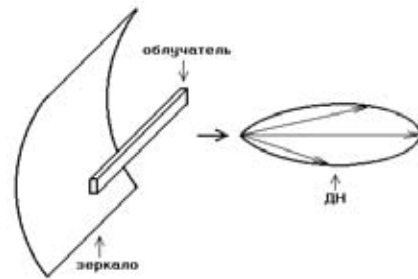


Рис. 2.22.17 Зеркало в виде параболического цилиндра

металлические, так и щелевые. Наиболее употребительны плоские прямоугольные антенны (рис. 2.22.18). Излучающий слой металла отделен от заземленной пластины слоем диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ . Прямоугольная антенна с точки зрения формирования электромагнитной волны эквивалентна открытому концу волновода (тех же размеров). Она имеет длину b и ширину a , и возбуждается либо с помощью коаксиальной линии, либо полосковым вводом в месте расположения пучности поля (центральная часть ширины пластины).

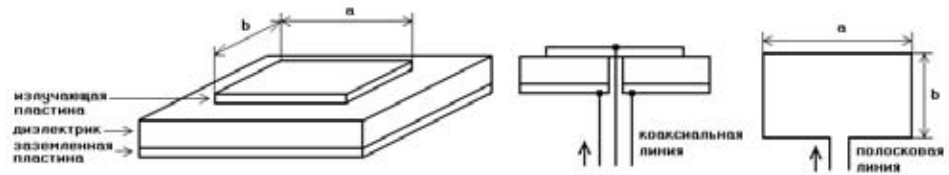


Рис. 2.22.18 Полосковая антенна

Параметры антенны выбираются из следующих условий: длина $b = \lambda/(2\epsilon^{1/2})$, ширина $a < \lambda/2$ уточняется по требуемой диаграмме направленности. КПД антенны невелик, он составляет $\eta = 0,5 \dots 0,8$ (в среднем – 0,65). Прямоугольная антенна имеет широкую ДН, ее углы составляют около $\theta_a = 1,1\lambda/a$, $\theta_b = 1,1\lambda/b$ (вдоль сторон a и b соответственно). Здесь проявляются неудобства, связанные с описанием ДН с помощью углов θ половинного ослабления энергии. Если плотность потока энергии почти не зависит от направления излучения, то величина θ может значительно превосходить угол π . Поэтому удобнее пользоваться выражением для коэффициента усиления антенны $G = \eta 4\pi ab/\lambda^2 \approx 8ab/\lambda^2$.

Широкая ДН антенны позволяет использовать ее в радиолучевых СО только на малых расстояниях между ПРД и ПРМ или в качестве облучателя зеркальной антенны. Особенностью полосковых антенн является их узкополосность, способность эффективно работать в ограниченном диапазоне частот, что здесь является скорее достоинством, чем недостатком. Антенну сложнее настроить, но она обеспечивает повышенную помехоустойчивость к электромагнитным наводкам. Данные антенны, благодаря широкой ДН, эффективны для применения в радиолокационных или радиометрических СО.

Описанные пять разновидностей антенн позволяют подобрать параметры источника или приемника излучения на любой вкус, с произвольной ДН. Общий вы-

вод — для сужения ДН в какой-либо плоскости необходимо увеличить линейный размер антенны $A_{\text{лин}}$ в этой же плоскости ($A_{\text{лин}} \approx \lambda/\theta$). Приведенные варианты антенн не исчерпывают все их типы. За бортом остались антенны поверхностных волн, спиральные, линзовые (с диэлектрическими линзами или линзами из металлических пластин). Они более сложны, но возможно — их будущее впереди.

От передающих устройств радиолучевых СО не требуется большая мощность. Вполне достаточные уровни непрерывного излучения находятся в пределах 0,01...1 Вт. Поэтому большинство передатчиков работает на диодах Ганна или биполярных транзисторах СВЧ диапазона, обеспечивающих максимальную простоту устройства. В верхней части СВЧ диапазона применяются лавинно-пролетные диоды (они требуют напряжения питания до 100 В), можно встретить генераторы на полевых СВЧ транзисторах. Необходимо сразу отметить, что частота излучения почти полностью определяется резонансной частотой того контура, в который включен элемент (диод или транзистор). Различные электрические параметры, такие как напряжение питания, позволяют лишь в небольших пределах корректировать частоту генератора.

Диод Ганна имеет вид небольшого керамического цилиндра с двумя жесткими металлическими выводами

на торцах. Через них на диод подается напряжение питания и производится отвод тепла. В ходе работы он может нагреваться до температуры 200°С. Конструкция диода позволяет встраивать его непосредственно в волновод (между широкими стенками) или другой металлический резонатор через специальные пружинные держатели, обеспечивающие надежный электрический и тепловой контакт. Один из выводов питания (общий или земляной) соединяется непосредственно с волноводом (резонатором), он же служит для отвода тепла. Напряжение питания на другой вывод подается через дроссельный ввод, препятствующий выходу СВЧ сигналов в цепи питания. Также существуют диоды Ганна в виде плоских дисков для встраивания в генераторы на полосковых элементах. Основные параметры некоторых диодов приведены в таблице 2.22.4. Некоторые из них (AA721A, AA722A, AA723A, AA724A) отличаются тем, что не требуют защиты от статического электричества.

Стартовый ток диода Ганна примерно в 1,5 раза превышает рабочий. Именно благодаря этой особенности диод переходит в генераторный режим. Максимум потребления приходится на напряжение на диоде 3...4 В, что необходимо учитывать при проектировании источника питания. Генераторы на диодах Ганна работают на частотах до 60 ГГц, перекрывая диапазон излучаемой мощности 0,01...1 Вт при КПД 1...6 %.

Таблица 2.22.4 Диоды Ганна

Название	Частота, ГГц	Излучаемая мощность, мВт	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, мА	Стоимость, руб.
AA721A	3,9...6	10...15	9...12	200...370	300
DC1203*	4...8	5...30	12	100...180	
DC1253*	4...8	50...200	14	400...900	
AA722A	5,6...8,2	10...15	8...11	200...370	150
3A705*	5,2...8,2	20...50	8...10	280...300	
MG1001...4	5,9...8,2	50...500	12	200...1300	
AA725	5...8,2	200...440	11	800...2000	180
DC1201*	8...12	5...30	8	145...200	
3A703A	8,2...12,5	10	8,5	270	150
AA723A	8,2...12,4	10...15	7...9	190...400	500
CXY11C	8...12	15	7	150	
CXY21	8...12	50	8	210	
DC1251*	8...12	50...500	10	250...1300	
MG1005...8	8,2...12	50...500	10	200...1600	
AA715*	8...12,5	100...500	9,5	500...1500	350...600
CXY19*	8...12	200...300	8...12	450...650	
MG1041...3	9,5...11,5	10...30	9...10	110...180	
DC1202*	12...18	5...30	6,5	140...200	
AA724A	11,7...17,9	10...15	5...7	250...420	250
DC1252*	12...18	50...300	7	300...900	
MG1009...12	12,4...18	50...500	8	300...1700	
AA726*	12...17	100...300	8,5	800...2000	
AA718*	17...40	25	4	1000...1200	250
MG1013...16	18...26,5	50...400	6	400...1700	
2A716*	18...26	150...350	6,3	900...2000	900
MG1058	23...25	10	5	300	
MG1045	23...25	10...20	8	150...200	
AA728*	26...37,5	50...80	3...4,5	750...1500	300
AA727*	37...54	100...150	2,5...4	700...1700	550

Простейший, но тем не менее, эффективный генератор на диоде Ганна состоит из самого диода, отрезка волновода подходящего сечения, короткозамыкающего поршня (плунжера) и дроссельного ввода (рис. 2.22.19). Диод устанавливается через широкие стенки волновода, выполняющего роль резонатора, определяющего частоту колебаний, и линии передачи излучения. Знак напряжения питания $U_{\text{пит}}$ зависит от того, какой из выводов диода Ганна служит для отвода тепла (в данном случае – положительный). Дроссельный ввод (четвертьволновой отрезок кабеля или LC-фильтр) блокирует выход СВЧ излучения в цепи питания. Короткозамыкающий поршень перемещается вдоль волновода с помощью вращения микрометрического винта. Конструкция поршня обеспечивает не только его надежный электрический контакт со стенками, но и отражение просачивающегося через щели излучения назад в волновод. Такой поршень называется дроссельным. Перемещение поршня позволяет настраивать генератор точно на заданную частоту. Сама частота определяется положением диода в пучности поля, то есть на расстоянии $\lambda/4$, $3\lambda/4$, ... от короткозамыкающего поршня. Параллельно диоду Ганна необходимо установить элементы защиты: стабилитрон VD1 на напряжение $(1,5...1,7)U_{\text{пит}}$ и конденсатор $C1 = 0,01$ мкФ. Приварив к волноводу антенну в виде пирамидального рупора, получим готовый передатчик радиолучевого СО, работающий в режиме непрерывного излучения. Для перехода на импульсный режим следует добавить низкочастотный генератор, управляющий импульсами подачи напряжения питания $U_{\text{пит}}$.

Настройка с помощью микрометрического винта – занятие утомительное. Если заменить его на обычный винт, то очень тяжело попасть на нужную частоту. Облегчить процесс настройки позволяет применение варакторного диода – аналога варикапа в диапазоне СВЧ. По внешнему виду он похож на диод Ганна. В диапазоне 10 ГГц имеются варакторные диоды АА603В (В,Г), АА607А, 3А614А, МР6301...МР6304, DC4301...DC4305, АНВ9500, АТ3000, ВХУ48, также много их разновидностей на другие диапазоны частот. Варакторный диод устанавливается на расстоянии $\lambda/2$ от диода Ганна, то есть в соседней пучности поля (рис. 2.22.20). Плунжер может входить в состав конструкции для предварительной грубой настройки частоты, или отсутствовать – если места установки диода Ганна и варакторного диода определены достаточно точно. Подача на варакторный диод постоянного управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ (через дроссельный ввод) меняет его параметры и слегка подправляет поле внутри волновода. В результате происходит корректировка частоты генератора примерно на величину 20 МГц/В. Обычно управляющее напряжение меняется от 0 до 10 В, что позволяет настраивать частоту в пределах 200 МГц, скажем, от 10,4 до 10,6 ГГц. Ток в управляющей цепи не превышает

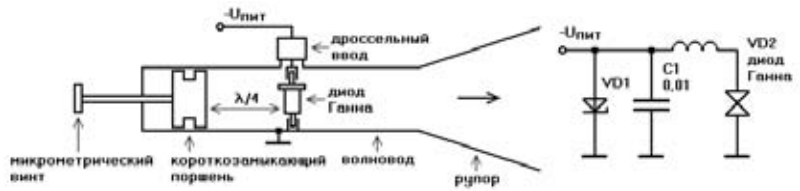


Рис. 2.22.19 Генератор на диоде Ганна

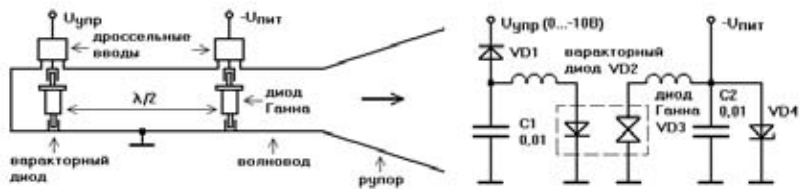


Рис. 2.22.20 Генератор на диоде Ганна, управляемый варакторным диодом

1 мА. Элементы VD1, VD4, C1, C2 служат для защиты диода Ганна VD3 и варакторного диода VD2.

Точный расчет узлов, собранных на диодах Ганна, затруднен, в частности, и из-за естественного разброса их параметров. Два передатчика, выполненных по идентичной технологии, могут иметь мощности, отличающиеся в два раза. Так что многие технические решения следует подтверждать экспериментально, а готовые приборы – проверять, отбраковывая неудачные образцы.

Полосковый генератор на диоде Ганна может быть выполнен на одной плате вместе с широконаправленной антенной (рис. 2.22.21). Диод Ганна при подаче напряжения питания $U_{\text{пит}}$ возбуждается на частоте, определяемой параметрами резонатора. Питание подается через дроссельную цепь, состоящую из полосковых элементов L1, C1, L2. Высокочастотный сигнал проходит в антенну через полосковый разделительный конденсатор C2.

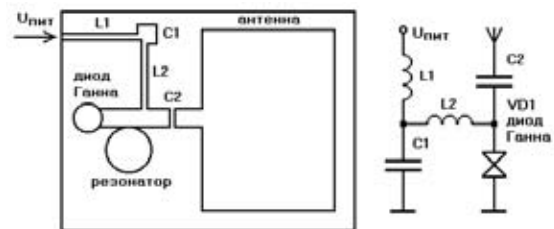


Рис. 2.22.21 Полосковый генератор на диоде Ганна

Транзисторные передатчики СВЧ диапазона строятся на основе схем автогенераторов, в состав которых входят резонансные элементы (отрезки волноводов, прямоугольные полосковые или щелевые антенны, диэлектрические резонаторы), определяющие частоту генерируемых колебаний (рис. 2.22.22). Они хорошо интегрируются с волноводными или плоскими антеннами. Приведенные на рисунке значения сопротивлений резисторов – ориентировочные для напряжения питания около $U_{\text{пит}} = 8...10$ В. Они могут варьироваться в зависимости от требуемой мощности излучения, выбранного типа транзистора и параметров антенн. В качестве фильтрующих элементов могут выступать дроссельные

вводы или сами проводники, по которым на транзисторы подаются напряжение питания и смещения.

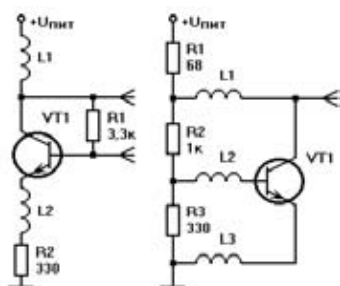


Рис. 2.22.22 Транзисторные генераторы СВЧ

Для подобных схем существуют специальные генераторные транзисторы, но их с успехом могут заменять усилительные транзисторы СВЧ диапазона (табл. 2.22.5). Большинство транзисторов имеет миниатюрный дисковый корпус с ленточными выводами в плоскости корпуса. Их удобно устанавливать на платы полосковых конструкций. Транзисторные генераторы обеспечивают излучение небольшой мощности 10...50 мВт, работают в нижней части СВЧ диапазона и эффективны совместно с антеннами широкой ДН. К ним нужны дополнительные элементы усиления и концентрации излучения в заданном направлении, что усложняет устройство ПРД по сравнению с генераторами на диодах Ганна. Транзисторные генераторы подходят для радиолокационных и радиометрических СО.

Таблица 2.22.5 Биполярные СВЧ при транзисторы

Название	Назначение	Максимальная частота, ГГц	Выходная мощность, мВт
КТ3120А	усилительный	2	20
КТ371А	усилительный	3	20
КТ372	усилительный	4	
1Т387Б-2	генераторный	4	50
КТ3101А-2	усилительный	4	20
1Т3113А-2	генераторный	4	50
ВFR91	усилительный	5	
АТ-41***	универсальные	6	
КТ391А-2	усилительный	7	
2Т3115Б-2	усилительный	7	20
КТ3132А-2	усилительный	7	
2SC3357	усилительный	7	
2Т3124Б-2	усилительный	8	
ВFQ33	усилительный	10	

Есть и еще один вариант построения передатчиков. При необходимости можно подобрать СВЧ генератор в виде готового модуля. Стандартный модуль имеет два вывода для подачи однополярного питания, вход управляющего напряжения и выход СВЧ сигнала. Частота выходного сигнала меняется в полтора-два раза. Она пропорциональна величине управляющего напряжения. Номенклатура генераторов, управляемых напряжением, (ГУН) многочисленна. Доступны модули под обычный или поверхностный монтаж. Например, генераторы

фирмы Mini-Circuits (серий POS***, ROS***) или Synergy Microwave (серий DCO***, DCYS***, MFC***) перекрывают диапазон частот от десятков мегагерц до 11 ГГц, обеспечивая выходную мощность 1...40 мВт (0...16 дБм). Широкий диапазон управляющих напряжений (10...20 В) гарантирует возможность точной настройки частоты выходного сигнала. При сравнительно небольших габаритах (10...20 мм) и умеренной стоимости (20...120 \$) модули обладают низкими значениями КСВ (1,2...2) и высоким КПД (0,02...0,08).

Основной узел приемника — это детектор, преобразующий СВЧ излучение в низкочастотный аналоговый сигнал, пропорциональный мощности падающего излучения. Детектор встраивается в конструкцию антенны, чтобы избежать потерь и без того ничтожной энергии на пути к преобразователю. Наиболее часто в качестве датчиков излучения используются детекторные диоды диапазона СВЧ, которые при простоте технических решений обеспечивают вполне удовлетворительные характеристики.

Детекторный диод, предназначенный для встраивания в волновод, имеет ту же конструкцию, что и диод Ганна: цилиндрический корпус из керамики и два жестких металлических вывода по бокам. Он встраивается в волновод в точках пучности поля, то есть на расстоянии $\lambda/4$, $3\lambda/4$, ... от закрытого конца волновода (рис. 2.22.23). Имеются также детекторные диоды с плоскими или проволочными выводами — для монтажа на платы с полосковыми элементами и антеннами.

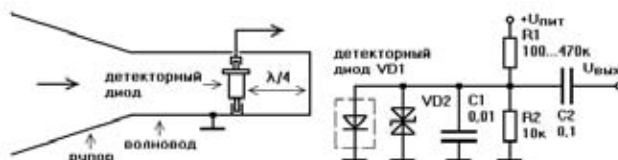


Рис. 2.22.23 Приемник на детекторном диоде

Поглощая энергию излучения, детекторный диод VD1 генерирует пропорциональный ток. Точковая чувствительность большинства детекторных диодов диапазона 10 ГГц находится в пределах от 0,5 до 5 А/Вт (или, как часто пишут, мкА/мкВт, что одно и то же, но более понятно). Двуханодный стабилитрон VD2 на несколько вольт и конденсатор C1 защищают детекторный диод от статического электричества. В случае работы в импульсном режиме используется разделительный конденсатор C2. Большинство детекторных диодов требует начального смещения по току, которое задается резистором R1 (100...470 кОм — в зависимости от напряжения питания $U_{пит}$). В среднем смещение должно составлять 30...40 мкА, но оно может быть установлено и ниже, и выше — от 10 мкА до 100 мкА. Повышение тока смещения сдвигает рабочую точку на ВАХ диода в сторону ее большей крутизны, то есть уменьшает дифференциальное сопротивление диода, а вместе с ним — и его чувствительность в единицах В/Вт. Среднее значение дифференциального сопротивления составляет 0,8...1,2 кОм (при токе смещения 30...40 мкА), ему соответствует чувствительность

(0,5...5) А/Вт × 1 кОм = (500...5000) В/Вт (или 0,5...5 мВ/мкВт). При изменении тока смещения дифференциальное сопротивление диода меняется от 300 Ом до 10 кОм, что позволяет регулировать чувствительность детектора в весьма широких пределах. Не следует слишком увлекаться повышением чувствительности за счет малых (менее 20...30 мкА) токов смещения (если это не оговорено специально в документации на диод), так как вместе с этим растут шумы и падает стабильность характеристик. При токе смещения 30...40 мкА уровень шумов на выходе детекторного диода составляет обычно около 1...3 мкВ.

В технической литературе можно встретить еще один показатель детекторных диодов — их тангенциальную чувствительность, которая соответствует уровню входной мощности, на 4 дБ (в 2,5 раза) превышающего минимальный детектируемый сигнал. Фактически это наименьший сигнал, который можно отчетливо наблюдать на фоне естественных случайных шумов. Обычно для высокочувствительных детекторных диодов тангенциальная чувствительность достигает — 56дБм (2,5 нВт). Это устанавливает уровень мощности собственных шумов детекторного диода (до 1 нВт).

В диапазоне 10 ГГц хорошие результаты обеспечивают детекторные диоды Д602, Д604, 2А202А, 2А203А, обладающие токовой чувствительностью 1,5...5 А/Вт (табл. 2.22.6). Многие смесительные диоды, такие как Д405А, Д408, 2А105, 2А118А (табл. 2.22.7), обеспечивают в режиме детектирования почти такие же значения характеристик, как детекторные диоды, и с успехом могут заменять последние в различных диапазонах частот.

Таблица 2.22.6 Детекторные диоды

Название	Частота, ГГц	Минимальная чувствительность, А/Вт
2А201А	до 4	6,5
Д603	до 5	4
HSMS-286*	до 6	5 (25000 В/Вт)
2А202А	4...10	2,5
АSI3486	до 10	7500 В/Вт
А2S263	до 10	8000 В/Вт
Д602	до 11	1,5
Д604	до 11	2,5
ADP900*	8...12,4	
2А203А	до 15	3,8
ADP160*	12,4...18	
HSCH-53**	до 26	6600 В/Вт

Пороговая чувствительность детекторных диодов лежит выше уровня тепловых шумов. При необходимости пороговая чувствительность ПРМ может быть улучшена за счет применения во входных цепях усилительных СВЧ транзисторов (табл. 2.22.5) или модульных усилителей (например, серий MGA-5***, MGA-6***, АВА-3*** производства Avago Technologies и подобных).

Вообще, в технике СВЧ есть много продуманных и законченных элементов и узлов — антенн, генераторов, усилителей, детекторов, согласующих линий. Чтобы получить готовое устройство, достаточно собрать их в

Таблица 2.22.7 Смесительные диоды

Название	Частота, ГГц	Минимальная чувствительность, А/Вт
2А102А	1...3	1,5
КА104	до 4	1
AMP300*	2...4	
Д408	3...7	2
АА111	до 10	0,5
АА112	до 10	0,5
2А105	4...10	1
Д405А	до 10	1,5
Д409А	до 10	1...2,5
5082-27**	8...12	6600 В/Вт
1N23	8...12,4	
1N415Е	8...12,4	
AMP900*	8...12,4	
HSMS8***	10...14	
2А107А	до 15	0,6
3А110	до 15	0,5
AMP160*	12,4...18	
2А118А	до 30	0,5

единое целое, добавить низкочастотный БО и подать питание.

Соберем радиолучевое СО из рассмотренных выше отдельных компонентов. В качестве ПРД используем генератор частотой 10 ГГц на диоде Ганна АА715В (рис. 2.22.19, 2.22.20) с выходной мощностью $W_{\text{ПРД}} = 100$ мВт, который встроен в прямоугольный волновод 23×10 мм, совмещенный с рупорной антенной из примера (раскрыв $A \times B = 210 \times 140$ мм, усиление $G = 300$). Используя в приемнике точно такую же антенну с детекторным диодом 2А202А, для диапазона длин участка $L = 5...100$ м получим оценку величины принимаемой мощности $W_{\text{ПРМ}} = W_{\text{ПРД}} \times (G\lambda/4\pi L)^2 = 5,1 \times 10^{-6}...2,0 \times 10^{-3}$ Вт. С учетом постоянного ослабляющего действия двух крышек, защищающих раскрывы антенн, (каждая по 1,5 дБ) и переменного — дождя, пыли, грязи (до 7 дБ) — получим окончательно диапазон мощности излучения, поступающего на вход приемного детекторного диода, $W_{\text{ПРМ}} = 0,5 \times 10^{-6}...1 \times 10^{-3}$ Вт. Он превышает порог чувствительности детектора (1 нВт). Следовательно, в принципе можно было бы либо снизить мощность излучателя, либо уменьшить размеры антенн, либо увеличить длину участка, хотя всегда лучше иметь запас, чем рассчитывать на благоприятное стечение обстоятельств. Установив слегка пониженный ток смещения диода около 20 мкА и соответствующую ему чувствительность 5 мВ/мкВт, получим на выходе детектора в дежурном режиме сигнал, равный $U_{\text{ВЫХ}} = 2,5$ мВ...5 В (в зависимости от L) при уровне собственных шумов в несколько микровольт. При непрерывной работе генератора это будет постоянный уровень, при импульсной — последовательность импульсов амплитудой $U_{\text{ВЫХ}}$. Естественно, максимальное значение будет менее 5 В, оно не превысит десятых долей вольта, так как реальная характеристика диода нелинейна, а чувствительность 5 мВ/мкВт соответствует минимальным уровням входной мощности. Вид полез-

ного сигнала (или его огибающей – в импульсном режиме работы) будет соответствовать рис. 2.22.3.

Теперь не составляет труда изобразить блок-схему всего радиолучевого СО в целом (рис. 2.22.24). Сигнал с выхода СВЧ детектора (СВЧ-Д) поступает на усилитель с переменным управляемым коэффициентом усиления $K_{УС} = 1...2000$. С его выхода – на детектор огибающей (ДО) – конечно, если сигнал импульсный. Сигнал с выхода ДО управляет значением $K_{УС}$ таким образом, чтобы в дежурном режиме на выходе ДО устанавливался постоянный уровень, примерно равный половине напряжения питания (4...5 В). Если уровень повышается, то $K_{УС}$ уменьшается и наоборот. Постоянная времени АРУ составляет 20...40 с, чтобы подстраиваться под медленные естественные изменения уровня сигнала. Полосовой фильтр (ПФ) пропускает полезные сигналы в диапазоне, соответствующем ожидаемым длительностям выбросов полезного сигнала. Длительности выбросов оцениваются путем анализа зон Френеля. Компаратор (К1) срабатывает, если наблюдается выброс с глубиной модуляции больше заданной $m_{ПОР}$, а его длительность превышает минимально возможную. Величина $m_{ПОР}$ устанавливается в пределах $m_{ПОР} = 0,2...0,9$ в зависимости от длины участка L (чем больше L , тем меньше $m_{ПОР}$, – как следует из анализа зон Френеля). При необходимости может быть введена цепь автоматической установки порога $m_{ПОР}$ в зависимости от величины $K_{УС}$ АРУ, который пропорционален L . Срабатывание К1 активирует реле тревоги (РТ). Если сигнал U_0 на выходе ДО отсутствует в течение длительного времени (более, чем время отработки АРУ), это говорит либо о неисправности ПРД или СВЧ-Д, либо об умышленном воздействии на СО. Тогда срабатывает компаратор (К2), контролирующей наличие огибающей, а он – инициирует размыкание РТ на весь период отсутствия огибающей. На анализ уходит значительное время, его можно сократить, если принимать решение сразу при достижении $K_{УС}$ максимального значения (при отсутствии требуемого уровня на выходе ДО). И наконец, должна быть предусмотрена цепь отключения (О) АРУ на время регулировки и настройки блоков, иначе не удастся найти их оптимальной ориентации.

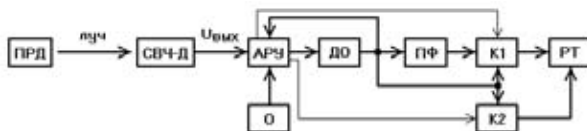


Рис. 2.22.24 Блок-схема радиолучевого СО

Основные достоинства радиолучевых СО:

- высокая помехоустойчивость при воздействии различных метеорологических факторов: осадков, ветра, тумана, давления, температуры;
- высокая помехоустойчивость к воздействию различных электромагнитных помех и наводок от промышленных и производственных машин и механизмов, частоты которых лежат ниже диапазона СВЧ;

- отсутствие срабатываний при передвижении в ЗО мелких животных;
- маскируемость; хотя антенны передатчика и приемника, размещаемые на концах участка, выступают над поверхностью земли, сама ЗО явно не видна и ничем не обозначена; при установке в парковых, музейных или административных зонах стойки с передатчиками и приемниками без труда камуфлируются под окружающие предметы, урны, фонари, таблички;
- низкая стоимость аппаратуры;
- постоянный контроль исправности всех блоков СО;
- простота монтажа и последующего обслуживания.

Основные недостатки радиолучевых СО:

- возможность установки только на прямолинейных участках; если рубеж охраны состоит из нескольких прямолинейных отрезков, то на каждый отрезок понадобится отдельное СО;
- необходимость выравнивания участков перед установкой СО, в том числе в горизонтальной плоскости; привлечение строительной техники увеличивает затраты на этапе монтажа; отклонение от прямой линии по высоте более 0,5 м на длине участка 100 м, практически незаметное на глаз, может привести к появлению мертвой зоны, достаточной для беспрепятственного прохода человека; высота или глубина неровностей не должна превышать 0,3...0,5 м;
- наличие травы или растительности в ЗО может приводить к ложным срабатываниям в ветреную погоду;
- снежный покров поднимает траекторию движения нарушителя над зоной обнаружения датчика; необходимо либо убирать выпавший слой снега либо поднимать приемники и передатчики на стойках с последующей юстировкой; стойки должны иметь запас высоты, соответствующий ожидаемому уровню снега;
- наличие мертвых зон вблизи от передатчика и приемника – для передвижения согнувшись; если длина охраняемого рубежа превышает дальность отдельного СО, то их следует устанавливать с перекрытием;
- необходимость тщательной юстировки направленности передатчика и приемника, от которой во многом зависит устойчивость работы СО.

Типичное радиолучевое СО обладает следующими показателями. Длина участка – до 100...500 м; ширина ЗО в середине участка – до 2...5 м; вероятность обнаружения – 0,95...0,98; время наработки на ложную тревогу – 200...1000 часов; время наработки на отказ – 10...60 тыс. часов; частота излучения – 9...18 ГГц; напряжение питания – 10...30 В; потребляемый ток – 20...150 мА; рабочая температура – от минус 50°С до плюс 50°С; погонная стоимость аппаратуры (без монтажа, при максимальной длине участка) – 90...900 руб./м (3...30 \$/м).

2.23. Радиолокационные СО

Радиолокационные СО относятся к обширному классу приборов, работающих в диапазоне СВЧ электромагнитных волн (0,3...300 ГГц). Они называются также микроволновыми доплеровскими, радиоволновыми доплеровскими, радиоволновыми однопозиционными, СВЧ доплеровскими или просто доплеровскими датчиками или извещателями. Можно встретить название объемное радиоволновое однопозиционное СО, или просто радар. Серьезное средство с большой зоной обнаружения и экраном для отображения обстановки уважительно именуется радиолокационной станцией (РЛС). Принцип действия радиолокационного СО основан на известном эффекте Доплера, заключающемся в изменении частоты электромагнитной волны при ее отражении от движущегося объекта.

Радиолокационное СО состоит из излучателя (И), приемного детектора или смесителя (СМ) и блока обработки (БО) (рис. 2.23.1). Излучатель генерирует электромагнитную волну с постоянной частотой f . На вход СМ поступает небольшая часть этого излучения в качестве опорного сигнала. Доля отводимой мощности определяется конструкцией датчика. Одновременно на вход СМ приходит излучение, отраженное от окружающих предметов. Если все предметы неподвижны, то частоты обоих сигналов совпадают и на выходе смесителя устанавливается постоянный уровень. Если вблизи от датчика появляется объект обнаружения (ОО), приближающийся (или удаляющийся) со скоростью v , то на вход СМ поступает отраженная электромагнитная волна с частотой, большей (или меньшей) на величину доплеровского сдвига Δf по сравнению с опорной. В результате на выходе смесителя появляется сигнал биений с разностной частотой Δf , который поступает на БО для анализа и принятия решения.



Рис. 2.23.1 Радиолокационное СО

Радиолокационное СО относится к числу активных. Его составные части (И, СМ, БО) обычно размещаются в общем корпусе. Благодаря этому получается однопозиционное СО, удобное для монтажа и настройки. Радиолокационные СО предназначены в основном для установки в помещениях, так как на улице их работе мешает большое количество подвижных предметов, создающих повышенный уровень помех. Небольшое количество внешних радиолокационных СО используется преимущественно в безлюдных местностях вдали от поселений людей. Радиолокационные СО – объемные. Широкая диаграмма направленности и дальность обнаружения 10...15 м вполне подходят для охраны помещений средних размеров.

Радиолокационные СО относятся к маскируемым средствам. Небольшая коробочка на высоте 2...2,5 м не привлекает внимания, а при необходимости может

быть закамуфлирована радиопрозрачным материалом под какой-либо окружающий предмет: картину, светильник, вентиляционную решетку. Предусмотренный на корпусе светодиод, дублирующий сигнал срабатывания, облегчит установку нужной ориентации СО и требуемого уровня чувствительности (дальности обнаружения). При небольшом уровне излучаемой мощности (несколько десятков милливольт) они обладают низким энергопотреблением, которое еще более снижается в случае импульсного режима работы излучателя. По этой же причине радиолокационные СО безопасны для человека. Учитывая малую стоимость радиолокационных СО, легко понять, почему они широко используются для охраны помещений во всем мире.

Многие узлы радиолокационных СО имеют сходство с аналогичными узлами радиолучевых СО. И там и здесь есть генераторы СВЧ, передающие и приемные антенны, да и смеситель аналогичен по своему устройству детектору. Большинство детекторных диодов диапазона СВЧ обеспечивает примерно те же показатели, что и смесительные, если подать на них опорный сигнал; они взаимозаменяемы. Существенное отличие от радиолучевых СО состоит в том, что в радиолокационных СО используются антенны с широкой диаграммой направленности (ДН), позволяющей покрывать значительную часть помещения. Угол ДН в горизонтальной плоскости $\theta_{\text{гор}} = \pi/3 \dots \pi$, в вертикальной – $\theta_{\text{верт}} = \pi/3 \dots \pi/2$ в зависимости от предполагаемого места установки. В коридоре может потребоваться СО с более узкой ДН. Передающая и приемная антенны имеют одинаковую конструкцию. Бывают даже радиолокационные СО с одной общей антенной для излучения и приема.

Величина доплеровского сдвига определяется выражением $\Delta f = 2v/\lambda$, где v – радиальная составляющая скорости ОО (проекция скорости на радиус, проведенный из точки расположения датчика в направлении ОО), λ – длина волны излучения в метрах, $\lambda = c/f$, c – скорость света, $c = 3 \times 10^8$ м/с, f – частота излучения в герцах. Специально для радиолокационных СО выделены определенные частоты (табл. 2.23.1). Работа на

Таблица 2.23.1 Частоты радиолокационных СО

Частота, ГГц	Страна	Назначение
9,470	Германия	Радиолокационные СО
9,900	Франция	Радиолокационные СО
10,525	США, Голландия, Бельгия, Италия	Радиолокационные СО
10,525±0,025	Многие страны	Уличные полицейские радары
10,587	Великобритания	Радиолокационные уличные СО
10,687	Великобритания	Радиолокационные СО для помещений
24,150±0,100	Многие страны	Уличные полицейские радары

выделенных частотах позволяет избежать взаимного влияния СО и различных средств связи. Некоторые радиолокационные СО работают на более низких частотах от 1 ГГц или на более высоких – до десятков гигагерц. Для стандартной частоты $f = 10$ ГГц ($\lambda = 0,03$ м) и скоростей $v = 0,3...5$ м/с диапазон доплеровских частот составляет $\Delta f = 2v/\lambda = 20...300$ Гц. В него попадают наводки от электрической сети (50 и 100 Гц).

Радиолокационное СО в простейшем случае проводит селекцию объектов по скорости передвижения и формирует сигнал тревоги в случае появления сигнала биений в диапазоне $\Delta f = 20...300$ Гц. Однако отраженная волна содержит информацию не только о доплеровском сдвиге. Используя амплитудные характеристики и время задержки отраженного импульса, можно проводить оценку размеров объекта и дальности до него. Поскольку основная селекция осуществляется по скорости, СО с дополнительными возможностями все равно традиционно называются доплеровскими.

В состав излучателя входят СВЧ генератор и антенна. Генератор может быть выполнен на диоде Ганна, СВЧ транзисторе или готовом модульном генераторе. Антенна может быть вибраторной, рупорной, шелевой, зеркальной или микрополосковой. Зеркальные антенны с узкой ДН подходят для радиолокационных СО, устанавливаемых на улице или в узких коридорах. Различные варианты построения генераторов, антенн, а также приемных СВЧ устройств были рассмотрены ранее в разделе радиолучевых СО. Кроме этого, имеются готовые доплеровские СВЧ модули волноводной или планарной конструкции, включающие в свой состав передатчик и приемник, которые согласованы между собой по частоте излучения и уровню отводимого опорного сигнала, например, MDU1900, MDU1020, MDU1420, MO86728, MO9061 фирмы Microsemi. Подав на модуль питание, можно снимать с его выхода низкочастотный сигнал доплеровской частоты.

Радиолокационное СО характеризуется высокой помехоустойчивостью, особенно при отсутствии в ЗО движущихся предметов. Однако, ему присущи ложные срабатывания от ряда помеховых факторов, что необходимо учитывать при установке СО. Основной источник помех – любые подвижные предметы интерьера. К ним относятся шторы (особенно металлизированные), жалюзи, вентиляторы, домашние животные, незакрепленные форточки, различные механизмы с открытыми движущимися частями. Их влияние проявляется в наибольшей мере при значительной площади объектов, когда скорость их перемещения попадает в диапазон скоростей человека. Отрицательное действие может произвести и вибрация стен с частотой, близкой к доплеровской. Для ослабления влияния помеховых факторов необходимо жестко закреплять СО на стене, фиксировать подвижные предметы обстановки, включать механизмы перед постановкой помещения под охрану, удалять из помещений животных и не направлять ЗО на движущиеся предметы.

Еще один источник ложных срабатываний – всевозможные наводки. Наводки от электрической сети (50 Гц) обычно имеют небольшую величину и не ска-

зываются на работе СО, поскольку в нем отсутствуют длинные проводники, играющие роль антенн. Гораздо сильнее влияние люминесцентных ламп. Они питаются выпрямленным сетевым напряжением, пульсирующим с частотой 100 Гц. Светящийся столб газа в лампе фактически зажигается и гаснет 100 раз в секунду. Мерцание со столь высокой частотой незаметно для глаза, но оно вызывает модуляцию СВЧ излучения частотой, попадающей в диапазон доплеровских частот. Многие помещения не допускают полного выключения света. Необходимо не только дежурное освещение, но и освещение для видеокamer, аквариумных рыбок и других непредвиденных нужд. Переход на более низкие или более высокие частоты излучения с целью сдвига диапазона Δf также проблематичен. Наводки от ламп дневного света эффективно подавляются с помощью режекторных фильтров, которые встраиваются в цепи усиления БО и подавляют сигналы с частотой ровно 100 Гц.

Серьезное влияние на работу радиолокационных СО оказывает проницаемость различных материалов на частотах СВЧ излучения. Коэффициент отражения от кирпичных и железобетонных стен находится в пределах $0,3...0,6$. Они являются серьезным препятствием для электромагнитных волн небольшой мощности. В то же время, значительная доля излучения свободно проходит сквозь тонкие гипсокартонные перегородки, деревянные двери, стекла, шторы и затем возвращается обратно. Проницаемость тонких легких материалов увеличивается с уменьшением угла падения. Это приводит к возможности ложных срабатываний от передвижения людей по коридору мимо охраняемой комнаты, от потоков дождевой воды по оконному стеклу или воды, текущей по пластмассовой трубе. Для сокращения числа ложных срабатываний в подобных ситуациях не следует направлять СО на близлежащие окна и двери. В крайнем случае необходимо закрывать проблемные поверхности металлической сеткой с размером ячейки менее $0,7\lambda$, экранирующей электромагнитные волны. Проницаемость легких материалов может быть использована на благо. Она позволяет маскировать радиолокационные СО, прикрывая их пластиком, пенопластом, материей. Установив датчики на капитальные стены выставочного зала, можно свободно менять и перемещать стенды и экспозиции, если они не содержат металлических конструкций большой площади.

Опорный сигнал, необходимый для работы смесителя, не должен быть ни слишком слабым, ни слишком сильным. Если его мощность будет велика, то смеситель просто захлебнется и не выдаст нужного сигнала биений. Поэтому следует избегать вариантов установки радиолокационного СО вблизи от крупных поверхностей, отражающих излучение назад на СО.

Радиолокационные СО работают на одной несущей частоте, а значит, также влияют друг на друга. Их следует максимально разносить и не направлять на соседние датчики при установке в одном помещении. Это должно учитываться при выборе количества используемых СО и мест их установки.

На улице количество помеховых факторов возрастает. Здесь постоянно передвигаются посторонние люди, автомобили, животные, птицы, работают машины и механизмы, да еще идет дождь, снег, проносятся пыльные бури. Их невозможно выключить или загородить от них экраном. Поэтому внешние СО сложнее внутренних и стоят дороже.

Перейдем к анализу уровней полезных и помеховых сигналов. При удалении ОО от радиолокационного СО величина отраженного сигнала падает. Дальность обнаружения R нельзя увеличивать безгранично. В какой-то момент отраженный сигнал ослабевает настолько, что теряется на фоне естественных шумов. Оценим потенциальные возможности радиолокационного СО. Обозначим мощность излучения, подводимого к передающей антенне, за $W_{\text{прд}}$; обычно $W_{\text{прд}} = 0,01 \dots 0,1$ Вт. Тогда плотность потока энергии в точке нахождения ОО составит $P_{\text{чел}} = \eta_{\text{прд}} W_{\text{прд}} / (\Omega R^2)$, где $\eta_{\text{прд}}$ – КПД антенны, $\eta_{\text{прд}} \approx 0,5$, Ω – телесный угол, в пределах которого распространяется энергия излучения. Мощность, переотражаемая человеком, $W_{\text{чел}} = P_{\text{чел}} \times \sigma$, где σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) человека, $\sigma = 0,5$ м². После отражения волна распространяется во все стороны. Плотность потока энергии в точке приема $P = W_{\text{чел}} / (4\pi R^2)$. Принимаемая мощность $W_{\text{прм}} = \eta_{\text{прм}} P S$, где $\eta_{\text{прм}}$ – КПД приемной антенны, $\eta_{\text{прм}} \approx 0,5$, S – площадь раскрытия приемной антенны. Окончательно $W_{\text{прм}} = \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{прм}} W_{\text{прд}} \sigma S / (4\pi \Omega R^4)$. С учетом выражений для коэффициентов усиления антенн $G = \eta 4\pi / \Omega$ и $G = \eta 4\pi S / \lambda^2$ получим то же соотношение в симметричном виде $W_{\text{прм}} = W_{\text{прд}} G^2 \lambda^2 \sigma / ((4\pi)^3 R^4)$, известное как основное уравнение радиолокации.

Следует отметить сильную степень убывания $W_{\text{прм}}$ с ростом R , что резко ограничивает возможность увеличения дальности действия радиолокационных СО объемного типа. Для ее увеличения в два раза необходимо или повышать мощность передатчика в 16 раз, или сужать ДН в 4 раза. Значения принимаемой мощности для $\lambda = 0,03$ м, минимальной величины $G = 2$ и дальности $R = 10$ м лежат в диапазоне $W_{\text{прм}} = 9 \times 10^{-13} \dots 9 \times 10^{-12}$ Вт. Он вплотную приближается к области тепловых шумов. Уровень принимаемого излучения настолько низок, что необходимо следить за каждым децибелом теряемой мощности, используя для этого все средства: тонкий радиопрозрачный корпус, строго согласованную ДН, удачный выбор места установки.

Оценка уровня сигналов на выходе смесительного диода радиолокационного СО несколько отличается от оценки уровня на выходе детекторного диода радиолучевого СО. Дело в том, что смесительный диод является нелинейным элементом, перемножающим входные сигналы. Один из них – отраженный. Другой – опорный – поступает с излучающей антенны по эфиру. Его мощность составляет около 10...30 мкВт. Она достаточна для того, чтобы при взаимодействии с более слабым сигналом, сдвинутым по частоте, возникли биения на частоте сдвига Δf ощутимой амплитуды. Опорный сигнал (без отраженного) вызывает на выходе смесительного диода выходной сигнал около $U_{\text{см}} = (10 \dots 30 \text{ мкВт}) \times (5000 \text{ В/Вт}) = 50 \dots 150 \text{ мВ}$. Если значи-

тельно уменьшить опорный сигнал, то понизится чувствительность смесителя; если увеличить – он войдет в насыщение.

На смесительный диод подается такой же ток смещения, как и на детекторный (30...40 мкА), и схемы их включения идентичны (рис. 2.22.23). Величина возникающих на выходе смесителя биений $U_{\text{см}}$ пропорциональна амплитуде (корню квадратному из мощности) принимаемого отраженного излучения, поэтому $U_{\text{см}} = K_{\text{см}} (W_{\text{прм}})^{1/2}$, где $K_{\text{см}}$ – коэффициент пропорциональности. Он зависит от типа смесительного диода и уровня опорного сигнала, его можно регулировать, повышая или понижая ток смещения. При выбранных условиях величина коэффициента на частотах около 10 ГГц примерно равна $K_{\text{см}} = 40 \text{ В/Вт}^{1/2}$. Уровень собственных шумов на выходе смесительного диода составляет 1...3 мкВ.

В качестве примера оценим параметры радиолокационного СО для охраны небольшого помещения (гаража) размером 6×4 м, считая, что датчик будет установлен в центре задней стены на высоте 2...2,5 м (выше автомобиля) и направлен на ворота. Выберем рабочую частоту $f = 10$ ГГц ($\lambda = 0,03$ м), а в качестве излучающей и приемной антенн – заглушенные с одной стороны отрезки прямоугольного волновода сечением 23×10 мм, снабдив их рупорами подходящих размеров. На роль излучающего элемента возьмем генератор на диоде Ганна AA723A (рис. 2.22.19, 2.22.20) с выходной мощностью $W_{\text{прд}} = 0,015$ Вт, смесительного – приемник на AMP9003-51 (рис. 2.22.23).

Закрепим вместе оба волновода короткими сторонами друг к другу и установим общий рупор (рис. 2.23.2). Размеры рупора определяются требуемой ДН. В данном случае $\theta_A = \theta_B \approx 6 \text{ м} / 6 \text{ м} = 1$. Тогда размеры половины рупора $A = 1,4\lambda / \theta_A = 42$ мм, $B = 0,92\lambda / \theta_B = 28$ мм, $L_p = A^2 / 3\lambda = 20$ мм (так как $B^2 / 2\lambda = 13 \text{ мм} < 20 \text{ мм}$). Усиление антенны $G = \eta 4\pi AB / \lambda^2 \approx 9AB / \lambda^2 \approx 10$, поскольку КПД короткого рупора примерно равен $\eta \approx 0,7$. Принимаемая мощность для расстояний $R = 1 \dots 6$ м составит $W_{\text{прм}} = W_{\text{прд}} G^2 \lambda^2 \sigma / ((4\pi)^3 R^4) = 0,26 \times 10^{-9} \dots 0,34 \times 10^{-6}$ Вт. Сигнал на выходе смесительного диода будет находиться в диапазоне $U_{\text{см}} = 40 \times (W_{\text{прм}})^{1/2} = 6 \times 10^{-4} \dots 24 \times 10^{-3}$ В. Вероятный диапазон полезных сигналов следует несколько расширить, учтя ослабляющее влияние крышки, закрывающей раскрыт антенны, естественный разброс параметров элементов, необходимый запас для регулировки СО, нелинейность характеристик и различные отклонения показателей от заданной модели обнаружения. Тогда диапазон выходных сигналов может быть принят равным $U_{\text{см}} = 0,1 \dots 30$ мВ при уровне шумов 1...3 мкВ.

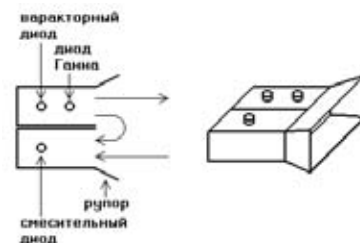


Рис. 2.23.2 Антенна радиолокационного СО

Отсутствие перегородки между раструбами излучателя и приемника обеспечивает просачивание опорного сигнала мощностью около 10 мкВт на вход смесительного диода. При установке на рупор защитной крышки из пластика или пенопласта мощность опорного сигнала может несколько возрасти за счет отражения (при этом и частота генератора также может слегка измениться). Проверка наличия и величины опорного излучения проводится путем включения передатчика. При этом на выходе смесительного диода (работающего без отраженного сигнала в режиме детекторного диода) появится постоянный уровень $U_{CM} = 50 \dots 150$ мВ в зависимости от интенсивности опорного сигнала. Измерение и настройка частоты излучения, полосы частот и уровней побочных излучений требует использования сложной и дорогостоящей аппаратуры.

Рассмотренную антенную систему (рис. 2.23.2) дополняет блок-схема радиолокационного СО (рис. 2.23.3). Излучатель (И) формирует электромагнитную волну и направляет ее в окружающее пространство. Смеситель (СМ) принимает отраженную и опорную волну и преобразует их в сигнал биений U_{CM} . Первый усилитель (У1) имеет постоянный коэффициент усиления $K_{УС} = 200$, так чтобы максимально возможный сигнал $U_{CM} = 30$ мВ после усиления не превысил напряжения питания и не возникли нелинейные искажения. Одновременно У1 фильтрует сигнал в полосе доплеровских частот $\Delta f = 20 \dots 300$ Гц. Далее находится режекторный фильтр (РФ) на частоту 100 Гц, подавляющий помеховые воздействия от ламп дневного света. Затем сигнал усиливается еще в 1...300 раз вторым усилителем (У2). На его выходе минимальный ожидаемый сигнал $U_{CM} = 0,1$ мВ доводится почти до уровня напряжения питания. Данный усилитель также фильтрует сигналы в полосе $\Delta f = 20 \dots 300$ Гц. Он имеет регулируемый коэффициент усиления, чтобы настроить прибор на требуемую дальность обнаружения. Детектор огибающей (ДО) превращает периодический сигнал биений с частотой $\Delta f = 20 \dots 300$ Гц в один непрерывный импульс, соответствующий интервалу движения нарушителя. Компаратор (К) с порогом около 4 В (половина напряжения питания) срабатывает, если длительность импульса превышает заданное пороговое значение $\tau_{ПОР}$. Регулировка $\tau_{ПОР}$ в пределах 0,1...2 с позволяет настроить чувствительность прибора на желаемую степень активности нарушителя или на количество шагов, которое должно приводить к формированию сигнала тревоги. Выбор $\tau_{ПОР}$ связан также с наличием в охраняемом помещении подвижных предметов, способных стать источниками ложных срабатываний при установке слишком низкого значения $\tau_{ПОР}$. Компаратор активирует РТ.



Рис. 2.23.3 Блок-схема радиолокационного СО

Достоинства радиолокационных СО:

- соответствие ЗО размерам и форме типичных офисных и жилых помещений; возможность на-

стройки дальности в соответствии с действительным размером комнаты; объемная ЗО позволяет обнаруживать нарушителя при его передвижении в любой точке помещения, а не только при входе в дверь или окно;

- высокая вероятность обнаружения;
- высокая помехоустойчивость СО; оно нечувствительно ко многим воздействиям, влияющим на работу СО других типов, — электромагнитным, тепловым, акустическим, механическим; радиолокационные СО по сравнению с широко распространенными ИК пассивными СО устойчивы к колебаниям температуры и потокам воздуха;
- простота, дешевизна, надежность, компактность, высокая степень маскируемости;
- предельная простота монтажа, настройки и проверки работоспособности;
- минимальные затраты на обслуживание радиолокационных СО;
- безопасность для окружающих; мощность излучателя обычно не превосходит 100 мВт, а плотность потока энергии уже на расстоянии 10 см — не более 1 мВт/см²; в импульсном режиме работы среднее значение плотности — еще меньше; работающее радиолокационное СО гораздо безопаснее для окружающих, чем сотовый телефон;
- возможность проведения полного контроля работоспособности, благодаря активному принципу действия.

Недостатки радиолокационных СО:

- наличие мертвых зон, теней или зон нечувствительности за крупными металлическими предметами (шкафами, стеллажами, сейфами); электромагнитное излучение не в состоянии огибать экранирующие препятствия, размеры которых превышают длину волны λ ;
- необходимость установки значительного количества датчиков в помещениях большого объема;
- ЗО может выходить за пределы помещения (через легкие перегородки в смежные комнаты, через окна на улицу или через тонкие деревянные двери в коридор); это может стать источником ложных срабатываний при перемещении людей по коридору, примыкающему к охраняемому помещению, или по улице под окнами первого этажа;
- обнаружение радиальной составляющей скорости нарушителя, из которого следует необходимо направлять СО на те самые фанерные двери;
- необходимость установки СО на удалении от крупных отражающих предметов, меняющих форму ЗО;
- ограниченная возможность использования в помещениях с рядом специфических помеховых воздействий и факторов: вращающихся вентиляторов, домашних животных, крупных подвижных жалюзи и штор;
- снижение помехоустойчивости при работе на улице.

Радиолокационное СО характеризуется следующими средними значениями показателей: дальность ЗЧ – 10...15 м (максимальная в помещениях – до 50 м, на улице – до 1000 м); угол ДН – 60...100 градусов; контролируемая площадь – 150 м²; контролируемый объем – 400 м³; диапазон обнаруживаемых скоростей перемещения – 0,3...3 м/с; напряжение питания –

10...15 В; потребляемый ток – 20...30 мА (для комнатных СО повышенной дальности – до 100 мА, для уличных – до 500 мА); диапазон рабочих температур – от минус 40...0°С до плюс 40...60°С; габариты – (70...100)×(50...90)×(30...60) мм; масса – 70...200 г; цена – 600...3000 руб. (20...100 \$), для комнатных СО повышенной дальности или для уличных – 10000...30000 руб. (300...1000 \$).

2.24. Радиометрические СО

Радиометрические СО, так же как радиолучевые и радиолокационные, работают с электромагнитными волнами диапазона СВЧ (0,3...300 ГГц). Они могут носить название объемных микроволновых СО, объемных радиотехнических СО, объемных радиоволновых двухпозиционных СО или амплитудно-модуляционных СО (в отличие от радиолокационных доплеровских, называемых в этом случае частотно-модуляционными СО). В основе их принципа действия лежит заполнение объема помещения стоячими волнами с помощью излучателя с широкой диаграммой направленности (ДН). Приемник с аналогичной широкой ДН контролирует уровень излучения, который при передвижении нарушителя в охраняемом объеме начинает периодически увеличиваться и уменьшаться в связи с вызываемым им смещением узлов и пучностей поля.

Радиометрические СО являются внутренними, для их работы требуются стены или другие поверхности большой площади, отражающие излучение и формирующие стоячие волны в направлении движения нарушителя. Они относятся к активным двухпозиционным маскируемым. Охраняемое одним СО помещение может иметь объем до 10000 м³ (большой концертный зал), причем это именно объем, а не внешняя поверхность или периметр. Радиометрические СО обладают высокой помехоустойчивостью. Несмотря на это, они имеют ограниченное применение, так как больших помещений немного, а в небольших они проигрывают тем же радиолокационным по стоимости и сложности монтажа.

Радиометрическое СО состоит из излучателя (И), СВЧ детектора (Д) и блока обработки (БО) (рис. 2.24.1). Излучатель может называться передатчиком, а детектор – приемником. Излучатель управляется блоком обработки, он посылает в эфир короткие импульсы излучения длительностью 10...500 мкс. Более продолжительные импульсы ведут к излишнему расходу энергии, более короткие не позволяют использовать в БО недорогие ОУ общего применения и цифровые КМОП микросхемы стандартной логики. Время между импульсами (1...10 мс) выбирается таким образом, чтобы не пропустить информацию о передвижении ОО при его максимальной скорости. Импульсный режим работы позволяет организовать синхронную обработку сигналов с выхода Д, а также дает возможность поочередного выхода в эфир разных И при ра-

боте нескольких СО в одном помещении (или в смежных помещениях).

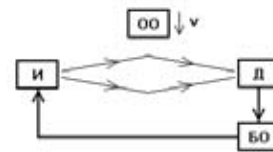


Рис. 2.24.1 Радиометрическое СО

Радиометрическое СО имеет большое сходство с радиолучевым СО. Отличие состоит в использовании широконаправленных антенн, которые устанавливаются, к тому же, не напротив друг друга, а со смещением (рис. 2.24.2), для лучшего заполнения объема стоячими волнами и обеспечения равномерной чувствительности. Имеются даже радиометрические СО, которые при замене антенн на узконаправленные превращаются в радиолучевые. В радиометрических СО лишь незначительная часть излучения достигает Д напрямую, так что нарушитель всегда движется в дальних зонах Френеля, поэтому глубина модуляции полезного сигнала m значительно ниже, чем в радиолучевых СО. Она находится в пределах от единиц до десятков процентов.

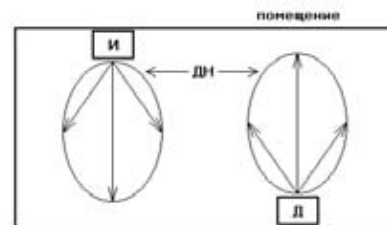


Рис. 2.24.2 Размещение блоков радиометрического СО

На каких частотах может работать радиометрическое СО? Тело человека должно устойчиво влиять на картину распределения стоячих волн, поэтому длина волны излучения λ (а точнее – расстояние $\lambda/2$ между пучностями или узлами) не должна превышать характерные размеры человека в горизонтальной плоскости (0,2...0,6 м). Следовательно, радиометрические СО будут эффективны в диапазоне длин волн $\lambda < 0,4$ м или частот $f > 0,75$ ГГц.

Оценим уровни сигналов в радиометрических СО. Значение принимаемой мощности дает соотношение, полученное для радиолучевых СО, $W_{\text{прм}} = W_{\text{прд}} \times (G\lambda / 4\pi L)^2$. Положим для определенности длину волны $\lambda = 0,1$ м (частота $f = 3$ ГГц), а расстояние между И и Д $L = 5 \dots 20$ м (для помещений объемом от $5 \times 5 \times 3 = 75$ м³ до $20 \times 20 \times 10 = 4000$ м³). Значение коэффициента усиления G следует считать примерно равным $G = 2$, так как антенны имеют широкую ДН, а кроме того, И и Д размещаются не в направлении максимального излучения. Для значений мощности передатчика $W_{\text{прд}} = 30 \dots 50$ мВт получим $W_{\text{прм}} = 1,9 \times 10^{-8} \dots 5,0 \times 10^{-7}$ Вт. Формула для принимаемой мощности справедлива в открытом пространстве. В помещении принимаемая мощность может возрасти примерно в два раза за счет отражений от стен или уменьшиться в два раза за счет суперпозиции волн при попадании Д вблизи от узла стоячих волн. В связи с этим диапазон принимаемой мощности $W_{\text{прм}} = 1 \times 10^{-8} \dots 1 \times 10^{-6}$ Вт. Для средней чувствительности детекторного диода 5 А/Вт (5000 В/Вт) получим диапазон сигналов на выходе детектора в дежурном режиме $U_{\text{дет}} = 50$ мкВ...5 мВ при уровне собственных шумов около 1...3 мкВ.

На основе приведенных оценок можно синтезировать блок-схему радиометрического СО (рис. 2.24.3). Излучатель (И) на диоде Ганна или транзисторном автогенераторе формирует электромагнитную волну на частоте f . Он управляется сигналами низкочастотного импульсного генератора (Г) с высокой скважностью и посылает энергию в пространство порциями короткой длительности. И снабжен широконаправленной антенной (рупорной, вибраторной или полосковой – см. п. 2.22), конструкция которой аналогична антеннам радиолокационных СО.

Многokrратно отразившись от стен и окружающих предметов, излучение поступает на СВЧ детектор (Д), выполненный на детекторном или смесительном диоде или на транзисторном детекторе. Конструктивно элемент детектора совмещен с широконаправленной антенной, аналогичной антенне излучателя. На выходе детектора – импульсный сигнал с постоянной амплитудой импульсов $U_{\text{дет}}$. Исходный уровень сигнала зависит от точки установки Д, он может быть чуть больше при попадании в пучность или чуть меньше – при попадании в узел стоячих волн. Уровень меняется при перестановках мебели в помещении, но в дежурном режиме он постоянен. Если в помещении появляется движущийся человек, то картина стоячих волн смещается и на выходе Д на фоне начального уровня $U_{\text{дет}}$ появляется переменный сигнал с небольшой глубиной модуляции m .

Усилитель (У) повышает уровень импульсов в 1000 раз, доводя импульсы максимальной амплитуды ($U_{\text{дет}} = 5$ мВ) примерно до уровня половины напряже-

ния питания. Последующий каскад выравнивает амплитуды импульсов, доводя их примерно до 5 В, благодаря узлу автоматической регулировки усиления (АРУ), поддерживающей уровень на выходе детектора огибающей (ДО) около 4...5 В. Коэффициент усиления узла АРУ устанавливается в пределах 1...100, он меняется медленно, чтобы подстраиваться под текущую обстановку. ДО выделяет низкочастотный сигнал, соответствующий верхушкам импульсов. Работа ДО синхронизируется генератором Г, чтобы выделять только «свои» импульсы при работе нескольких И в одном помещении.

Полосовой фильтр (ПФ) пропускает полезный сигнал и подает его на компаратор (К1), формирующий импульс при каждом превышении заданного порогового уровня модуляции m , устанавливаемого в зависимости от конкретного помещения. Накопитель (Н) активирует РТ после поступления заданного количества импульсов. В случае длительного пропадания постоянного уровня на выходе ДО, что может быть вызвано неисправностью И, Д или повреждением соединительных кабелей, компаратор (К2) инициирует срабатывание РТ.

Типичные характеристики среднего представителя радиометрических СО: объем охраняемого помещения – 2000...10000 м³; высота установки – 2...2,5 м (выше мебели); рабочая частота – 1...10 ГГц; напряжение питания – 10...30 В; потребляемый ток – 20...100 мА; рабочая температура – от минус 50...10°C до плюс 40...50°C; стоимость – 15...60 тыс. руб. (500...2000 \$).

Достоинства радиометрических СО:

- большая ЗО и соответственно низкая удельная стоимость оборудования при использовании в помещениях максимального объема; обнаружение передвижения нарушителя в любой точке объема, при проникновении через двери, окна, крышу, пол или человека, спрятавшегося в помещении;
- высокая помехоустойчивость; СО нечувствительна к электромагнитным наводкам, вибрации, работе нагревательных приборов, вентиляции, акустическим шумам;
- возможность проведения полного контроля работоспособности всех составных частей СО.

Недостатки радиометрических СО:

- возможность выхода ЗО за пределы охраняемого помещения через деревянные двери, тонкие фанерные или гипсокартонные перегородки;
- необходимость взаимной синхронизации нескольких радиометрических СО, работающих в одном помещении; каждая цепь взаимной синхронизации – это дополнительный кабель;
- необходимость тщательного выбора места установки блоков передачи и приема.

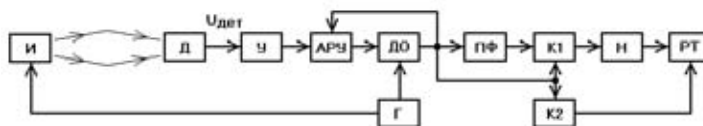


Рис. 2.24.3 Блок-схема радиометрического СО

2.25. Инфракрасные пассивные СО

Принцип действия инфракрасных (ИК) пассивных СО основан на регистрации теплового излучения человеческого тела. Инфракрасными называются электромагнитные волны с длиной волны $\lambda > 0,76$ мкм. Уровень излучения человека крайне низок. Даже такие чувствительные к тепловым лучам представители животного мира, как змеи и комары, в состоянии обнаружить его на расстояниях не более нескольких метров. Технические средства обнаружения, благодаря своей конструкции, обладают на несколько порядков большей чувствительностью. Они могут также носить название оптико-электронных извещателей. Любое ИК пассивное СО состоит из трех частей: оптической системы, приемника ИК излучения (ПИК) и блока обработки (БО) (рис. 2.25.1)

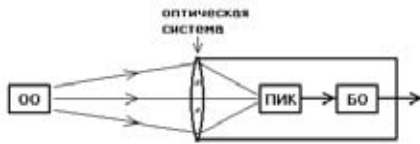


Рис. 2.25.1 ИК пассивное СО

Оптическая система концентрирует излучение, исходящее от ОО, собирая его с входного отверстия большой площади и направляя на крошечный ПИК – элемент, чувствительный к тепловым лучам. БО усиливает электрический сигнал с выхода ПИК, фильтрует его в полосе полезных сигналов, выделяет информативные признаки (амплитуду, полярность импульса, длительность выбросов и их количество) и активирует сигнал тревоги при попадании значений признаков в установленные интервалы.

Оптическая система может быть линзовой, зеркальной или зеркально-линзовой. Применявшиеся ранее германиевые линзы почти полностью вытеснены дешевыми пластмассовыми. Собирающее вогнутое зеркало обычно изготавливается из металла и полируется. Тонкий слой защитного покрытия (например, из палладия) обеспечивает высокую отражательную способность зеркала в течение длительного времени. ПИК может состоять как из одного элемента, так и из их множества, составляющего матрицу элементов.

В зависимости от используемых составных частей ИК пассивные СО делятся на три группы: однолучевые (линейные), многолучевые (объемные) и тепловизионные. Однолучевые ИК пассивные СО имеют ЗО в виде линейного барьера. Такой вид ЗО формируется за счет размещения точечного ПИК в фокусе выпуклой линзы или вогнутого зеркала. Дальность обнаружения достигает 100 м. Однолучевые ИК пассивные СО называются также ИК пассивными извещателями, тепловыми СО или пассивным ИК барьером. Благодаря линейной ЗО они наиболее подходят для блокирования внешних периметров небольших объектов, въездных ворот, дорог, оврагов. Строго говоря, лучей может

быть и несколько, но все они параллельны, разнесены по горизонтали или по вертикали и образуют линейный рубеж.

Многолучевое ИК пассивное СО содержит в качестве ЧЭ такой же точечный ПИК. Множество лучей, направленных из одной точки во все стороны, формируется с помощью специальной линзы Френеля. Она изготавливается из пластмассы методом штамповки и имеет небольшую цену. Площадь сегмента линзы, соответствующего отдельному лучу, не так велика, как в однолучевом СО, поэтому и дальность многолучевого СО не превышает 10...15 м. Множество лучей позволяет полностью перекрывать объем среднего помещения. Многолучевое ИК пассивное СО называется также ИК датчиком движения или объемным оптико-электронным извещателем. Оно наиболее подходит для внутреннего применения в отдельных помещениях размером до 15×15 м. Простота и дешевизна многолучевого ИК пассивного СО сделали его в настоящее время самым широко распространенным внутренним СО.

Тепловизионные СО содержат в своем составе матрицу точечных ПИК, размещаемую в фокальной плоскости объектива. Благодаря этому, формируется двумерное изображение распределения температуры в пределах заданного поля зрения. Угол наблюдения может быть узким или широким, а само СО – внутренним или внешним. Дальность наблюдения составляет до нескольких километров. Собственно тепловизионного СО пока не существует. Имеющиеся тепловизоры преобразуют картину распределения тепловых полей в видимую область и предоставляют изображение в удобном виде на экран оператору. Однако, до появления прибора, автоматически вырабатывающего сигнал тревоги при появлении человека на основе анализа изменений изображения, остается буквально один шаг.

В основе всех трех разновидностей ИК пассивных СО лежат одни и те же физические закономерности. Распределение мощности электромагнитного излучения тела, имеющего температуру T , по длине волны λ подчиняется закону Планка:

$$dW = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{S}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda,$$

где dW – мощность излучения в диапазоне длин волн $(\lambda, \lambda+d\lambda)$, Вт; h – постоянная Планка, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Дж×с; c – скорость света, $c = 3 \times 10^8$ м/с; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К; T – температура излучающего тела, К; S – площадь поверхности излучающего тела. Закон Планка выполняется точно, если излучатель является так называемым абсолютно черным телом. В других случаях мощность излучения оказывается несколько ниже, что учитывается введением коэффициента ϵ , называемого излучательной способностью или коэффициентом излучения ($\epsilon = 0...1$). Вообще говоря, величина ϵ зависит от длины волны λ ,

температуры, угла наблюдения и других факторов, но многие излучающие поверхности можно приближенно описать средними значениями в диапазоне $\lambda = 5...14$ мкм (табл. 2.25.1). На анализе закона Планка основаны все качественные и количественные оценки характеристик излучения различных тел.

Таблица 2.25.1 Излучательная способность различных поверхностей в диапазоне длин волн 5...14 мкм

Поверхность	ϵ
Абсолютно черное тело	1
Сажа	0,95
Вода	0,93...0,98
Кожа человека	0,9...0,98
Асбест	0,9...0,95
Стекло	0,85...0,98
Земля	0,85...0,95
Краска	0,8...0,95
Кирпич	0,8...0,93
Снег	0,8...0,9
Одежда	0,75...0,95
Бумага	0,7...0,95
Бетон	0,7...0,92
Пластмасса	0,7...0,9
Песок	0,6...0,9
Дерево	0,5...0,9
Неполированный металл	0,2...0,6
Полированный металл	0,05...0,2

Прежде всего, дифференцируя формулу закона Планка по λ и приравнявая производную нулю, можно получить выражение для длины волны, соответствующей максимуму излучения тела с температурой T . Оно называется законом Вина и имеет вид $\lambda_{\max} = hc / (4,97kT) = A/T$, где A – постоянный коэффициент, $A = 2,898 \times 10^{-3} \text{ м} \times \text{К}$. Диапазону температур человеческого тела 25...37°C соответствуют значения $T = 298...310 \text{ К}$ и наибольшее излучение на длине волны $\lambda_{\max} = A/T = 9,4...9,7 \text{ мкм}$. Максимум излучения меняется в узких пределах, но сама мощность оказывается распределенной по широкому диапазону длин волн (рис. 2.25.2). На приведенном графике мощность отсчитывается относительно максимального значения, принятого за единицу. Для эффективной работы ПИК он должен воспринимать излучение в максимально широком диапазоне длин волн. Интервал $\lambda = 4...36 \text{ мкм}$ содержит более 90% всей мощности. Однако, создание широкодиапазонных ИК приемников технически сложно. Кроме того, широкополосному приему при небольшом увеличении полезного сигнала сопутствует значительное возрастание помехового сигнала. Поэтому оказывается гораздо важнее отсеять излучение с длиной волны менее 5...7 мкм и более 14...20 мкм с помощью специальных фильтров. Остатки мощности достаточны для стабильной работы ПИК. Интервал $\lambda = 7...14 \text{ мкм}$ содержит 43% мощности, излучаемой во всем диапазоне длин волн. В этом (или чуть более широком) интервале функционируют все датчики, реагирующие на тепло человека.

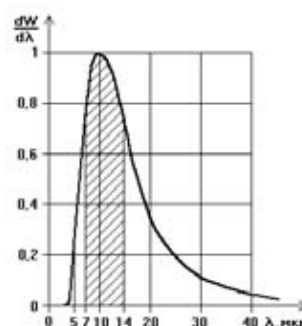


Рис. 2.25.2 Распределение мощности теплового излучения человека по длине волны λ

Полная мощность ИК излучения может быть найдена интегрированием выражения закона Планка во всем диапазоне длин волн. Получаемая зависимость носит название закона Стефана-Больцмана: $W = \sigma \epsilon S T^4$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К}^4)$. Излучение тела человека, имеющего температуру T , происходит на фоне излучения окружающих предметов с температурой $T_{\text{ОКР}}$. При появлении человека изменение мощности ΔW (по сравнению с окружающим фоном) будет равно разности между тем, что излучается телом, и тем, что поглощается им из окружающего пространства: $\Delta W = \sigma \epsilon S (T^4 - (T_{\text{ОКР}})^4) \approx 4\sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T$, где $\Delta T = T - T_{\text{ОКР}}$.

ПИК преобразует мощность падающих тепловых лучей в пропорциональный электрический сигнал. Поскольку тепловой поток исходит ото всех предметов с ненулевой температурой, датчик должен регистрировать только его изменение. Оценим мощность, которую поглощает ПИК при появлении нарушителя. Площадь поверхности тела человека (его кожи) в среднем равна $S = 2,0 \text{ м}^2$; она может меняться в пределах $S = 1,4...2,5 \text{ м}^2$. Одежда ослабляет поток испускаемого им электромагнитного излучения. Часть тела (голова, кисти рук) всегда открыты. Минимальное значение площади может быть принято равным $S = 1,0 \text{ м}^2$. Полагая $\epsilon = 0,9$, температуру в помещении $T_{\text{ОКР}} = 288...308 \text{ К}$ (15...35°C), разность температур $\Delta T = 1...20 \text{ К}$, получим диапазон изменения излучаемой мощности $\Delta W = 4\sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T = 5...300 \text{ Вт}$. Очевидно, что в случае $\Delta T = 0$ человек полностью сольется с фоном, поэтому необходимо каким-либо образом задать минимальное значение ΔT . Естественные колебания температуры в помещении находятся на уровне сотых долей градуса, на улице в спокойной обстановке они доходят до 0,1°C; чтобы достоверно обнаружить полезные изменения сигнала, следует установить порог обнаружения на уровне 1...2°C.

Полученный диапазон $\Delta W = 5...300 \text{ Вт}$ хорошо согласуется с данными об общем энергетическом балансе человека. Взрослый человек в покое выделяет в окружающую среду мощность около 120 Вт; при легкой работе она возрастает до 250 Вт, а при тяжелой – до 500 Вт. При этом на лучеиспускание расходуется до 55% мощности; остальное отводится конвекцией и испарением.

Плотность потока энергии (то есть энергия, проходящая в единицу времени через единичную площадь,

перпендикулярную к направлению распространения) теплового излучения человека в точке расположения датчика составит $\Pi = \Delta W / (4\pi L^2)$, где L – расстояние от человека до датчика. Для расстояний $L = 2...10$ м плотность потока энергии лежит в пределах $\Pi = \Delta W / (4\pi L^2) = 0,005...6$ Вт/м².

Мощность $W_{\text{ПРМ}}$, поглощаемая ПИК, равна произведению плотности потока энергии Π на площадь $S_{\text{ПРМ}}$ оптической системы, направляющей тепловые лучи на ЧЭ. Тогда выражение для мощности будет выглядеть следующим образом $W_{\text{ПРМ}} = K_\lambda K_S K_\alpha \Pi S_{\text{ПРМ}} = K_\lambda K_S K_\alpha \sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi L^2)$. Здесь учтены три дополнительных фактора, ослабляющих мощность, поглощаемую ПИК. Каждому из них соответствует свой коэффициент K_λ , K_S или K_α ($0 < K_\lambda < 1$, $0 < K_S < 1$, $0 < K_\alpha < 1$). Коэффициент K_λ равен доле мощности, приходящейся на полосу длин волн λ , поглощаемых ПИК; для интервала $\lambda = 7...14$ мкм он составляет $K_\lambda = 0,43$. Коэффициент K_S учитывает, что площадь изображения OO $S_{\text{ОО}}$ может превосходить площадь ПИК $S_{\text{ПИК}}$, и тогда $K_S = S_{\text{ПИК}} / S_{\text{ОО}}$, в противном случае $K_S = 1$. Величина коэффициента K_α уменьшается с ростом угла α между направлением потока Π и нормалью к площади оптической системы; $K_\alpha = \cos \alpha$. Для однолучевых СО величина $K_\alpha = 1$. Если $K_\lambda = 0,43$, $K_S = 1$, $K_\alpha = 1$, $S = 0,0001...0,0004$ м², то принимаемая мощность составляет $W_{\text{ПРМ}} = K_\lambda K_S K_\alpha \sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi L^2) = 2 \times 10^{-7}...1 \times 10^{-3}$ Вт. Чтобы работать с воздействиями таких уровней, ПИК должен обладать весьма высокой чувствительностью. Уровень принимаемой мощности резко уменьшается с ростом расстояния L , при этом единственная возможность подъема мощности – увеличение площади $S_{\text{ПРМ}}$.

Построенная физическая модель обнаружения позволяет также определить основные виды помеховых воздействий и выработать рекомендации по повышению помехоустойчивости ИК пассивных СО. Наиболее мощный источник ИК излучения на Земле – это Солнце. Полная плотность потока электромагнитной энергии составляет около 1000 Вт/м², около половины его приходится на ИК излучение. Интенсивность излучения максимальна при $\lambda = 0,41$ мкм, но уже при $\lambda = 1,7$ мкм она ослабевает в 10 раз, а при $\lambda = 3,4$ мкм – в 100 раз. Интенсивность в полосе 5 мкм превышает интенсивность в полосе 7 мкм в 4 раза. Поэтому для ослабления влияния солнечного излучения важно, чтобы ЧЭ был оснащен фильтром, не пропускающим длины волн менее 5...7 мкм. Но даже оставшаяся плотность потока солнечной энергии доходит в ясный день до $\Pi = 0,5$ Вт/м². Она превышает плотность потока от человека. Солнечное излучение является сильным помеховым фактором как для внешних, так и для внутренних СО, если в помещениях имеются окна. Попадание прямого солнечного излучения нарушает работоспособность ИК пассивного СО. На улице от него защищает козырек над входной линзой, сужение луча зоны чувствительности и необходимость не направлять датчик в сторону солнца. При установке на прямолинейном участке датчик размещается на его южном конце. Кроме того, для отстройки используется тот факт, что изменения солнечного излучения в основном проис-

ходят медленно. Для этого в БО необходим ФВЧ. Дополнительной мерой служит двухэлементный ЧЭ, сигналы с двух площадок которого соединены встречно и компенсируют друг друга. И все же уровень ИК излучения солнца велик, а в моменты его восхода/захода или выхода/входа за тучи с резкими границами – велико и мгновенное изменение интенсивности. Немного менее опасны и искусственные источники света. Они не столь интенсивны, но расположены гораздо ближе. Не следует направлять ИК пассивные СО на осветительные приборы, на места, освещаемые солнцем, на участки открытого неба, на окна, выходящие на юг, а на нижних этажах – и на автодороги. В крайнем случае, необходимо закрывать окна экранами, шторами, жалюзи.

Второй по важности помеховый фактор – естественные флуктуации температуры окружающего фона, на который направляется луч СО. Флуктуации, во многом связанные с конвекционными потоками воздуха, приводят к появлению на выходе ЧЭ постоянно меняющегося сигнала случайной амплитуды. Флуктуации температуры в помещении в среднем составляют 0,01...0,02°C, а на улице – около 0,1°C, им соответствуют уровни принимаемой мощности порядка десятков нановатт. Для того, чтобы избежать ложных срабатываний от флуктуаций температуры, не следует направлять СО на источники тепла и конвекционных потоков воздуха: батареи, печи, калориферы, кондиционеры, холодильники, вентиляторы, вентиляционные отверстия, форточки. Колебания температуры усугубляются при воздействии различных метеорологических и фоновых факторов: осадков, дождя, снега, тумана, дыма, пыли или других загрязнений, растительности, деревьев, кустарников, травы, качающихся штор и жалюзи. Наилучший фон для ИК пассивного СО – однородная жесткая стена. Уровень флуктуаций определяет порог обнаружения, устанавливаемый в пределах 1...2°C. Более низкий порог вызовет повышенное число ложных срабатываний. Минимальная чувствительность ПИК ниже 0,1°C также не даст особого выигрыша.

Третий источник помех – теплокровные животные и птицы. Не только собаки и кошки, но даже такие небольшие животные, как крысы, могут стать источником ложных тревог. Поскольку интенсивность и параметры излучения попадают в диапазон излучения человека, то для борьбы с ложными тревогами необходимо либо удалять животных из ЗЧ датчика, либо приподнимать ЗЧ на высоту 0,8...1,2 м над уровнем пола или земли.

Помимо основных помеховых факторов, есть и другие: электромагнитные наводки (от транспорта, сварки, ЛЭП, лифтов, радиостанций) и вибрация. Меры противодействия им обычные – экранирование ЧЭ и жесткое крепление СО.

В качестве приемников ИК излучения наиболее подходят пироэлектрические датчики (пироприемники) или болометры. Пироприемник состоит из миниатюрного керамического поглотителя излучения. В качестве поглотителей используются танталат лития, ти-

танат бария и др. Данные вещества поляризуются при изменении облучающего потока энергии, то есть на противоположных гранях керамического элемента формируются заряды противоположного знака. Величина заряда пропорциональна действующему изменению поглощаемой мощности. Принцип действия пироэлектрического датчика похож на принцип действия пьезоэлектрического датчика: заряд генерируется только в момент изменения физического воздействия. Пироприемники отличаются низким быстродействием, но его вполне достаточно для восприятия излучения человека. Пироприемники высокочувствительны, они работают в диапазонах принимаемой мощности $W = 1 \text{ нВт} \dots 1 \text{ мВт}$ и длины волны $\lambda = 7 \dots 14 \text{ мкм}$, они просты и дешевы. Именно с их появлением связано широкое распространение ИК пассивных СО.

Болометры (в миниатюрном исполнении – микроболометры) изготавливаются из металлических или полупроводниковых материалов, меняющих свою проводимость под действием излучения. Для повышения чувствительности и снижения шумов два одинаковых элемента включаются в различные плечи измерительного моста, при этом один из них закрывается от воздействия излучения. Болометры обладают высокой пороговой чувствительностью (без охлаждения – до 1 нВт), но они не дешевы. Распространенные ранее во всех ветвях ИК пассивных СО, они сохранили позиции только в тепловидении, так как обладают более высоким быстродействием и воспринимают абсолютную величину поглощаемой мощности, а следовательно, могут обнаруживать не только движущиеся, но и неподвижные нагретые объекты. Другие приемники ИК излучения – термоэлектрические элементы, вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы – либо недостаточно чувствительны в заданном диапазоне длин волн, либо обладают повышенным уровнем шума, либо громоздки, либо дороги, поэтому в ИК пассивных СО не используются.

Типичный пироприемник внешне похож на транзистор в металлическом корпусе (рис. 2.25.3). В верхней части корпуса находится окно, прозрачное для излучения в диапазоне длин волн λ от $5 \dots 7 \text{ мкм}$ до $14 \dots 30 \text{ мкм}$. Сквозь окно тепловые лучи поступают на пироэлектрические элементы, поверхность которых покрыта тонким слоем поглотителя. Обычно внутри пироприемника содержится два элемента, включенных встречно. Естественные колебания фонового теп-

лового излучения одинаково воздействуют на оба элемента и генерируемые ими заряды взаимно компенсируют друг друга. Излучение движущегося человека попадает сначала на один элемент, он нагревается и формирует заряд определенного знака. Затем излучение попадает на другой элемент, в результате чего образуется заряд противоположного знака. Двухэлементный ЧЭ генерирует при движении человека поперек луча двухполярный сигнал. Такая схема включения в значительной мере подавляет многочисленные помеховые воздействия общего характера. Для рассасывания заряда служит внутренний резистор, обеспечивающий саморазряд с постоянной времени около 1 с . Зарядовый сигнал усиливается полевым транзистором, встроенным в датчик. Выводы пироприемника обозначаются аналогично выводам полевого транзистора: D (сток), S (исток), G (затвор). На вывод D подается положительное напряжение питания, с вывода S снимается выходной сигнал, вывод G соединяется с общим проводом схемы. Основные параметры некоторых пироприемников приведены в таблице 2.25.2. Уровень собственных шумов на выходе S составляет $10 \dots 30 \text{ мкВ}$, выходное сопротивление – 5 кОм . Большинство пироприемников обладает примерно одинаковыми параметрами.

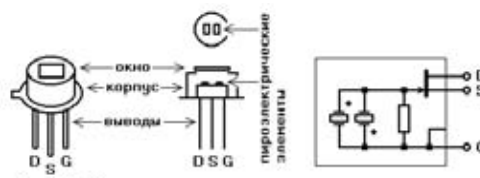


Рис. 2.25.3 Пироприемник

Общий принцип действия ИК пассивных СО определяет схожие положительные и отрицательные черты. Основные достоинства ИК пассивных СО:

- однопозиционное размещение; для охраны участка (оврага или холла) нет необходимости устанавливать электронные блоки по обеим его сторонам;
- возможность формирования ЗО произвольной формы; количество лучей ничем не ограничено, их можно направить в любую сторону, заполнив лучами весь охраняемый объем или создав ЗО в виде отдельного луча для охраны прямолинейного рубежа, в виде вертикальной шторы – чтобы луч нельзя было перепрыгнуть, или в виде

Таблица 2.25.2 Пироприемники

Название	λ , мкм	Угол ДН	Размеры и количество элементов	Напряжение питания, В	Чувствительность, В/Вт	Диапазон рабочих температур, °С	Стоимость, руб.
IRA-E710ST0	5...14	90°×90°	(2мм×1мм)×2	2...15		-40...+70	70
IRA-E910ST1	5...14	82°×82°	(1,1мм×1,1мм)×4	3...15		-25...+55	210
IRA-E940ST1	5...14	100°×110°	(1,35мм×1мм)×4	2...15		-25...+55	270
LHi954, LHi958		110°×110°	(2мм×1мм)×2	2...15	3700	-40...+85	
LHi968		100°×100°	(2мм×1мм)×2	2...15	4000	-40...+85	
PIR325	5...14		(2мм×1мм)×2	5		-30...+70	

горизонтального веера — чтобы под ним могли свободно перемещаться мелкие домашние животные; ЗО имеет резкие отчетливые границы, она не выходит за пределы помещения;

- низкая стоимость; ИК пассивное СО — самое дешевое из интеллектуальных СО, обладающих не только чувствительным элементом, но и собственным электронным блоком обработки;
- полностью маскируемая ЗО, как следствие пассивного принципа действия; ИК излучение невидимо, поэтому форма и величина ЗО не поддаются оценке по внешнему виду СО, да и сам прибор незаметен, так как размещается высоко и имеет небольшие размеры; при необходимости СО может быть замаскировано слоем пластика, прозрачного в диапазоне 5...14 мкм;
- простота монтажа, настройки и обслуживания; однопозиционное СО требует минимального количества проводов, его работу легко проверить, а при необходимости — откорректировать;
- высокая надежность, компактность и малый вес, благодаря предельной простоте конструкции;
- ИК пассивные СО не мешают работе друг друга или любой бытовой аппаратуры; в одном помещении может быть установлено неограниченное количество датчиков.

Основные недостатки ИК пассивных СО:

- низкая помехоустойчивость к воздействию солнечного излучения, колебаний температуры, при наличии нагревательных приборов, животных, тепловых потоков, резких погодных изменений;
- снижение чувствительности при температуре 30...40°C, когда тепловое излучение ОО близко к излучению фона;
- наличие мертвых зон за крупными предметами, заслоняющими пространство прямой видимости датчика;
- пониженная чувствительность при движении нарушителя вдоль луча ЗО (а что ему там надо?);
- сложность организации полного контроля работоспособности датчика, свойственная большинству пассивных СО; ИК пассивные датчики хороши для автоматического открывания дверей, включения света или против бесхитростного нарушителя;
- снижение чувствительности большинства типов пироэлектрических элементов при низких температурах (менее минус 20°C).

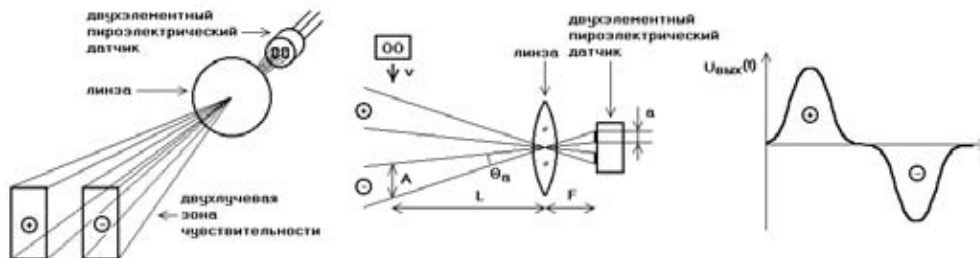


Рис. 2.25.4 Вид сигнала на выходе пироприемника

2.25.1. Однолучевые

ЗО однолучевого СО прямолинейна. Для повышения помехоустойчивости датчик обычно содержит два пироэлектрических элемента. Они соединены разнополярно, но имеют один общий выход. В связи с этим луч расщепляется на две одинаковые половины или на два луча, идущие почти параллельно друг другу, но дающие на выходе сигналы противоположных знаков (рис. 2.25.4). С точки зрения зон чувствительности можно считать, что лучей два; с точки зрения обнаружения — один, так как только появление двухполярного сигнала $U_{вых}(t)$ приводит к срабатыванию датчика.

ЗЧ представляет собой луч с углом θ при вершине. Если площадка пироприемника имеет форму прямоугольника, то луч образует пирамиду. Естественное расхождение луча, связанное с волновым характером электромагнитных колебаний, составляет $\theta_{волн} \approx \lambda/D$, где D — диаметр линзы или зеркала. Угол настолько мал $\theta_{волн} \approx 10^{-5}/5 \times 10^{-2} = 2 \times 10^{-4}$, что можно не принимать во внимание волновой характер колебаний, и пользоваться соотношениями геометрической оптики. Угол расхождения луча θ_a , соответствующий размеру пироэлектрического элемента a , равен $\theta_a = a/F = A/L$, где F — фокусное расстояние оптической системы, A — поперечный размер луча на расстоянии L от датчика. Для типичных значений $a = 1$ мм, $F = 60$ мм угол составляет $\theta_a = a/F = 1/60 = 0,017 = 1^\circ$; на расстоянии $L = 50$ м ширина луча $A = aL/F = \theta_a L = 0,017 \times 50 = 0,85$ м.

С точки зрения формы ЗО не имеет значения, какой тип оптической системы используется. Двухэлементный пироприемник дает двухлучевую ЗЧ как через линзу, так и в зеркале. Преимущества использования зеркала — дешевизна и стойкость, так как оно располагается в защищенном от внешних воздействий месте внутри корпуса. Преимущество линзы — компактность конструкции.

Ширина луча непостоянна. Находясь вблизи от датчика, человек полностью перекрывает луч. По мере удаления от датчика ширина луча A возрастает и в какой-то момент становится равной ширине человека B . Соответствующее расстояние L_0 можно найти из соотношения $B = aL_0/F$; для среднего значения $B = 0,35$ м получаем $L_0 = BF/a = 21$ м. На более далеких расстояниях ($L > L_0$) человек полностью укладывается в расщепленный луч, и все попадающее на оптическую систему излучение человека поглощается пироэлектрическим элементом. Соотношение сторон элемента соответ-

твует средним ожидаемым размерам ОО. Для обнаружения идущего человека, высота тела которого примерно в 2 раза превосходит ширину, применяются пироприемники с размерами чувствительной площадки $b \times a = 2 \text{ мм}$ (высота) \times 1 мм (ширина). При установке СО пироприемник должен быть ориентирован именно таким образом. Итак, на близких расстояниях ($L < L_0$) изображение человека, создаваемое оптической системой на элементе пироприемника, будет превосходить размеры элемента как по ширине, так и по высоте. На преобразователь будет попадать только часть поступающей мощности, причем тем меньшая, чем ближе ОО. Величина коэффициента K_S уменьшается примерно пропорционально квадрату расстояния $K_S \sim L^2$ (при $L < L_0$), а уровень полезного сигнала почти не зависит от расстояния. Благодаря этому диапазон изменения амплитуды сигнала на выходе ЧЭ оказывается не слишком большим. При изменении дальности L от 50 м до 2 м амплитуда возрастает не в 625 раз, а всего лишь в несколько раз.

Оценим диапазон частот полезных сигналов. Сигнал будет иметь наибольшую длительность, если человек движется на максимальном расстоянии $L_{\max} = 50 \text{ м}$ с минимальной скоростью $v_{\min} = 0,3 \text{ м/с}$ под углом ϕ к лучу ($\sin\phi \approx 1/2$), тогда время нарастания сигнала $T_{\max} = L_{\max} / (v_{\min} \sin\phi)$, поскольку ЧЭ фиксирует только изменение теплового потока. Минимальная частота полезного сигнала $f_H \approx 1 / (2\pi T_{\max}) \approx v_{\min} \sin\phi / (2\pi L_{\max}) = 0,3 / (4 \times 3,14 \times 50) = 0,07 \text{ Гц}$. Сигнал меняется наиболее быстро при передвижении человека с максимальной скоростью $v_{\max} = 5 \text{ м/с}$ вблизи от датчика на расстоянии $L_{\min} = 2 \text{ м}$ перпендикулярно к лучу ($\sin\phi = 1$). Тогда время нарастания сигнала $T_{\min} = L_{\min} / v_{\max} = 2 / 5 = 0,4 \text{ с}$. Максимальная частота полезного сигнала составит $f_B \approx 1 / (2\pi T_{\min}) = v_{\max} / (2\pi L_{\min}) = 5 / (2 \times 3,14 \times 2) = 24 \text{ Гц}$. Значения f_H и f_B определяют полосу фильтрации сигналов в БО.

Плотность потока энергии возрастает с приближением человека к датчику, при этом спектр полезных сигналов сдвигается в сторону более высоких частот. Большинство пироприемников имеет внутренние цепи коррекции, ослабляющие высокочастотные составляющие сигналов. Обычно их чувствительность γ равномерно уменьшается в диапазоне частот выше 0,1 Гц (рис. 2.25.5). В результате уровень полезных сигналов на выходе пироприемника слабо зависит от расстояния до датчика и от скорости передвижения.

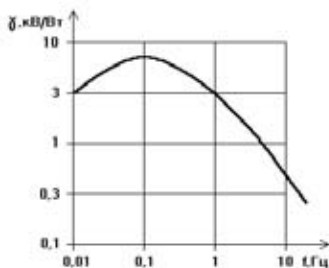


Рис. 2.25.5 Частотная характеристика пироприемника

Пример. Оценим параметры алгоритма обработки сигналов с пироприемника для лучевого СО с максимальной дальностью $L_{\max} = 50 \text{ м}$ и оптической системой диаметром $D = 5 \text{ см}$. Площадь отверстия $S_{\text{ПРМ}} = \pi D^2 / 4$. Выберем порог обнаружения равным $\Delta T = 1^\circ \text{C}$. Соответствующая ему минимальная принимаемая пироприемником мощность излучения $W_{\text{ПРМ}} = K_\lambda K_S K_\alpha \sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T D^2 / (4(L_{\max})^2) = 15 \times 10^{-8} \text{ Вт} = 150 \text{ нВт}$. Минимальный полезный сигнал составит $U_{\text{ВЫХ}} = \gamma W_{\text{ПРМ}}$, где γ — чувствительность пироприемника. Для большинства пироприемников величина $\gamma \approx 4000 \text{ В/Вт}$, а минимальный уровень полезного сигнала $U_{\text{ВЫХ}} = 4000 \times 15 \times 10^{-8} = 600 \text{ мкВ}$.

Собственный шум пироприемника имеет вид непрерывного случайного процесса (шумовой дорожки), его средняя амплитуда составляет около 20 мкВ. На собственные шумы пироприемника накладывается флуктуационный шум от естественных колебаний температуры и конвекционных потоков воздуха в поле зрения датчика. Среднему уровню флуктуаций на улице $\Delta T = 0,05 \dots 0,1^\circ \text{C}$ с учетом площади излучения в пределах луча $S = 2ab(L/F)^2$ соответствует изменение мощности, которое оказывается не зависящим от дальности. Оно составляет $W_{\text{ПРМ}} = K_\lambda K_S K_\alpha \sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi L^2) = K_\lambda K_S K_\alpha \sigma \epsilon 2ab (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi F^2) = 2 \times 10^{-8} \dots 4 \times 10^{-8} \text{ Вт} = 20 \dots 40 \text{ нВт}$. Естественный дрейф сигнала (флуктуации шумовой дорожки) на выходе пироприемника $U_{\text{ВЫХ}} = \gamma W_{\text{ПРМ}} = 80 \dots 160 \text{ мкВ}$.

Подводя итог, для обнаружения человека сигнал необходимо усилить в 10000 раз в полосе частот 0,07...24 Гц и сравнить с порогами $\pm 4 \text{ В}$. Полученный алгоритм обнаружения реализуется в виде электронной схемы (рис. 2.25.6). Пироприемник В1, расположенный в фокусе оптической системы (выпуклой линзы или вогнутого зеркала) с фокусным расстоянием $F = 60 \text{ мм}$, при пересечении луча человеком формирует двухполярный импульс на выходе S. Минимальной принимаемой мощности теплового излучения 150 нВт соответствуют два последовательных выброса выходного сигнала амплитудой +600 мкВ и -600 мкВ. На вход пироприемника D подается напряжение питания +5 В, стабилизированное микросхемой DA1. Конденсаторы С1, С3 емкостью 1...10 нФ служат для подавления радиопомех и различного рода высокочастотных наводок. Некоторые виды пироприемников содержат помехоподавляющие конденсаторы внутри своей конструкции.

Сигнал с выхода пироприемника поступает на усилитель на микросхеме DA2.1. Неинвертирующая схема включения не требует согласования выходного сопротивления ЧЭ с входным сопротивлением ОУ. Коэффициент усиления каскада равен $(R3/R2 + 1) = 100$. Кроме того, он выполняет роль ФНЧ с частотой среза $f_B = 1 / (2\pi R3C4) = 24 \text{ Гц}$. Следующий каскад на микросхеме DA2.2 имеет коэффициент усиления, регулируемый (с помощью переменного резистора R7) в пределах от 50 до 100 для подстройки под определенный тип пироприемника или под конкретную помеховую обстановку. Одновременно он представляет собой ФВЧ.

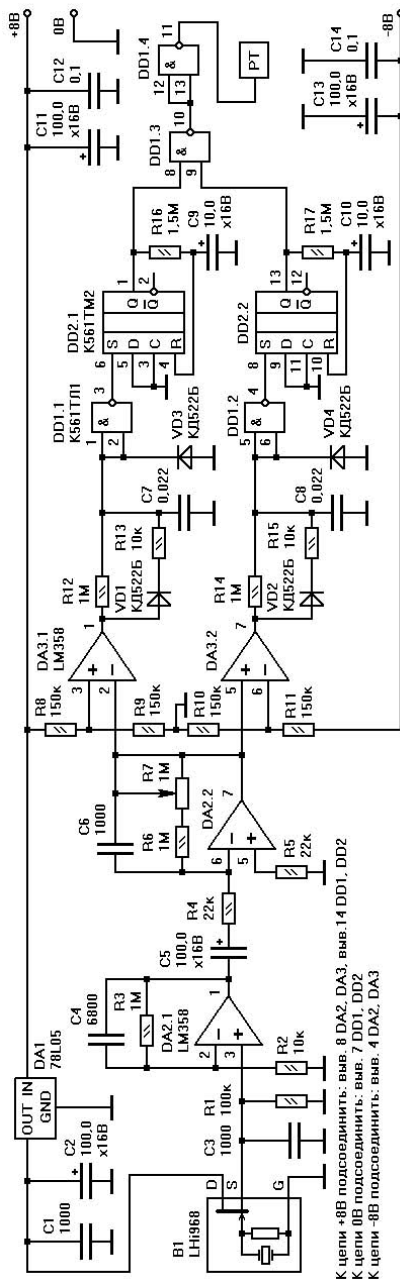


Рис. 2.25.6 Однолучевое ИК пассивное СО

Усиленный сигнал поступает с выхода 7 микросхемы DA2.2 на двухпороговый компаратор на элементах DA3.1 и DA3.2. Делитель R8, R9, R10, R11 задает пороги компаратора +4 В и -4 В. В дежурном режиме на выходах 1 и 7 DA3 – сигнал, близкий к +8 В. До этого же напряжения заряжены конденсаторы C7, C8. В случае, если усиленный сигнал превышает верхний порог, срабатывает компаратор DA3.1 и на его выходе устанавливается напряжение около -8 В. Конденсатор C7 начинает разряжаться через резистор R12. Значения R12 и C7 выбраны таким образом, чтобы на выходе DD1.1 сформировался положительный импульс только в том случае, когда длительность выброса превышает $0,29 \times R12 \times C7 = 7$ мс. Таким образом производится

отсеивание коротких помеховых импульсов и на выходе DD1.1 проходят импульсы, длительность которых попадает в диапазон длительностей полезных сигналов. Точно так же цепочка DA3.2, R14, C8, DD1.2 селективирует выбросы отрицательной полярности.

Пересечение луча человеком сопровождается формированием двухполярного сигнала. Время между началом выброса одной полярности и последующим выбросом противоположной полярности определяется выражением $T = (a+c) \times L / (Fv \sin \phi)$, где c – расстояние между элементами пироприемника, обычно $c = a = 1$ мм. Его максимальное значение $T_{max} = (a+c) \times L_{max} / (0,5Fv_{min}) = 11$ с. Элементы DD2.1, R16, C9, DD2.2, R17, C10 продлевают срабатывания компараторов на эти самые 11 с ($0,7R16C9 = 0,7R17C10 = 11$ с). В результате положительный импульс на выходе DD1.4 формируется только в ответ на появление двухполярного сигнала, в котором время следования выбросов укладывается в параметры полезных сигналов. Учет двухполярности позволяет резко сократить количество ложных срабатываний от неподвижных объектов и медленных флуктуаций. Положительный импульс на выходе DD1.4 инициирует срабатывание РТ.

Для сокращения числа ложных срабатываний необходимо соблюдать упоминавшиеся ранее рекомендации по размещению и установке ИК пассивных СО. Достижение высокой вероятности обнаружения также во многом зависит от правильной установки СО. Однолучевое СО монтируется над поверхностью земли либо на специальных стойках, либо на стволах деревьев (рис. 2.25.7). В любом случае важно обеспечить жесткость крепления и отсутствие вибрации. Высота установки должна составлять 1,5...2 м. Она соответствует уровню груди и лица человека, дающих максимум его теплового излучения. Поскольку луч невидим, а специальные ИК излучатели, позволяющие отследить его, часто недоступны, после установки СО необходимо убедиться, что полученная ЗО соответствует желаемым требованиям. Смещение ПИК в фокальной плоскости всего лишь на $\Delta = 1$ мм приводит к отклонению луча на угол $\beta = \Delta / F = 1/60$. Ошибка установки ЗО на расстоянии 50 м составит почти 1 м.

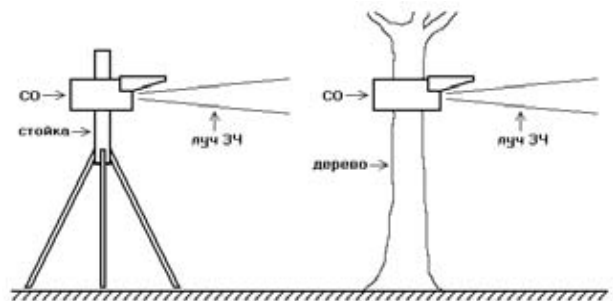


Рис. 2.25.7 Варианты установки однолучевого СО

Среднее однолучевое ИК пассивное СО предназначается для охраны отдельных прямолинейных участков и обладает следующими характеристиками: дальность обнаружения – 30...100 м (автомобиль – до 200 м); порог обнаружения – 1...2 градуса; напряжение пита-

ния – 10...15 В; потребляемый ток – 10...15 мА; рабочая температура – от минус 40 до плюс 50 °С; угол диаграммы направленности – 2...6° (обычно чем больше дальность, тем меньше угол); оптическая система – зеркальная, линзовая или зеркально-линзовая; размеры корпуса – 150...200 мм (длина) на 50...70 мм (диаметр) с солнцезащитным козырьком над линзой или входным отверстием.

2.25.2. Многолучевые

Многолучевые ИК пассивные СО почти ничем не отличаются от однолучевых. Они содержат точно такой же двухэлементный пироприемник и БО с близкими значениями параметров. Основное отличие заключается в оптической системе. Она имеет вид многоэлементного (фасеточного) зеркала или линзы. Каждый элемент формирует свой собственный луч, а множество лучей, торчащих во все стороны из датчика, как иголки из ежика, заполняет весь охраняемый объем помещения. Многолучевая линза Френеля представляет собой тонкую гибкую пластмассовую пластинку, ее конструкция настолько проста, что фасеточные зеркала почти не используются.

Линза Френеля получается из обычной линзы путем отбрасывания лишнего материала, никак не влияющего на ее фокусирующие свойства (рис. 2.25.8). Материал линзы задерживает свет и пропускает ИК излучение в диапазоне около 10 мкм. Линза Френеля обеспечивает уменьшение расхода материала, облегчение конструкции, сокращение потерь излучения в тонком слое линзы и дешевизну, благодаря изготовлению из пластмассы методом штамповки.

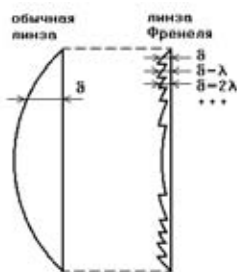


Рис. 2.25.8 Линза Френеля

Многолучевая линза Френеля состоит из нескольких участков (A1, A2, ...B1, B2, ...), каждый из которых представляет собой самостоятельную линзу, фокусирующую на двоянный пироприемник отдельный двойной луч (рис. 2.25.9). Обычно лучи располагаются веером слева направо в несколько ярусов, поэтому линзы для обнаружения нарушителя по всему объему помещения называются объемными или многоярусными

веерными. Чем выше ярус, тем дальше распространяется ЗО. Чтобы обеспечить равномерную пространственную плотность лучей, их количество возрастает при переходе в более высокий ярус. Кроме объемных линз имеются шторные, создающие ЗЧ в виде вертикального веера или занавеса для перекрытия прохода, коридора, холла или ряда витрин, и горизонтальные веерные, ЗЧ которых приподнята над полом на 0,5...1 м, для беспрепятственного передвижения домашних животных. Сами линзы часто бывают сменными для оперативного преобразования ЗО. По месту установки датчики бывают настенными и потолочными. Потолочные встречаются реже и несколько отличаются от настенных количеством и направлением лучей, а также тем, что пироэлементы имеют квадратную форму.

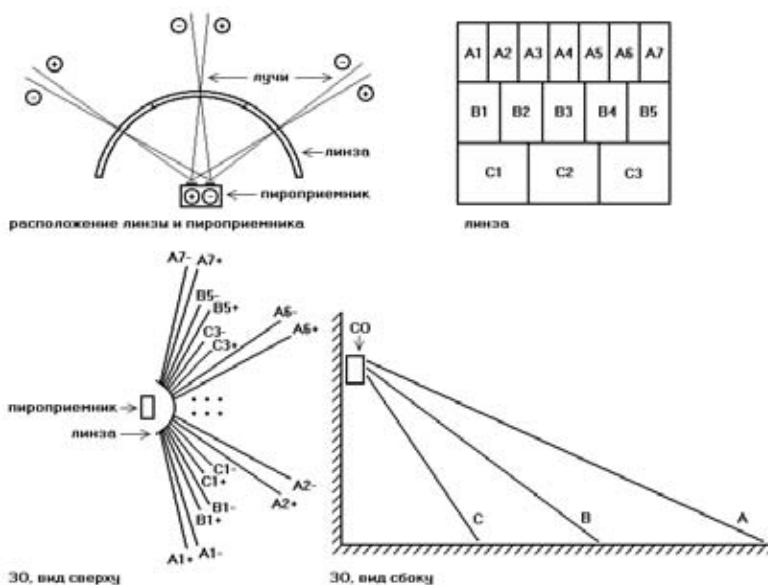


Рис. 2.25.9 Многолучевая линза Френеля и вид ЗО

Оценка параметров (уровня принимаемой мощности теплового излучения и диапазона частот полезных сигналов) для многолучевой СО проводится по тем же соотношениям, что и для однолучевой. Компактные размеры прибора обеспечиваются при использовании линз небольшой площади, для одного луча $S_{\text{ПРМ}} \approx 0,0002 \text{ м}^2$, соответственно и их фокусное расстояние лежит в пределах $F = 20...40 \text{ мм}$. Для средних значений $v = 0,3...3 \text{ м/с}$, $a = 1 \text{ мм}$, $L = 1,5...15 \text{ м}$, $F = 25 \text{ мм}$, $\sin f = 0,5...1$ получаем диапазон частот полезных сигналов $f = Fv \sin f / (2\pi a L) = 0,04...8 \text{ Гц}$. Значение минимальной принимаемой пироприемником мощности излучения составит $W_{\text{ПРМ}} = K_{\lambda} K_s K_{\alpha} \sigma \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi L^2) = 170 \text{ нВт}$. Ей соответствует минимальный уровень полезного сигнала $U_{\text{ВЫХ}} = \gamma W_{\text{ПРМ}} = 4000 \times 170 \times 10^{-9} = 680 \text{ мкВ}$.

Амплитуда собственных шумов пироприемника составляет около 20 мкВ. Площадь излучающей поверхности, находящейся в пределах одного луча, равна $S = 2abL^2 / F^2$. Мощность N независимых излучателей пропорциональна $(N)^{1/2}$. Количество лучей N примерно равно $N \approx 20$. Поэтому зависимость принимаемой

мощности от температурных изменений фона ΔT описывается выражением $W_{\text{ПРМ}} = K_x K_s K_a \epsilon S (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi L^2) = K_x K_s K_a \epsilon 2ab(N)^{1/2} (T_{\text{ОКР}})^3 \Delta T S_{\text{ПРМ}} / (\pi F^2)$. В выражение не входит дальность L . Для характерного в помещениях уровня флуктуаций температуры $\Delta T = 0,01 \dots 0,02^\circ\text{C}$, связанного с естественной конвекцией, получаем оценку уровня мощности $W_{\text{ПРМ}} = 11 \dots 22 \text{ нВт}$ и амплитуды помехового флуктуационного сигнала $U_{\text{ВЫХ}} = \gamma W_{\text{ПРМ}} = 40 \dots 90 \text{ мкВ}$. Параметры полезных и помеховых сигналов близки к соответствующим значениям для однолучевых СО. Небольшая корректировка параметров схемы (рис. 2.25.6) превращает ее в многолучевое объемное СО. Для повышения помехоустойчивости полезно дополнительно ввести накопитель импульсов между компаратором и РТ, чтобы активировать срабатывание после пересечения нескольких лучей.

Существуют готовые пироэлектрические модули, в состав которых входят пироприемник и линза Френеля. Некоторые, например, модуль IMD-B101-01 фирмы Murata, содержат еще усилитель и датчик освещенности. Они представляют собой законченные устройства для включения света при входе человека в темную комнату. Данные модули воспринимают излучение в диапазоне длин волн $5 \dots 14 \text{ мкм}$, потребляют незначительный ток менее 1 мА , обладают небольшой дальностью около 5 м и малыми размерами. Отключив датчик освещенности, вполне возможно использовать подобные модули для целей охраны.

Качество работы объемного ИК пассивного СО во многом зависит от правильной его установки. Датчик размещается на стене на высоте $2 \dots 3 \text{ м}$, чтобы его не заслоняла мебель. Чем большая часть помещения будет находиться в прямой видимости СО, тем меньше шансов у нарушителя спрятаться за предметами интерьера и остаться незамеченным. Часто конструкция крепления пироприемника позволяет сдвигать его немного вверх или вниз относительно неподвижной линзы, тем самым чуть опуская лучи или поднимая их.

Тепловые лучи распространяются строго прямолинейно и обладают низкой проникаемостью. С одной стороны, это хорошо, так как СО нечувствительно к передвижению объектов вне помещения. С другой — не очень, так как способствует образованию мертвых зон зади различных предметов — шкафов, перегородок, стеллажей. Отдельные участки линзы, которым соответствуют те или иные лучи, могут быть заклеены, если в данных направлениях не надо вести обнаружение, или если там расположены неотключаемые источники помеховых воздействий.

Срабатывание СО формируется при движении поперек лучей, поэтому лучше устанавливать его не напротив двери или окна (места наиболее вероятного появления нарушителя), а сбоку от них, чтобы входящий сразу пересекал максимальное количество лучей. Завершает установку СО проверка пробным проходом человека. Красный светодиод на корпусе датчика, загорающийся одновременно с его срабатыванием, делает проверку легкой и быстрой.

Среднее многолучевое ИК пассивное СО рассчитано для работы в отдельном помещении среднего объема и характеризуется следующими показателями: диапазон длин волн регистрируемого излучения — $7 \dots 14 \text{ мкм}$; размер зоны обнаружения — дальность $10 \dots 15 \text{ м}$ (для ЗО в виде шторы — до 30 м , для потолочных СО — $4 \dots 9 \text{ м}$); угол ЗО в горизонтальной плоскости — от 90 до 150 градусов (для шторных или коридорных — $3 \dots 10$, для потолочных — 360); угол по вертикали — от 3 градусов (горизонтальный веер, под которым могут перемещаться домашние животные) до 90 градусов (объемная ЗО); количество лучей — $18 \dots 25$ (для потолочных — до 300); порог обнаружения — $1 \dots 2$ градуса; скорость нарушителя — от $0,1 \dots 0,3$ до $3 \dots 7 \text{ м/с}$; высота установки — $1,5 \dots 3 \text{ м}$; напряжение питания — $10 \dots 15 \text{ В}$; потребляемый ток — $10 \dots 20 \text{ мА}$; рабочая температура — от минус $30 \dots 0$ до плюс $40 \dots 50^\circ\text{C}$; наличие ДВ и антисаботажного луча, направленного вниз непосредственно под место установки датчика (срабатывает сразу без подтверждения пересечения других лучей); возможность регулировки чувствительности; световой индикатор тревоги на корпусе прибора; размеры корпуса СО — высота $80 \dots 110 \text{ мм}$, ширина $50 \dots 70 \text{ мм}$, глубина $40 \dots 60 \text{ мм}$; масса — $80 \dots 150 \text{ г}$; стоимость $300 \dots 600$ рублей ($10 \dots 20$ \$).

2.25.3. Тепловизионные

Тепловизор — прибор, который делает видимым пространственное распределение температур различных объектов. Всякий, кто держал в руках прибор ночного видения (ПНВ), напоминающий по форме обычный бинокль, и наблюдал через него ночью передвижение людей по лесу, понимает всю силу метода, без которого лес представляется тихим и безмолвным. Возникает естественное желание превратить средство наблюдения в средство обнаружения, автоматически формирующее сигнал тревоги при появлении нарушителя. Хотя подобных тепловизионных СО пока нет, их появление не за горами. Существующие детекторы движения для видеокамер должны найти приложение и для камер диапазона тепловых волн.

Тепловизоры работают в диапазоне длин волн $\lambda = 3 \dots 14 \text{ мкм}$. Разрешающая способность достигает $0,02 \dots 0,2^\circ\text{C}$. Они могут использоваться как в помещениях, так и на улице. Угол обзора тепловизора подбирается под требуемые условия наблюдения. Иметь тепловизор — дорогое удовольствие, стоимость хорошего прибора достигает нескольких десятков тысяч долларов.

Основная часть тепловизора — чувствительная матрица, преобразующая тепловое излучение в электрический сигнал. Матрица состоит из множества чувствительных элементов. Она располагается в фокальной плоскости объектива, который проецирует на нее изображение внешних предметов в ИК диапазоне. Снимаемый с матрицы электрический сигнал преобразуется в сигнал видимого изображения, который подается на экран монитора. Он отображается либо в виде черно-

Таблица 2.25.3 Приемные матрицы ИК диапазона

Название	Материал приемника	Размер матрицы	Постоянная времени	Диапазон длин волн, мкм	Размер элемента, мм
Микроболометрическая	Оксид ванадия	160×120...320×240	20 мс	7...14	0,04
Фотонная	Селенид свинца	1×48...1×128	40 мкс	3...5	0,1
РКТ	РКТ	1×32...300×200	2 мкс	3...5, 8...12	0,04

белой картинке, в которой более нагретым телам соответствуют более светлые тона, либо в виде цветного изображения, где цвета от синего до красного соответствуют последовательно повышению температуры.

Чувствительные матрицы тепловизоров могут быть охлаждаемыми или неохлаждаемыми. Охлаждаемые более чувствительны и имеют более низкий уровень шумов. Но они же и дороже. Охлаждение может быть термоэлектрическим (с помощью элементов Пельтье) или с использованием сжиженных газов. Последний вариант обеспечивает более глубокое охлаждение, однако он связан не только с большими расходами на сложную аппаратуру, но и с постоянными затратами на жидкий азот или гелий. Небольшой элемент Пельтье при потребляемой мощности около 5 Вт обеспечивает охлаждение матрицы площадью 1 см² на 30°С.

По принципу действия матрицы делятся на фотонные и тепловые. Фотонные преобразуют поток фотонов непосредственно в электрический сигнал, как например, в фотоэмиссионных датчиках. Тепловые сначала поглощают излучение, что приводит к повышению температуры элемента. В свою очередь, нагрев может регистрироваться либо с использованием болометрических элементов, меняющих свою проводимость, либо пироэлектрических, меняющих поляризацию. Для изготовления ЧЭ используются десятки различных материалов, таких как оксид ванадия, аморфный кремний, титанат свинца, соединение ртуть-кадмий-теллур (РКТ). Сравнительные характеристики матриц на основе некоторых материалов демонстрируют широкий диапазон изменения их параметров (табл. 2.25.3).

Наиболее часто в тепловизорах применяются микроболометрические матрицы. С одной стороны, болометр превосходит по быстродействию медлительные пироприемники, а его чувствительность (менее 0,1 нВт) весьма высока. С другой стороны, его стоимость не так велика, как у охлаждаемых матриц на основе РКТ.

Достоинства тепловизоров:

- обнаружения человека в полной темноте, ночью, в лесу, во время тумана, дождя, снегопада; длины волн ИК излучения превышают длины волн видимого света, поэтому ИК излучение в меньшей степени рассеивается на капельках тумана или частицах пыли и обеспечивает большую дальность видимости;
- пассивный принцип действия; тепловизор полностью маскируем, он не требует подсветки;

изображение почти не зависит от времени суток или внешнего освещения;

- потенциально высокая помехоустойчивость; возможность отслеживать траекторию движения и отсеивать случайные воздействия, не складывающиеся в непрерывную траекторию; возможность точного указания текущего положения нескольких объектов одновременно; обнаружение не только движущихся, но и неподвижных объектов;
- обнаружение любых нагретых объектов, автомобилей, работающей техники;
- возможность записи изображений.

Недостатки тепловизоров:

- высокая стоимость, хотя имеется заметная тенденция к снижению их цены;
- тепловизор не дает резкого детального изображения; по тепловой картинке трудно идентифицировать личность человека;
- ограниченный срок службы некоторых типов чувствительных матриц;
- отсутствие программного обеспечения для автоматического обнаружения человека на тепловой картинке; оно отличается от обработки видеозаписей в области видимого света, например, в части обнаружения неподвижных объектов, излучающих тепло.

Параметры типичного тепловизора: ЧЭ – микроболометрическая матрица на основе оксида ванадия; размеры матрицы – от 20×20 до 320×240 элементов; чувствительность к электромагнитному излучению в диапазоне длин волн 7...14 мкм; диапазон измеряемых температур – от минус 10 до плюс 200...300 градусов; минимальный порог обнаружения разности температур – 0,02...0,2 градуса; средний порог – 2 градуса; дальность действия – 100...300 м; угол поля зрения – 10...40 градусов; наработка на отказ – 40 тыс. часов; напряжение питания – 10...20 В; потребляемая мощность – 15...20 Вт; диапазон рабочих температур – от минус 50...0 до плюс 50...60 градусов; размеры – от 100×100×100 мм до 400×100×100 мм; масса – 0,6...4 кг; часто имеется видеовыход (PAL) или выход для записи на компьютер (RS232); стоимость – 100...250 тыс. рублей (3000...8000 \$).

2.26. Фотолучевые СО

Принцип действия фотолучевого СО основан на регистрации прерывания луча электромагнитного излучения во время пересечения его нарушителем. Отличие от радиолучевого СО состоит в использовании излучения с более короткой длиной волны. Малая длина волны позволяет сконцентрировать энергию в виде очень узкого луча. Но она же приводит к более интенсивному рассеянию на частицах малого размера. Фотолучевые СО могут работать в диапазонах ультрафиолетового (УФ) излучения (длина волны $\lambda < 0,38$ мкм), видимого света ($0,38 < \lambda < 0,76$ мкм) или инфракрасного (ИК) излучения ($\lambda > 0,76$ мкм). Обычно выбирается диапазон ИК, поскольку источники видимого света немаскируемы, а УФ – небезопасны, дороги и требуют большего расхода энергии. Длина волны ИК излучения чаще всего составляет $0,8...1,0$ мкм, она лежит лишь чуть выше интервала длин волн видимого света и значительно отличается от диапазона, используемого в ИК пассивных СО.

Фотолучевое СО состоит из излучателя (И), приемника (П) и блока обработки (БО), активирующего сигнал тревоги при появлении объекта обнаружения (ОО). Диаграммы направленности (ДН) излучателя и приемника ориентируются своими осями друг на друга (рис. 2.26.1). В результате образуется ЗЧ малого диаметра. Для длины участка $L = 10...100$ м диаметр первой зоны Френеля в центре участка составит $2R_1 = (\lambda L)^{1/2} \approx 0,3...1$ см. Таким образом, узкий прямолинейный луч диаметром до нескольких сантиметров формируется независимо от величины угла ДН θ . Вблизи от И и П ширина луча несколько уже, чем в средней части участка. Малая величина угла ДН θ выбирается для концентрации энергии в заданном направлении, повышения дальности действия излучателя и избавления от побочных отражений. Минимальное значение угла составляет примерно $\theta \approx 0,01...0,02$, так как для СО с меньшими его значениями трудно добиться точного совмещения ДН излучателя и приемника.

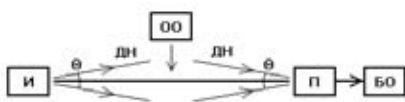


Рис. 2.26.1 Фотолучевое СО

Фотолучевые СО могут носить другие названия: фотоэлектрические датчики, ИК активные извещатели, ИК лучевые извещатели, активные лучевые ИК извещатели, ИК барьеры, оптические СО, оптические лучевые извещатели или линейные активные оптико-электронные извещатели. Названий много, но суть одна. Почти все они работают в диапазоне ИК, даже если об этом не упоминается в названии, а термин оптический относится к принципу действия, основанному на законах геометрической оптики.

Фотолучевые СО имеют давнюю историю, они эксплуатируются в течение многих десятков лет. Первые

из них работали в области видимого света, но затем постепенно перешли в более удобный диапазон ИК. Благодаря предельной простоте устройства, доступности комплектующих и дешевизне, фотолучевые СО находят широкое распространение как внутри, так и вне помещений. Они обладают всеми преимуществами активных линейных СО. Излучатель всегда работает в импульсном режиме, что способствует не только снижению потребляемой мощности, но и повышению помехоустойчивости. Обнаружение постоянного уровня излучения на фоне широкополосного солнечного или искусственного освещения и фликкер-шумов было бы практически невозможно. Любая взвешенная частица размером более длины волны $\lambda \approx 1$ мкм ослабляет ИК излучение, поэтому фотолучевые СО чувствительны к пыли, грязи, осадкам. Их помехоустойчивость ниже по сравнению с радиолучевыми СО, они требуют периодической очистки и протирки, даже при работе внутри помещений.

При разумных уровнях мощности излучателя и воздействии естественных для улицы помех длина участка не превышает 300 м. Внутри помещений, где количество возможных помех значительно меньше, дальность может быть увеличена в несколько раз. Однако, исходя из практических потребностей, комнатные фотолучевые СО имеют дальность до нескольких десятков метров. Внутри зданий и помещений они устанавливаются в коридорах, проходах, холлах, на выходе из лифта, вдоль стен с рядами окон или витрин; вне помещений – вдоль прямолинейных участков забора, на въездных воротах или калитках. Область использования фотолучевого принципа обнаружения не ограничивается охранной сигнализацией, она гораздо шире и включает в себя автоматическое открывание/закрывание дверей, организацию прохода и подсчет числа людей, в том числе в метро или в лифтах. Большое количество фотолучевых датчиков применяется в промышленной автоматике.

Один узкий луч перекрывает незначительную область пространства. Поэтому однолучевые СО целесообразно устанавливать в верхней части или вдоль полотна забора на расстоянии около 0,3 м от него. В свободном пространстве лучше использовать многолучевые системы. Они состоят из нескольких лучей, полностью перекрывающих проход или витрину. Например, можно установить излучатели вдоль одной вертикальной штанги высотой 2,5...3,5 м равномерно с шагом около 0,3 м. На другой такой же штанге устанавливаются приемники. Разместив штанги по краям ворот, получим ЗО в виде высокой вертикальной шторы, под которой нельзя проползти и которую невозможно перепрыгнуть. Множество лучей, разнесенных по вертикали, позволяет повысить помехоустойчивость при воздействии мелких животных, птиц, переносимого ветром мусора, когда перекрываются не несколько лучей сразу, а только один отдельный луч. Множество лучей, разнесенных по горизонтали, дают возможность

определять направление движения ОО и оценивать его размеры и скорость. Обычное плоское зеркало небольших размеров позволяет блокировать два смежных линейных участка одним фотолучевым СО. Некоторые фотолучевые СО являются однопозиционными, в них И и П находятся в одном корпусе, а их почти параллельные ДН направляются на специальный отражатель или катафот. В результате не требуется прокладка двух отдельных кабелей к И и П, упрощается монтаж и удешевляется СО.

В основе физической модели обнаружения фотолучевого СО лежат оценки уровней принимаемой мощности ИК излучения при воздействии полезных и помеховых факторов. Модель позволяет определять диапазон изменения амплитуд и длительностей сигналов от различных воздействий в тех или иных условиях. Источник излучения характеризуется, прежде всего, своей мощностью $W_{\text{прд}}$. Она называется также потоком излучения (или потоком энергии) и измеряется в ваттах (или кратных единицах). В диапазоне видимого света ее аналогом является световой поток, измеряемый в люменах (лм). Связь между световыми и энергетическими единицами определяется соотношением $1 \text{ лм} = 0,0016 \text{ Вт}$ (при длине волны излучения $\lambda = 555 \text{ нм}$). Это единственное выражение, устанавливающее переход от световых единиц к энергетическим и обратно. Для фотолучевых СО обычно $W_{\text{прд}} = 0,01 \dots 1 \text{ Вт}$.

Излучатель посылает в различных направлениях разные порции мощности. Сила излучения точечного источника I определяется мощностью излучения ΔW , распространяющегося в пределах небольшого телесного угла $\Delta \Omega$, измеряемого в стерadiansах (ср), то есть $I = \Delta W / \Delta \Omega$. Величина I измеряется в Вт/ср. В диапазоне видимого света ее аналогом является сила света, измеряемая в канделах (кд), при этом $1 \text{ кд} = 1 \text{ лм/ср}$. Сила излучения зависит от направления, она максимальна вдоль оси излучателя, и уменьшается при отклонении от оси. Углом диаграммы направленности (ДН) θ считается плоский угол между направлениями, вдоль которых сила излучения ослабевает до уровня 0,5 от максимального. Чтобы подчеркнуть, что угол измеряется в обе стороны от оси, и что он измеряется по половинному уровню, часто можно встретить обозначение $\theta = 2\theta_{1/2}$. Для малых углов ДН телесный угол Ω примерно равен $\Omega \approx \theta^2$. Точная связь определяется очевидным выражением $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta/2))$. Угол ДН источников излучения, работающих на большие расстояния, обычно составляет около $\theta = 0,1$ (6°). Если считать, что весь поток излучения (или значительная его часть) направляется в пределах угла ДН, то можно оценить среднюю величину силы излучения выражением $I \approx W_{\text{прд}} / \theta^2$.

По мере удаления от источника излучения плотность потока энергии (то есть мощность ΔW , приходящая на единичную площадь, перпендикулярную к направлению потока) уменьшается. Она называется облученностью. Поскольку площадь ΔS растет с расстоянием L согласно соотношению $\Delta S = \Omega L^2$, то облученность в точке приема составит $E = \Delta W / \Delta S = I / L^2 \approx W_{\text{прд}} / (\theta L)^2$, где L – расстояние от излучателя до при-

емника, $L = 10 \dots 100 \text{ м}$. Величина облученности измеряется в единицах Вт/м². В диапазоне видимого света ее аналогом является освещенность, измеряемая в люксах (лк), $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$. Величина облученности для приемников фотолучевых СО составляет около $E \approx W_{\text{прд}} / (\theta L)^2 = (0,01 \dots 1) / (0,1 \times (10 \dots 100))^2 = 0,0001 \dots 1 \text{ Вт/м}^2$.

Зная уровень облученности в точке размещения приемника, можно найти величину принимаемой мощности $W_{\text{прм}} = ES = W_{\text{прд}} S / (\theta L)^2$, где S – площадь приемного элемента (распологаемого перпендикулярно к потоку). Для типичных приемников при отсутствии оптической системы она составляет $S = 1 \dots 10 \text{ мм}^2$. Оптическая система собирает излучение с площади входного отверстия и направляет его на крошечный ЧЭ, тогда в формуле для $W_{\text{прм}}$ должна фигурировать не площадь ЧЭ, а эффективная площадь $S_{\text{эфф}}$, обычно $S_{\text{эфф}} \approx 100 \text{ мм}^2$. В среднем величина принимаемой мощности составляет около $W_{\text{прм}} = ES = 10^{-10} \dots 10^{-4} \text{ Вт}$. Сравнивая полученные оценки со средним порогом чувствительности ИК датчика $W_{\text{прм}} = 1 \text{ нВт}$, можно сделать вывод, что на небольших расстояниях фотолучевые СО имеют запас мощности, а на дальних расстояниях необходима максимальная мощность излучателя и использование оптических систем. Обратная квадратическая зависимость $W_{\text{прм}}$ от L ограничивает длину участка величиной в несколько сотен метров. Теоретический предел составляет $L_{\text{max}} = (W_{\text{прд}} S / W_{\text{прм}})^{1/2} / \theta = (1 \times 10^{-4} / 10^{-9})^{1/2} / 0,1 = 3000 \text{ м}$. Он может быть достигнут в условиях полной прозрачности атмосферы.

Полученное соотношение между $W_{\text{прм}}$ и $W_{\text{прд}}$ носит качественный характер и требует уточнения. Распространение излучения сопровождается дополнительными потерями: за счет рассеяния энергии вне угла ДН, потерь в оптических системах И и П, ослабления потока энергии в атмосфере. Для учета потерь необходимо ввести коэффициент ослабления $K_{\text{осл}}$ ($0 < K_{\text{осл}} < 1$) и тогда соотношение запишется в виде $W_{\text{прм}} = K_{\text{осл}} W_{\text{прд}} S / (\theta L)^2$.

Обратимся к более детальной модели И, которая позволит с одной стороны оценить долю теряемой в нем мощности, а с другой – уточнить ряд его параметров. Простейший источник ИК энергии представляет собой плоский элемент, испускающий лучи однородно по всем направлениям (рис. 2.26.2). Тогда вдоль нормали к площадке проходит ось максимального излучения элемента. Из точки наблюдения А, находящейся под углом ψ к оси, видимая площадь излучателя пропорциональна величине $\cos \psi$, а значит сила излучения в данном направлении $I = I_0 \cos \psi$, где I_0 – максимальная сила излучения вдоль оси ($\psi = 0$). Величина I не зависит от угла ϕ проекции точки наблюдения А на плоскость источника излучения. Такой простейший источник называется ламбертовским. Угол ДН определяется из условия $I = I_0/2$, что всегда дает значение $\cos(\theta/2) = 1/2$ или $\theta = 2\pi/3$ (120°). Поток энергии ламбертовского источника в направлении произвольной точки А определяется соотношением $dW = I d\Omega = I_0 \cos \psi \sin \psi d\psi d\phi$. Интегрируя данное выражение в пре-

делах $0 < \psi < \pi/2$, $0 < \phi < 2\pi$ получаем связь полной излучаемой мощности W и силы излучения вдоль оси максимального излучения I_0 в виде $W = \pi I_0$. Интегрируя то же выражение в пределах $0 < \psi < \theta/2$, $0 < \phi < 2\pi$ получаем мощность, излучаемую в пределах угла ДН $W_\theta = 3\pi I_0/4$. Она составляет 75% от всей излучаемой мощности. Полученные соотношения позволяют по одному из параметров (W или I_0) определять параметры излучения в любом направлении. Характеристики плоских излучающих элементов без оптики хорошо согласуются с параметрами ламбертовских источников.

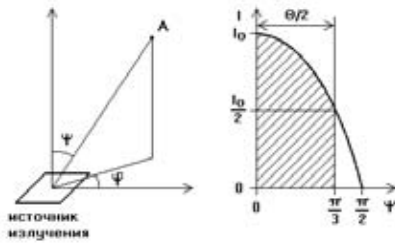


Рис. 2.26.2 Ламбертовский источник излучения

При сужении ДН плотность потока перераспределяется в пределах угла $0 < \psi < \pi/2$ в сторону меньших углов. Зависимость силы излучения от угла можно приближенно описать выражением $I = I_0(\cos\psi)^n$, где n – показатель степени сужения ДН, $n > 1$ и он не обязательно целый. Значение параметра $n = 1$ соответствует ламбертовскому источнику. Ясно, что чем больше n , тем уже ДН. Угол ДН θ определяется из соотношения $(\cos(\theta/2))^n = 1/2$, откуда $\theta = 2 \arccos((1/2)^{1/n})$ или $n = \ln(0,5) / \ln(\cos(\theta/2))$. Аналогично предыдущему интегрированием выражения $dW = 2\pi I_0(\cos\psi)^n \sin\psi d\psi$ в пределах $0 < \psi < \pi/2$ получаем для излучаемой мощности выражение $W = 2\pi I_0/(n+1)$. Доля мощности, излучаемой в пределах угла ДН, получается интегрированием того же соотношения $dW = 2\pi I_0(\cos\psi)^n \sin\psi d\psi$ в пределах $0 < \psi < \theta/2$. Она составляет $W_\theta/W = 1 - (1/2)^{1+1/n}$. Доля мощности убывает от 0,75 до 0,5 при возрастании n от 1 до ∞ . Приведенные выражения дают возможность оценивать силу излучения в любом направлении по известным значениям W и θ для источников с узкой ДН. Зависимость отношения W/I_0 от угла θ показана на рисунке 2.26.3. Она хорошо согласуется с экспериментальными данными при больших углах θ , но при малых углах дает несколько заниженные значения, так как реально доля мощности, направляемой оптической системой внутрь угла ДН, оказывается в 1,5...2 раза меньше. В связи с этим для излучателей с широкой ДН необходимо брать примерно двухкратный запас по излучаемой мощности, а для узкой – четырехкратный ($K_{осл} = 0,25...0,5$).

Пример. Оценим силу излучения источника вдоль оси I_0 и облученность E на расстоянии $L = 100$ м, зная его мощность $W = 100$ мВт и угол ДН $\theta = 70^\circ$. Находим показатель степени сужения ДН $n = \ln(0,5) / \ln(\cos(\theta/2)) = 3,47$. Сила излучения вдоль оси $I_0 = (n+1)W/2\pi = 0,07$ Вт/ср, облученность в данном направлении на расстоянии 100 м составит $E = I_0/L^2 = 7$ мкВт/м². На границе ДН ($\psi = \theta/2$) сила излучения в два раза меньше

$I = 0,035$ Вт/ср, а облученность $E = I/L^2 = 3,5$ мкВт/м². На приемный элемент площадью $S = 1$ мм² попадет всего лишь $W_{прм} = ES = 3,5$ пВт. Доля мощности, излучаемой в пределах угла ДН, составляет $W_\theta/W = 1 - (1/2)^{1+1/n} = 0,6$ или 60 мВт.

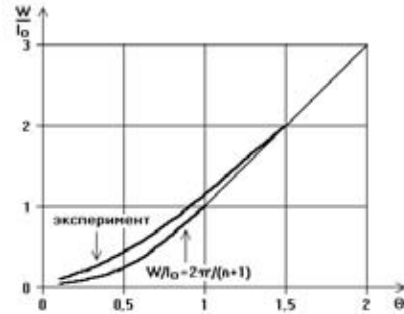


Рис. 2.26.3 Зависимость отношения W/I_0 от угла ДН θ

Перейдем к анализу помеховых факторов и степени их влияния на работу фотолучевых СО. Наиболее важным фактором является ослабление ИК излучения за счет рассеяния на частицах, находящихся в воздухе (пыль, дымка, туман, капли дождя). Особенно сильно их влияние проявляется на улице. Интенсивность излучения за счет рассеяния ослабевает (дополнительно к другим факторам) по закону $I(L) = I_{нач} \exp(-\gamma L)$, где $I_{нач}$ – начальная интенсивность, γ – коэффициент ослабления, L – проходимое расстояние, все линейные размеры традиционно измеряются в километрах. В чистой атмосфере величина γ не превышает $0,01$ км⁻¹. При наличии в воздухе различных частиц коэффициент ослабления описывается эмпирической формулой $\gamma = 3,92/D \times (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}$, где D – метеорологическая дальность видимости (МДВ) в км, λ – длина волны в мкм, $\lambda_0 = 0,55$ мкм. Чем больше длина волны, тем меньше рассеяние, и тем больше проходимое лучом расстояние. Величина $\alpha = 0$, если размеры рассеивающих частиц превосходят длину волны λ (дождь, туман). Для очень мелких частиц, например, для дымки, $\alpha = 1,3$, правда, дымка не бывает густой с малой МДВ (за исключением дыма во время пожара).

Во время очень сильного ливня интенсивностью 100 мм/час МДВ уменьшается до $D = 0,46$ км. Для значения $\alpha = 0$ получаем коэффициент ослабления $\gamma = 3,92/D = 3,92/0,46 = 8,5$ км⁻¹. Ослабление (за счет рассеяния) на длине $L = 100$ м составит $K_{осл} = I/I_{нач} = \exp(-\gamma L) = \exp(-0,85) = 0,43$. Следовательно, для работы на улице во время дождя (вплоть до максимальной интенсивности) запас мощности излучателя должен составлять $1/0,43 = 2,4$ раза.

Размер капель тумана все еще превосходит длину волны $\lambda \approx 1$ мкм, поэтому показатель $\alpha = 0$. В средней полосе несколько часов в году наблюдается туман с МДВ $D = 0,05$ км, откуда коэффициент ослабления $\gamma = 3,92/D = 3,92/0,05 = 78$ км⁻¹. Ослабление на длине $L = 100$ м составит $K_{осл} = I/I_{нач} = \exp(-\gamma L) = \exp(-7,8) = 0,0004$. Таким образом, работа на улице во время тумана требует от излучателя запаса мощности излучателя должен составлять $1/0,0004 = 2500$ раз (что эквивалентно 34 дБ/100 м = 340 дБ/км = $0,34$ дБ/м). Но даже такой запас не спасет, если случит-

ся более густой туман с МДВ менее 50 метров. Для сравнения – средства атмосферной лазерной связи, устанавливаемые на европейской части России, рассчитываются на максимальное затухание 108 дБ/км. Дальность связи обычно не превышает 1,5...2 км. Порог срабатывания дымовых противопожарных извещателей (работающих аналогично фотолучевому СО) рассчитывается на коэффициент ослабления около 0,1 дБ/м.

Пример. Найдем МДВ для дыма, в котором коэффициент ослабления на длине волны $\lambda = 0,85$ мкм составляет 0,1 дБ/м. В расчете на 1 км коэффициент ослабления в 1000 раз больше, чем на 1 м, то есть он равен 100 дБ/км. Отсюда $\exp(-\gamma) = 10^{-10}$ или $\gamma = 10 \ln(10) = 23 \text{ км}^{-1}$ и далее МДВ $D = 3,92/\gamma \times (\lambda/\lambda_0)^{-1,3} = 0,097 \text{ км} \approx 100$ метров. На расстоянии $L = 10$ м ослабление ИК излучения за счет дыма составит $I/I_{\text{нач}} = \exp(-\gamma L) = \exp(-23 \times 0,01) = 0,8$.

Другими помеховыми факторами, влияющими на работу фотолучевых СО, являются турбулентности воздуха и различные случайные предметы, способные ослабить интенсивность луча. Следует иметь в виду, что степень проницаемости в ИК диапазоне и в диапазоне видимого света отличаются между собой. Тонкий слой пластмассы или лист бумаги почти прозрачны для ИК излучения. Голая рука ослабляет луч диапазона 0,8...0,9 мкм примерно в 10...20 раз. Полностью задерживают ИК излучение металлы, даже в тонком слое. Отдельные непрозрачные частицы (пыль, загрязнение оптических элементов) также ослабляют ИК излучение.

Подводя итог, получаем, что для стабильной работы фотолучевого СО на улице требуется запас мощности излучателя до 5000 (на длине 100 м), в помещении – около 2.

К помеховым факторам фотолучевых СО относятся также яркий солнечный свет или искусственное освещение, способные привести к засветке ИК приемников. Для защиты от них применяются ИК фильтры, козырьки и юстировка датчиков при установке. Против инея и налипания снега на оптические элементы служат козырьки и внутренние обогреватели блоков И и П.

Обратимся далее к временным параметрам полезных сигналов, формируемых на выходе приемника ИК излучения. Диаметр луча не превосходит нескольких сантиметров, поэтому время его перекрытия Т при пересечении луча человеком определяется шириной человека $B \approx 0,35$ м. Оно равняется $T = B/(v \sin \phi)$, где v – скорость человека, ϕ – угол между направлением скорости и лучом. Реально угол меняется в пределах $\sin \phi = 0,5...1$, так как ОО редко движется вдоль луча. Для скоростей $v = 0,3...5$ м/с получаем оценку $T = 0,07...2,3$ с.

Приведенные оценки позволяют определить параметры импульсного режима работы СО. Длительность импульса излучения связана с быстродействием излучателя, приемника и схемы БО. Два первых параметра обычно не превышают долей микросекунд, последний – для недорогих ОУ общего назначения и цифровых КМОП микросхем стандартной логики – составляет единицы микросекунд. Поэтому длительность импульса находится в пределах $\tau = 10...100$ мкс.

Период повторения импульсов $T_{\text{повт}}$ должен быть хотя бы на порядок меньше минимального значения длительности перекрытия луча $T = 0,07$ с, поэтому $T_{\text{повт}} = 0,5...10$ мс. Величину выигрыша импульсного режима по сравнению с непрерывным определяет скважность, равная $T_{\text{повт}}/\tau = 5...1000$. Именно во столько раз уменьшается средний ток, потребляемый И, и повышается его надежность. Кроме всего прочего, импульсный режим повышает помехоустойчивость к изменениям фоновой засветки и к фликкер-шумам.

Импульсные генераторы с большой скважностью могут быть реализованы на транзисторах, операционных усилителях (ОУ) или на цифровых интегральных микросхемах (рис. 1.5.5...1.5.9). Они отличаются степенью сложности и удобством настройки.

В состав И и П входит несколько важных дополнительных элементов. К ним относятся оптические системы и ИК фильтры. Они позволяют сузить ДН и уменьшить влияние излучения вне выбранного ИК диапазона. Данные элементы не являются обязательными, так как часто входят в состав излучающих или приемных преобразователей в качестве части их корпуса. Встроенная линза формирует узкий луч ДН, благодаря установке излучающего или приемного элемента точно в ее фокусе.

Простейшая оптическая система – это металлическая трубка, в глубине которой располагается излучающий или приемный элемент. При установке на И она не дает почти никакого выигрыша, так как поток энергии, излучаемый в стороны от оси, просто теряется. Небольшой полезный эффект достигается за счет избавления от ложных лучей, образуемых при отражении излучения от окружающих предметов. При установке на П защитная трубка ослабляет влияние фоновой засветки мощными источниками ИК излучения: солнечными лучами, лампами накаливания, автомобильными фарами. Трубка может трансформироваться в козырек, поскольку источники паразитного излучения обычно располагаются сверху.

Редко используемая, но простая и полезная оптическая система – фокон. Он представляет собой металлический конус с отполированной внутренней поверхностью. Излучатель или приемник размещаются внутри конуса вблизи от его вершины. ИК лучи, отражаясь от поверхности конуса, концентрируются вдоль его оси. Угол ДН фокона достигает $\theta = 0,2$ (около 10°). При сравнительной простоте фокон проигрывает другим оптическим системам по потерям мощности.

Следующим шагом на пути уменьшения ДН является вогнутое параболическое зеркало. И или П устанавливаются в его фокусе. Длины волн ИК лучей, используемых в фотолучевых СО, лежат вблизи от видимой области спектра, поэтому качество отражающей поверхности зеркала легко проверяется на глаз. Так же просто определяется положение его фокуса. Хорошее зеркало дает угол ДН до $\theta = 0,02$ (около 1°). Зеркало может быть изготовлено из металла и отполировано. Для обеспечения долгой стабильной работы необходимо покрыть отражающую поверхность защитным

слоем. Параболическое зеркало обеспечивает минимальные потери излучения, но оно сложно в изготовлении.

Выпуклая линза является наиболее распространенной разновидностью оптической системы. Дешевые линзы изготавливаются из пластмассы (акрила или поликарбоната) методом штамповки. Они технологичны, хотя и не обладают полной прозрачностью в ИК диапазоне. Линзы, интегрированные в излучающие или приемные элементы, обеспечивают угол ДН $\theta = 0,2...1$ ($10...60^\circ$), специальные линзы – до $\theta = 0,02$ (1°). Они устанавливаются как на излучателе – для концентрации потока энергии вдоль оси и повышения дальности, так и на приемнике – для уменьшения помех от окружающих предметов. Для ближнего ИК диапазона можно приобрести готовые линзы с углом ДН до $\theta = 0,1$ ($\pm 3^\circ$) известных фирм Edison, Khatod Optoelectronic, Ledil, Carclo Technical Plastics, Fraen SRL. Основная сложность при использовании линз, непрозрачных для видимого света, заключается в совмещении излучающего или чувствительного элемента с фокусом линзы.

Одной из серьезных проблем для фотолучевых СО является ухудшение работоспособности в случае запотевания оптических систем или покрытия их инеем или росой. Особенно серьезно она проявляется при работе СО на улице или в неотапливаемом помещении. Для борьбы с запотеванием применяются обогриватели оптики, размещаемые внутри корпуса. Типичный нагревательный элемент уличного СО имеет мощность около 10 Вт (24 В, 0,4 А). Он включается не постоянно, а лишь при приближении к точке росы или обмерза-

ния, для чего содержит дополнительные датчики температуры и влажности.

В качестве излучателей фотолучевых СО применяются ИК светодиоды или ИК лазеры. Полупроводниковые лазеры имеют малые размеры. При высоком КПД до 50% они обладают большой излучаемой мощностью до 10 Вт. Узкая ширина линии (доли нанометра) обеспечивает высокую помехоустойчивость к излучениям посторонних источников. Однако высокая цена лазеров ограничивает возможности их использования.

ИК светодиоды наиболее подходят для использования в составе И. Они дешевы, просты, надежны, обладают стабильными характеристиками и не требуют специальных источников питания. Обычно непрерывная мощность ИК излучающих диодов лежит в пределах 1...100 мВт при постоянном токе 20...300 мА. В импульсном режиме они выдерживают в 10...20 раз больший ток, а мгновенная мощность повышается примерно пропорционально току и достигает единиц ватт. Падение напряжения на ИК светодиоде несколько ниже, чем на светодиоде видимого диапазона, оно составляет 1,6...2,0 В при токах в десятки миллиампер, при импульсных токах порядка ампера оно повышается до нескольких вольт. Важно не превышать допустимых значений тока и длительностей импульса, так как это сокращает срок службы излучающего диода. КПД ИК диодов весьма высок, он составляет 0,01...0,2. Время включения/выключения ИК светодиодов обычно не превышает 1 мкс. Основные параметры некоторых ИК излучающих диодов приведены в таблице 2.26.1.

Таблица 2.26.1 Основные параметры ИК излучающих диодов

Название	Излучаемая мощность, мВт	Максимум спектра, нм	Угол ДН θ	Постоянный ток, мА	Импульсный ток, мА	Диапазон рабочих температур, °С	Стоимость, руб.
АЛ108АМ	2	940	50°	100	4000	-60...+85	12
АЛ118А	2	865	50°	50	500	-40...+85	20
АЛ107А	5,5	950	30°	100	800	-60...+85	20
АЛ145А	8	975	80°	100	1100	-60...+85	7
АЛ107Б	9	950	15°	100	600	-60...+85	20
АЛ115А	10	950	50°	50	600	-40...+85	130
АЛ156В	15	850	30°	100	1500	-60...+70	10
TSHA5203	25	875	24°	100	2500	-55...+100	20
КА-3528F3С	(30)	940	120°	50	1200	-40...+85	10
ЗЛ123А	30	940		300	10000	-60...+85	
TSAL4400	35	940	50°	100	1500	-55...+100	15
TSAL6200	35	940	34°	100	1500	-55...+100	15
TSAL5100	35	940	20°	100		-55...+100	15
VSMG3700	40	850	120°	100	1000	-40...+85	
L-34SF7С	(50)	850	50°	50	1000	-40...+85	25
TSHG6200	50	850	20°	100	1000	-40...+85	
TSFF6210	50	870	20°	100	1000	-40...+85	
TSHF5210	50	890	20°	100	1000	-40...+85	
TSHG5510	55	830	76°	100	1000	-40...+85	
EDEI-1LA3	200	850	120°	700			
EDEI-1LA3 (с линзой)	200	850	25°	700			
ЗЛ130А	350	950		3000		-60...+85	

Разброс яркости ИК светодиодов от образца к образцу достигает 40%. Кроме того, яркость уменьшается при увеличении температуры по линейному закону с коэффициентом около минус 0,01/°C. Это значит, что при возрастании температуры от 20° до 60° излучаемая мощность падает на 40%. Яркость светодиода ослабевает также со временем. За 1000 часов работы она уменьшается на величину до 5%, особенно если ток близок к максимально допустимому. Если рассчитывать на длительную работу прибора, необходимо предусмотреть соответствующий запас мощности, чтобы с течением времени или при изменениях температуры СО не потеряло работоспособности. В этом случае необходимый запас мощности составляет около 2.

Значительная часть ИК излучающих диодов выполняется на основе арсенида галлия. В зависимости от технологии производства максимум спектра излучения (так называемая основная длина волны) при комнатной температуре 20...25°C составляет 850...970 нм. Ширина спектра ИК излучающих диодов (по уровню 0,5 от максимального) обычно равна $\Delta\lambda = 20...50$ нм (рис. 2.26.4). Максимум спектра смещается при изменениях температуры с температурным коэффициентом 0,2...0,3 нм/°C. Полный спектр ИК излучающих диодов в диапазоне температур от минус 60 до плюс 60°C лежит в пределах 800...1010 нм. Это необходимо учитывать при выборе приемника излучения, спектр которого должен совпадать со спектром излучателя или немного превышать его.

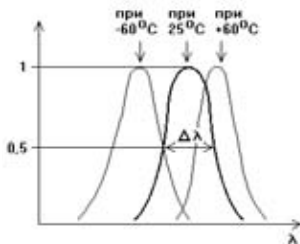


Рис. 2.26.4 Спектр излучения ИК диода

Для того, чтобы обеспечить достаточную мощность излучателя, необходимо дополнить импульсный генератор (рис. 1.5.5...1.5.9) усилителем тока. Если требуется ток в районе десятков миллиампер, то можно просто установить ИК излучающий диод вместо диода VD1 в схеме импульсного генератора (рис. 1.5.6а) и изменить величины сопротивлений резисторов R1, R2, R3 под желаемые значения тока и временных параметров импульсов. Можно воспользоваться и любой другой схемой генератора, добавив к ней ключевой усилитель на одном транзисторе (рис. 2.26.5). Величина тока корректируется изменением сопротивления резистора R2.

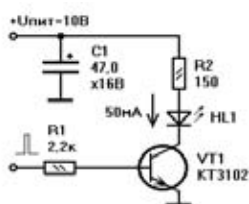


Рис. 2.26.5 Усилитель тока на 50 мА

Импульсы тока порядка сотен миллиампер требуют введения дополнительного каскада усиления (рис. 2.26.6) и увеличения емкости сглаживающего конденсатора C1. Для повышения излучаемой мощности без дополнительных затрат ИК диоды можно соединять последовательно, корректируя значение сопротивления ограничительного резистора R4.

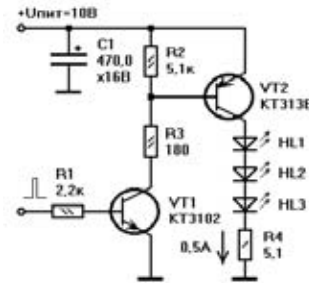


Рис. 2.26.6 Усилитель тока на 0,5 А

Если необходимы токи порядка ампер, следует ввести еще один каскад усиления (рис. 2.26.7). Емкость сглаживающего конденсатора C1 возрастает еще в 10 раз, чтобы обеспечить в момент импульса просадку напряжения питания не более чем на 0,1 В. ИК диоды можно соединять не только последовательно, но и параллельно, обязательно подключая к каждому из диодов токоограничительный резистор, выравнивающий отличия в их ВАХ. Если соединить аноды и катоды диодов (с одним общим ограничительным резистором), то при одинаковом напряжении на диодах через один из них потечет больший ток и он преждевременно выйдет из строя, другой же – не будет отдавать требуемой мощности.

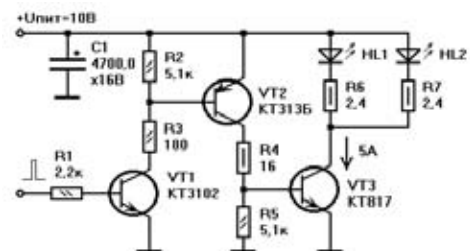


Рис. 2.26.7 Усилитель тока на 5 А

В качестве приемников излучения в области ИК, видимого света и УФ применяются преобразователи семи основных типов: термоэлементы, болометры, пироэлектрические датчики, фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Они обладают различной чувствительностью, быстродействием, диапазоном длин волн, шумовыми и другими характеристиками, поэтому используются в различных областях техники.

Термоэлементы или термоэлектрические датчики представляют собой множество соединенных последовательно термопар. При их облучении в результате нагрева возникает термо-ЭДС. Чтобы обеспечить высокую чувствительность до единиц В/Вт, необходимо набрать большое количество термопар, занимающих

площадь порядка квадратного сантиметра. Термоэлементы имеют низкий уровень сигналов и высокую инерционность.

Болометры – это элементы, меняющие свое сопротивление под действием излучения. Болометры на основе металлов обладают низкой чувствительностью. Полупроводниковые более чувствительны, но менее стабильны. Для обеспечения высокого порога чувствительности (без охлаждения – до 1 нВт) приемный элемент обладает низкой теплоотдачей, и поэтому – лучшим временем установления (порядка 1 мс). Болометры находят применение в ИК пассивных СО.

Пирозлектрические датчики состоят из поглотителя (специальной керамики), которая поляризуется под действием излучения. При высокой чувствительности они реагируют только на изменение потока энергии и характеризуются высоким уровнем шумов и большой инерционностью. Пирозлектрические датчики используются в ИК пассивных СО.

Фотоэлементы – это вакуумные приборы, работающие на основе фотоэффекта. Падающее на фотокатод излучение выбивает из него электроны, которые под действием приложенного напряжения движутся к аноду и создают фототок, пропорциональный интенсивности излучения. В фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) электроны дополнительно ускоряются внешним полем и направляются на специальные пластины (диноды), в результате бомбардировки которых количество электронов лавинообразно возрастает. Чувствительность ФЭУ достигает 10^5 А/Вт, быстродействие – единиц наносекунд, но они требуют высокого и стабильного напряжения питания и аккуратного обращения.

Фоторезисторы изготавливаются из тонких пленок сульфидов или селенидов кадмия или свинца. Сопротивление пленки в полной темноте может достигать 100 МОм. При интенсивном облучении оно уменьшается до сотен ом. Чувствительность фоторезисторов достигает 10^6 В/Вт. Они дешевы и надежны, но обладают нелинейной характеристикой, невысокой точностью, инерционностью (десятки мкс) и низкой стабильностью при изменениях температуры.

Фотодиоды – это полупроводниковые приборы, структура которых сходна с обычным диодом. Любой р-п переход обладает способностью генерировать ток при освещении. В фотодиодах это свойство усилено в определенном диапазоне длин волн. Фотодиоды имеют множество разновидностей: лавинные, Шоттки, рп-фотодиоды, S-фотодиоды. Они отличаются низким уровнем шумов, пороговой чувствительностью до 1 пВт/мм² и быстродействием до десятков пикосекунд. Лавинные диоды по своей чувствительности (50 А/Вт) более чем на два порядка превосходят диоды других типов, но они менее стабильны при изменениях температуры и требуют более высокого напряжения питания (около 40 В). Фотодиоды компактны, дешевы, чувствительны и стабильны.

Фототранзистор не только содержит чувствительный р-п переход, но и усиливает генерируемый фототок. По сравнению с фотодиодом фототранзистор бо-

лее чувствителен (до 10000 А/Вт). Но его отличает повышенный уровень шумов, большой разброс параметров, низкая температурная стабильность и худшая пороговая чувствительность.

Для использования в составе фотолучевых СО, где высокие требования предъявляются к чувствительности, быстродействию, надежности, стабильности, стоимости и простоте использования, и не слишком высокие – к наличию постоянного фона или к точности измерения, – наиболее подходят фотодиоды.

Любой фотодиод может работать в одном из двух режимов: фотогальваническом или фотодиодном. Фотогальванический режим называется также фотовольтаическим или режимом фототока. В этом режиме на фотодиод не подается напряжение смещения, при этом измеряется ток, самостоятельно генерируемый фотодиодом без внешнего источника питания. ИК фотодиод преобразует принимаемую мощность излучения в пропорциональную величину тока. Зависимость тока от поглощаемой мощности сохраняет линейность в диапазоне 6...9 порядков (от пВт до мВт). Для работы в фотодиодном режиме требуется внешний источник питания. Данный режим называется также фоторезисторным. От внешнего источника на фотодиод подается обратное смещение, а сигнал снимается в виде тока или напряжения (как с элемента, меняющего свое сопротивление). В фотодиодном режиме достигается более высокое быстродействие, правда, за счет увеличения уровня собственных шумов и появления так называемого темнового тока (начального тока при отсутствии внешнего облучения). Фотогальванический режим включения фотодиода используется для достижения высокой чувствительности и точности измерения, фотодиодный – для высокой скорости.

В фотогальваническом режиме ток, генерируемый фотодиодом, преобразуется в напряжение с помощью ОУ (рис. 2.26.8). Уровням облученности $E = 10^{-6}...0,1$ Вт/м² при площади ЧЭ около $S = 1$ мм² соответствует диапазон принимаемой мощности $W = ES = 1$ пВт...0,1 мкВт. Токовая чувствительность среднего фотодиода составляет около 1 А/Вт, откуда диапазон токов будет $I = 1$ пА...0,1 мкА. Преобразователь тока в напряжение на микросхеме DA1 имеет коэффициент преобразования, равный $R1 = 100$ МОм = 10^8 В/А = 0,1 мВ/пА. Диапазон выходных сигналов данного преобразователя для облученности $E = 10^{-6}...0,1$ Вт/м² составит 0,1 мВ...10 В. В качестве DA1 используются ОУ с полевыми транзисторами на входе и малым током смещения менее 1 пА, такие как AD645, AD795, CA3420, CA5420, HA5180, ICH8500, OPA128, OPA602, TLC279, TLC1078. Они обеспечивают уровень шума порядка 1 пА (0,1 мВ), то есть пороговую чувствительность по принимаемой мощности до 1 пВт. Особое внимание следует уделить токам утечки схемы, устанавливая элементы на изолирующих стойках и окружая входные цепи охранными дорожками, соединенными с общим проводом, иначе токи утечки по плате превысят выходной ток фотодиода. Полевые транзисторы не отличаются термостабильностью, поэтому уровень шума меняется в зависимости от температуры

и выбранного типа ОУ. Схема характеризуется низким быстродействием, частотный диапазон усилителя не превышает 100...200 Гц. При возрастании площади фотодиода повышается чувствительность, но одновременно понижается верхняя частота пропускания сигналов. Данная схема используется на низких частотах, в основном для целей измерения или калибровки.

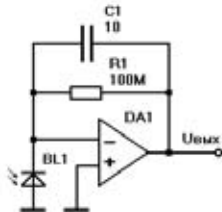


Рис. 2.26.8 Фотогальванический режим включения

Фотодиодный режим включения внешне мало чем отличается от фотогальванического (рис. 2.26.9). Однако, благодаря отрицательному напряжению смещения $U_{см} = -5...-10$ В, емкость фотодиода уменьшается, а быстродействие – увеличивается. Появляется темновой ток порядка 1 нА, вызывающий начальное смещение сигналов. Коэффициент преобразования тока фотодиода в выходное напряжение $U_{вых}$ равен $R1 = 100$ кОм = 10^5 В/А = 0,1 мВ/нА. В качестве DA1 используются ОУ с полевыми транзисторами на входе, обладающие высоким быстродействием и малой входной емкостью, такие как AD823, AD845, HA5160, LF457, OPA606. Уровень шумов усилителя возрастает до единиц наноампера (или 1 нВт принимаемой мощности), зато полоса частот усилителя возрастает до сотен кГц, что позволяет применять фотодиодный режим для усиления коротких импульсов длительностью в десятки микросекунд.

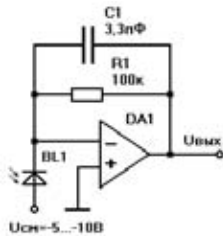


Рис. 2.26.9 Фотодиодный режим включения

На практике используются также другие способы получения сигнала в фотодиодном режиме (рис. 2.26.10). Обычно смещение на фотодиод BL1 подается через подсоединяемый последовательно резистор (R1), а выходной сигнал (в виде импульсов напряжения) снимается с резистора и усиливается с помощью ОУ DA1. Здесь выбрана инвертирующая схема включения, чтобы избежать согласования выходного сопротивления датчика со входными цепями усилителя. Коэффициент усиления составляет $(1 + R3/R2)$. В качестве ОУ необходимо использовать быстродействующие микросхемы, такие как K140УД11, K154УД2, K544УД2, K574УД1 или подобные. Данная схема проста и популярна.

Однако следует иметь в виду, что для достижения требуемой чувствительности необходим подбор величины R1 в пределах 10...470 кОм. ВАХ диода нелинейна, поэтому зависимость величины выходного сигнала от уровня входной мощности также оказывается нелинейной. Параметры ВАХ фотодиода BL1 в сильной степени зависят от температуры. В связи с этим подобные схемы не обеспечивают предельных возможностей измерения мощности.

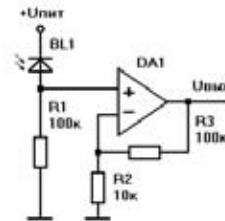


Рис. 2.26.10 Фотодиодный режим с усилением напряжения

Средние значения параметров типичного фотодиода ИК диапазона приведены в таблице 2.26.2. В скобках указан примерный диапазон изменения параметра. Существенное влияние на все параметры фотодиода оказывает площадь приемного элемента. При наличии собирающей линзы, встроенной в корпус приемника, ИК излучение концентрируется на ЧЭ с большей площадью. В этом случае имеет значение эффективная площадь, превосходящая геометрическую площадь самого фотоэлемента. Ширина полосы принимаемого ИК излучения составляет около 300 нм; в нее попадает излучение большинства типичных ИК светодиодов, в том числе с учетом сдвига длины волны при изменении температуры. Спротивление фотодиода при комнатной температуре (в обратном направлении) составляет около 1 ГОм, но оно значительно уменьшается с ростом температуры (как и у обычных полупроводниковых диодов) и может достигать до 1 МОм. Емкость небольшого фотодиода примерно равна 100 пФ (без смещения), она растет с увеличением площади его ЧЭ и уменьшается с возрастанием напряжения обратного смещения. Полоса частот фотодиода без смещения редко превышает 10 кГц; при обратном смещении она достигает 1 МГц, а для обратно смещенных рпн диодов – до 1 ГГц.

Таблица 2.26.2 Параметры типичного ИК фотодиода

Параметр	Среднее значение
Напряжение смещения	5 В (2...15)
Чувствительность	1 А/Вт (0,1...5)
Порог чувствительности	4 нВт (0,001...400)
Максимальная интенсивность	100 мкВт (0,4...400)
Площадь ЧЭ	2 мм ² (0,5...100)
Основная длина волны	850...950 нм
Ширина полосы	200...400 нм
Сопротивление	1 ГОм
Емкость	100 пФ (10...2000)
Эквивалентная мощность шума	10^{-15} Вт/(Гц) ^{1/2}

Таблица 2.26.3 Параметры некоторых ИК фотодиодов

Модель	Чувствительность, А/Вт	Угол ДН θ	Диапазон рабочих температур, °С	Площадь ЧЭ, мм ²	Стоимость, руб.
BL-L512PD	0,05	35°	-40...+80		15
ФД263-01	0,12		-50...+50	9 (30)	90
ФД263	0,15		-50...+50	9	
ФД252	0,35			0,6	
BPW41N	0,6	130°		7,5	20
BPW20RF	0,6	100°	-55...+125	7,5	400
ФД256	0,6			1,37 (4)	70
BPW34	0,7	130°		7,5	60
BPW43	1	50°	-25...+100	0,78	
ФД25К	1,6		-50...+80	2...3	
ФД26К	1,6		-60...+75	2...3	
ФД21КП	2		-60...+70	0,2	40
ФД27К	2,5		-60...+75	2...3	
ФД22КП	2,8		-50...+85	4	120
ФД23К	2,8		-60...+75	2...3	
ФД265-02	3,6		-60...+85	7	90
ФД24К	3,8		-60...+75	78	1300
BPW24R	8	24°	-55...+125	0,78	300

Значения параметров ряда популярных ИК фотодиодов приведены в таблице 2.26.3. Чувствительность фотодиодов задается не только в традиционных единицах А/Вт, но и в единицах тока при условии заданной облученности фотодиода. Перевод одних единиц в другие производится умножением на площадь ЧЭ (или на его эффективную площадь). Если площадь неизвестна, можно найти диапазон выходных токов непосредственно по известной облученности. В таблице все значения чувствительности приведены к одним и тем же единицам (А/Вт). Под площадью ЧЭ понимается площадь поверхности, на которой происходит преобразование мощности ИК излучения в выходной ток. В скобках приводится значение эффективной площади при наличии в фотодиоде встроенной линзы. Стоимость фотодиода пропорциональна его качеству. Можно подобрать и недорогой экземпляр для работы на малой дальности, и дорогой, обладающий высокой чувствительностью и стойкостью — для использования на большой дальности или в особо сложных условиях.

Преобразование и усиление сигнала с выхода ИК фотодиода можно производить не только с помощью типовых схем (рис. 2.26.8, 2.26.9, 2.26.10), но и с использованием специальных микросхем. К подобным микросхемам относятся, например, ТВА2800,

К1054УП1, КР1056УП1. Достаточно подсоединить к одной из них фотодиод, добавить несколько пассивных элементов и подать напряжение питания. На выходе микросхемы формируется усиленный сигнал с фотодиода в аналоговом виде.

Еще более облегчается задача изготовления фотолучевого СО при использовании готовых модулей ИК приемников. Они широко применяются в блоках дистанционного управления: в телевизорах, рекордерах, кондиционерах и других приборах. В состав отдельного модуля входит фотодиод и схема усиления сигналов. Обычный модуль имеет три вывода: на два из них подается напряжение питания, с третьего снимается выходной сигнал. Он имеет цифровое качество и подается непосредственно на логическую схему анализа. Основные параметры некоторых модулей ИК приемников приведены в таблице 2.26.4.

Модули работают на частотах около 40 кГц. Для поддержания максимального усиления следует обеспечивать стабильность частоты излучателя в пределах $\pm 5\%$. Усиление на фиксированной частоте значительно снижает уровень собственных шумов. Напряжение питания модуля составляет 5...12 В, его стоимость — 1...2 \$. Часто модуль содержит встроенный электромагнитный экран, снижающий уровень наводок. При

Таблица 2.26.4 Модули ИК приемников

Название	Частота, кГц	Угол ДН θ	Минимальный входной уровень облученности, мВт/м ²	Стоимость, руб.
IS1U60L	38	90°		
SFH506-36	36	90°	0,5	
TSOP1730	30	90°	0,5	70
TSOP1736	36	90°	0,5	60
TSOP1738	38	90°	0,5	40
TSOP1756	56	90°	0,5	80
TSOP4038	38	90°	0,3	
TSOP5038	38	100°	0,5	
TSOP58038	38	90°	0,5	

чувствительности $0,1...0,5$ мВт/м² обеспечивается дальность связи излучателя и приемника до $10...30$ м.

Для работы модуля ИК приемника требуется минимум деталей (рис. 2.26.11). Конденсатор С1 емкостью $10...47$ мкФ совместно с резистором R1 ($47...100$ Ом) способствует сглаживанию напряжения питания. Резистор R1 можно заменить индуктивностью $100...200$ мкГн. Резистор R2 величиной $10...47$ кОм подтягивает выходной сигнал к плюсу питания; он может входить в состав самого модуля. Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ при отсутствии излучения близок к напряжению питания. При приеме излучения (с заданной частотой) он уменьшается почти до 0 В. В качестве модуля лучше всего использовать приемники TSOP4038, TSOP5038 или TSOP58038 фирмы Vishay. В них отсутствуют цепи автоматической подстройки под окружающую освещенность, поэтому они менее подвержены образованию ложных лучей в результате отражений от окружающих предметов и обеспечивают срабатывание при медленном пересечении луча.

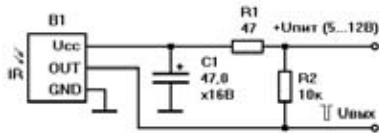


Рис. 2.26.11 Включение модуля ИК приемника

Физическая модель фотолучевого СО, а также анализ ИК излучающих диодов и фотодиодов позволяют синтезировать обобщенный алгоритм работы СО. И постоянно генерирует короткие импульсы электромагнитной энергии длительностью $10...100$ мкс с периодом повторения $0,5...10$ мс. П контролирует поступление импульсов в ослабленном виде. Импульсы усиливаются в полосе, соответствующей их длительности. Коэффициент усиления импульсов устанавливается согласно их ослаблению на заданной дальности и чувствительности приемного элемента. В помещении запас мощности излучателя должен составлять около 4 (2 – на пыль и загрязнения, 2 – на разброс, температурную нестабильность и старение излучателя); на улице – 10000 (2500 – на туман, 2 – на загрязнения и 2 – на излучатель). Если принимаемый уровень импульсов излучения ослабевает более чем на 90% в течение промежутка времени 70 мс, то формируется срабатывание. Величина времени может быть и несколько выше, если в данных условиях (вблизи от забора, двери, лифта) человек не в состоянии двигаться с максимальной скоростью.

Уровень электрических сигналов, снимаемых с фотодиода, крайне низок, поэтому сам фотодиод и первые каскады усиления должны размещаться внутри металлического экрана с небольшим окошком для принимаемого ИК излучения. На улице уровень принимаемого излучения может медленно изменяться во время дождя, снега, тумана, поэтому в цепи усиления необходима схема АРУ, способная изменять коэффициент усиления (или излучаемой мощности) примерно в 10000 раз.

Рассмотрим пример реализации фотолучевого СО. Пусть необходимо перекрыть с его помощью коридор, витрину или проход шириной до $L = 10$ метров и высотой $H = 2...2,5$ метра. Для этого установим с одной стороны 4 излучателя, обозначенных А1, ... А4, а с другой – 4 приемника, обозначенных Б1, ... Б4 (рис. 2.26.12). Нижние блоки разместим на высоте $0,3$ м от пола, а остальные – равномерно с промежутками $0,4...0,6$ м. Если угол ДН излучателей и приемников θ превышает $2H/L$, то между ними может быть сформировано 16 лучей, полностью перекрывающих пространство между стенами.

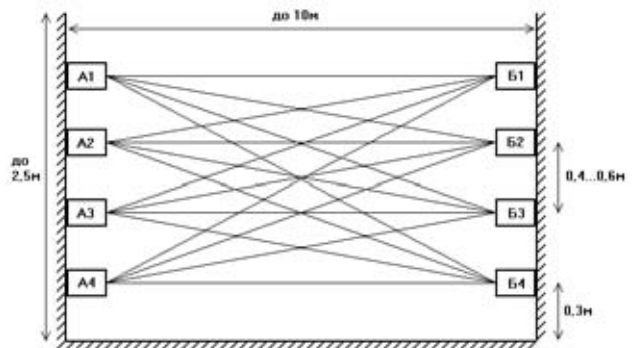


Рис. 2.26.12 16-лучевое СО

Впрочем, размещение излучателей и приемников может быть и другим (рис. 2.26.13). Установив часть из них на полу или на потолке, получим те же 16 лучей, но в другой конфигурации, более равномерно и плотно заполняющих те или иные части окна или коридора в зависимости от размеров и соотношения сторон перекрываемого прохода.

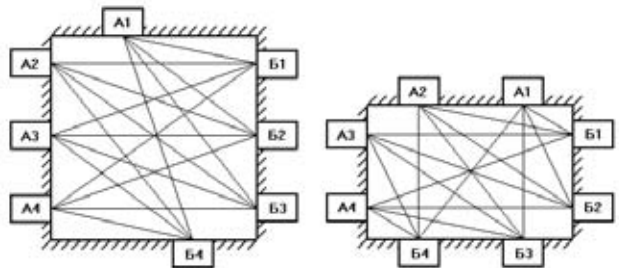


Рис. 2.26.13 Варианты размещения излучателей и приемников 16-лучевого СО

Схема 16-лучевого СО реализуется на одиннадцати цифровых микросхемах серии 561 (рис. 2.26.14). Схема питается напряжением $U_{\text{пит}} = 10$ В. Преобразователь на элементах DA1, C4, C5, C6, C7 обеспечивает стабильное напряжение $+5$ В для приемных модулей.

Основу схемы составляет генератор периодических импульсов с частотой 300 кГц, выполненный на элементах DD1.1, DD1.2, DD1.3, ZQ1, R1, R2. Выходная последовательность импульсов снимается с вывода 10 инвертора DD1.3. Использование кварцевого резонатора ZQ1 обеспечивает стабильность генерируемой частоты. Можно установить резонатор из серий PГ02, PК89, PК201, PК240 на частоту 300 кГц или

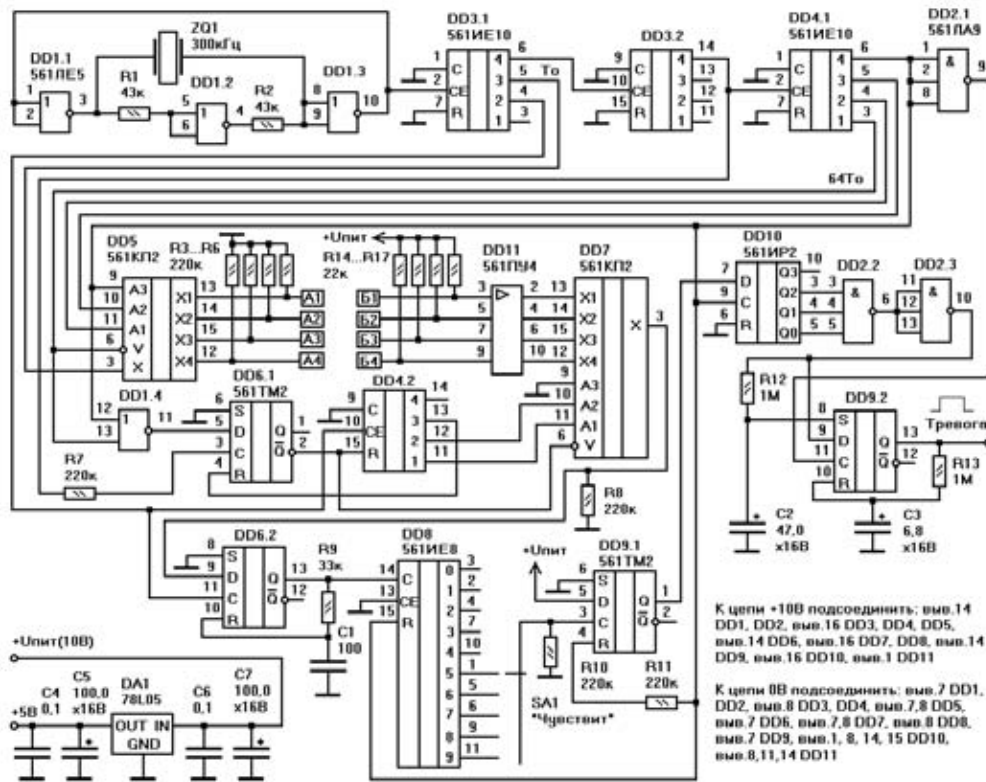


Рис. 2.26.14 16-лучевое СО

PK143, PK230, PK248 на любую частоту в диапазоне 300...308 кГц. Цепочка двоичных счетчиков DD3.1, DD3.2, DD4.1 последовательно делит сигнал исходной частоты на два. В результате на выводе 5 DD3.1 постоянно присутствует периодическая последовательность импульсов основной частоты $f_0 = 300/8 = 37,5$ кГц. Она обеспечивает оптимальный режим работы модульного ИК приемника TSOP4038 (38 кГц), используемого в данном варианте конструкции. Основной частоте соответствует период $T_0 = 1/f_0 = 26,7$ мкс, выступающий в качестве единицы отсчета интервалов времени. Период импульсов на выводе 3 DD4.1 составит $64T_0 = 1,71$ мс, а на выводе 6 – $512T_0 = 13,7$ мс.

Мультиплексор DD5 последовательно распределяет сигнал основной частоты f_0 на излучающие модули A1, A2, A3 и A4, которые генерируют ИК излучение при подаче на соответствующий модуль сигнала высокого уровня. Полный цикл излучения состоит из отдельных фаз. Сначала (при сигналах низкого уровня на выводах 9, 10, 11, 6 DD5) сигнал основной частоты f_0 поступает на излучающий модуль A1. Длительность данной фазы составляет $32T_0 = 0,85$ мс. Затем мультиплексор отключается сигналом высокого уровня на выводе 6, и следует пауза той же длительности $32T_0 = 0,85$ мс. После этого направление коммутации мультиплексора меняется и 32 импульса основной частоты f_0 подаются на излучающий модуль A2. Затем вновь следует пауза длительностью $32T_0 = 0,85$ мс. Далее аналогично серии импульсов подаются на модули A3 и A4. Фазы излучения сменяют друг друга, пока на входе 9 DD5 поддерживается сигнал низкого уровня, то есть

в течение $8 \times 0,85$ мс = 6,8 мс. За это время каждый из четырех модулей последовательно генерирует ИК излучение на частоте f_0 . Далее в течение сигнала высокого уровня на входе 9 DD5 следует общая пауза длительностью еще 6,8 мс. Таким образом, полный цикл излучения составляет около 13,7 мс. Он повторяется непрерывно, пока на схему подается напряжение питания.

При отсутствии принимаемого излучения на выходе каждого из приемных модулей Б1, Б2, Б3, Б4 устанавливается сигнал высокого уровня. При появлении излучения с частотой f_0 выходной сигнал сменяется (с небольшой задержкой) сигналом низкого уровня. Микросхема DD11 совместно с резисторами R14, R15, R16, R17 преобразует логические уровни ТТЛ в уровни КМОП. Если в течение фазы излучения A1 все четыре приемных модуля формируют сигнал низкого уровня, то это говорит об отсутствии предметов, перегораживающих соответствующие 4 луча. Контролируя выходные сигналы всех приемных модулей в средней части фазы излучения каждого из четырех излучателей, можно подсчитать количество лучей (из их общего числа 16), прерываемых попавшим в 30 предметом.

Микросхема D-триггера DD6.1 задает цикл последовательного опроса четырех приемных модулей Б1, Б2, Б3, Б4. Признаком начала служит сигнал высокого уровня на выводе 11 DD1.4, что свидетельствует о текущей фазе излучения одного из модулей A1...A4. Цикл опроса инициируется по фронту импульса с вывода 14 DD3.2, то есть спустя ровно $16T_0$ от начала фазы излучения. Данный сигнал поступает на вход

3 DD6.1 через резистор R7, обеспечивающий его небольшую задержку (на 1...1,5 мкс). В ходе цикла опроса на выходе 2 DD6.1 устанавливается сигнал низкого уровня, разрешающий работу счетчика DD4.2 и открывающий мультиплексор DD7. Продолжительность цикла задается счетчиком DD4.2 и частотой $2f_0$ сигнала, поступающего на его вход 10. Она составляет четыре периода, то есть $2T_0 = 53$ мкс. Каждый из четырех шагов цикла характеризуется своим показанием на выходах 11 и 12 счетчика в последовательности 00, 01, 10, 11. На первом шаге цикла ко входу данных (вывод 9) D-триггера DD6.2 через мультиплексор DD7 подсоединяется выход приемного модуля Б1. Состояние выхода записывается в триггер по фронту сигнала с частотой $2f_0$. Нулевой сигнал (луч не перекрыт) не приводит к изменениям сигнала низкого уровня на выходе 13 D-триггера DD6.2. Если же на выходе Б1 присутствует сигнал высокого уровня (луч перекрыт), то в триггер записывается единица, а на его выходе 13 формируется короткий положительный импульс длительностью около $0,7R9C1 = 2$ мкс. Далее по спаду сигнала с частотой $2f_0$ меняется показание на выходах 11 и 12 счетчика DD4.2 и аналогично производится опрос состояния второго приемного модуля Б2, а затем – третьего Б3 и четвертого Б4. После этого появление сигнала высокого уровня на выходе 13 счетчика DD4.2 приводит к окончанию цикла опроса приемных модулей. Таким образом, на выходе 13 DD6.2 формируются положительные импульсы, количество которых равно числу перекрытых лучей.

Общее число перекрытых лучей в течение полного цикла излучения накапливается счетчиком Джонсона DD8. Переключатель SA1 определяет чувствительность СО. Он устанавливает минимальное количество лучей, перекрытие которых приведет к срабатыванию. Количество меняется в пределах от пяти до девяти, поскольку меньшее количество может быть вызвано случайным появлением небольшого предмета вблизи от одного из излучателей или приемников, а большее позволит преодолеть 30. Все 16 лучей не перекрываются даже человеком, идущим в полный рост. На выходе 1 триггера DD9.1 обычно сигнал низкого уровня, и только в случае превышения заданного числа перекрытых лучей – его уровень меняется на высокий.

Сигнал превышения на выходе 1 триггера DD9.1 генерируется на каждом цикле излучения. По окончании цикла фронт импульса с выхода 6 DD4.1 записывает информацию о превышении в сдвиговый регистр DD10, он же сбрасывает счетчик DD8 и триггер DD9.1 для подготовки к записи информации на следующем цикле работы излучателей. Резистор R11 устанавливает небольшую (1...1,5 мкс) задержку сброса триггера. Информация в сдвиговый регистр DD10 записывается с периодом $512T_0 = 13,7$ мс. Если в течение трех циклов, следующих подряд друг за другом, будет зафиксировано перекрытие заданного числа лучей, то на выходах 3, 4, 5 сдвигового регистра DD10 установятся сигналы высокого уровня. Через элементы DD2.2, DD2.3 они вызовут срабатывание D-триггера DD9.2, формирующего на своем прямом выходе 13 сиг-

нал тревоги высокого уровня длительностью около $0,7R13C3 = 4...5$ с. Трем циклам соответствует перекрытие лучей на минимальное время $4 \times 13,7 \approx 55$ мс. Объект с поперечным размером $B = 0,3$ м, движущийся со скоростью $v = 5$ м/с, находится в зоне действия лучей в течение промежутка времени не менее $T = B/v = 0,3/5 = 60$ мс. При увеличении размеров или уменьшении скорости время перекрытия лучей возрастает. Теперь становится понятно, почему была выбрана именно такая длительность цикла излучения. Если лучи перекрываются непрерывно на продолжительное время, D-триггер DD9.2 активируется принудительно через цепочку R12, C2 на все время перекрытия. Порог продолжительности перекрытия для этого случая устанавливается примерно равным $0,7R12C2 = 30$ с.

Выберем в качестве ИК излучающего диода недорогой TSAL4400 (табл. 2.26.1). При токе 100 мА излучаемая им мощность составляет $W = 35$ мВт. Для угла ДН $\theta = 50^\circ$ получаем показатель $n = \ln(0,5) / \ln(\cos(\theta/2)) = 7,05$. Отсюда теоретическая оценка силы излучения вдоль оси ДН составит $I_0 = W(n+1)/2\pi = 45$ мВт/ср. Реально излучаемая сила будет в 1,5 раза меньше, то есть 30 мВт/ср. Облученность на расстоянии $L = 10$ м составит $E = I_0/L^2 = 0,3$ мВт/м². Взяв в качестве приемника излучения модуль TSOP4038, обладающий пороговой чувствительностью $0,3$ мВт/м², кажется, что мы попали в точку. Однако на самом деле требуется некоторый запас мощности излучателя. В данном случае он составит $2 \times 2 \times 2 = 8$, где первый множитель гарантирует работу при небольшой запыленности, загрязненности или легкой дымке, второй связан со старением ИК излучающего диода, разбросом его параметров и возможным изменением окружающей температуры, третий – с установкой приемников не вдоль оси ДН. Таким образом, импульсный ток излучающего диода должен составлять не менее 800 мА.

Все четыре излучающих модуля А1...А4 выполнены по единой схеме (рис. 2.26.15). На модуль подается напряжение питания $U_{пит} = +10$ В и импульсы входного сигнала $U_{вх}$, поступающие с выходов 13, 14, 15 или 12 мультиплексора DD5 соответственно (рис. 2.26.14), активирующие ИК излучение своим высоким уровнем. Резистор R1 ограничивает входной ток на уровне 0,4 мА. Импульсы последовательно усиливаются тремя каскадами на транзисторах VT1, VT2, VT3 до требуемой величины тока 800...1000 мА, который возбуждает ИК диод HL1. Конденсатор C1 стабилизирует напряжение питания при выбранном импульсном токе HL1. Если размеры 30 могут быть существенно меньше

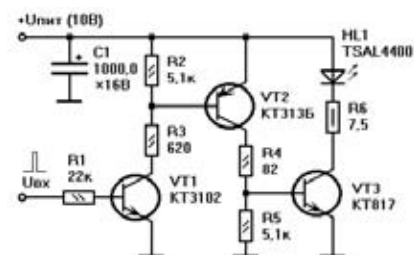


Рис. 2.26.15 Излучающий модуль An

10 м, то желательно иметь регулировку для уменьшения тока во избежание попадания на приемные модули излучения, отраженного от окружающих предметов и стен помещения.

Приемные модули Б1...Б4 также одинаковы (рис. 2.26.16). Они питаются напряжением +5 В и формируют выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ низкого уровня в случае приема ИК излучения (с частотой около 38 кГц). Стабилитроны VD1, VD2 служат для защиты приемника от импульсных наводок. Они необходимы в случае удаленного размещения модулей, когда подводящие провода имеют большую длину. Стабилитрон VD1 — любой на напряжение 7,5...10 В, VD2 — на 15...20 В. Приемный элемент TSOP4038 чувствителен в диапазоне длин волн $\lambda = 830...1070$ нм, он полностью перекрывает диапазон излучения TSAL4400 во всем интервале температур. Угол ДН приемника составляет $\theta = 90^\circ$, что соответствует выбранному варианту их использования, и не требует тщательной юстировки модулей. Конденсатор C1 сглаживает напряжение питания.

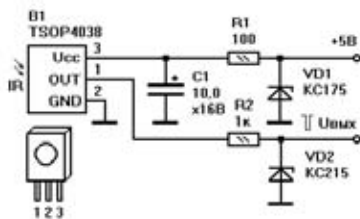


Рис. 2.26.16 Приемный модуль Бп

Основные достоинства фотолучевых СО:

- высокая вероятность обнаружения, особенно при наличии множества лучей;
- узкая ЗО, не превышающая нескольких сантиметров; для установки СО не требуется удалять деревья, кустарники или траву в полосе нескольких метров;
- возможность оборудования непрямолинейных участков с помощью зеркал небольших размеров;
- отсутствие ложных срабатываний от многих воздействий, характерных для СО других типов, в частности, от источников теплового излучения, ламп дневного света или людей, передвигаю-

щихся вдоль луча в непосредственной близости от него; фотолучевой принцип действия нечувствителен к электромагнитным помехам;

- простота конструкции; низкая стоимость и доступность используемых элементов;
- высокая степень маскируемости; ИК луч невидим;
- возможность проведения полного контроля работоспособности всех составных частей СО.

Основные недостатки фотолучевых СО:

- работоспособность только на прямолинейных участках; необходимость тщательного выравнивания участка в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- снижение помехоустойчивости при сильном дожде или мокром снегопаде, сопровождаемым порывистым ветром, или во время густого тумана; ложные срабатывания при резком освещении ЗЧ фарами проезжающих автомобилей или при резком выходе солнца из-за туч; возможность срабатывания от крупного животного или стаи птиц;
- необходимость юстировки, исключающей появление ложных лучей, особенно тщательной при большой длине участка и вблизи от отражающих поверхностей;
- необходимость периодического обслуживания СО: очистки и протирки оптических элементов от пыли и загрязнений, уборки снега, травы, мусора вдоль луча, что не позволяет расслабляться ни летом, ни зимой.

Фотолучевые СО характеризуются следующими средними показателями: длина участка — 30...150 м (максимум до 300 м); если одно и то же СО используется и как внутреннее, и как внешнее, то дальность действия на улице меньше примерно в три раза; внешнее СО обычно оборудовано обогревом оптической системы; длина волны излучения 0,8...1,0 мкм; угол ДН излучателя — до 2...6°; напряжение питания — 10...30 В; потребляемый ток — 40...100 мА (при максимальной дальности — до 500 мА); диапазон рабочих температур — от минус 30...50°С до плюс 50...60°С; стоимость — 6000...30000 рублей (200...1000 \$); погонная стоимость — 90...900 руб/м (3...30 \$/м).

2.27. ИК активные СО с отражением

По своему устройству ИК активное СО с отражением имеет большое сходство с фотолучевым СО. В его состав входят излучатель (И) и приемник (П) диапазона ИК (рис. 2.27.1). Они обладают узкими диаграммами направленности (ДН) в виде лучей, которые нацелены на одну и ту же ограниченную область пространства. И работает в импульсном режиме. При отсутствии ОО его излучение не доходит до П. После появления ОО отраженное излучение поступает на П и после анализа

в блоке обработки (БО) вызывает срабатывание СО. В отличие от фотолучевого данное СО срабатывает не на прерывание луча, а на его появление.

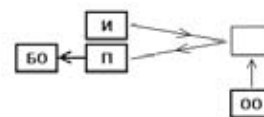


Рис. 2.27.1 ИК активное СО с отражением

ИК активное СО с отражением относится к активным. Оно может быть однопозиционным в случае размещения всех составных частей в одном корпусе, что удобно при монтаже СО, или двухпозиционным, что обеспечивает лучшие характеристики за счет пространственного разнесения обоих лучей и их ориентации на поглотители излучения. ИК активное СО с отражением – точечное или линейное (если лучи И и П почти параллельны друг другу). Оно используется преимущественно внутри помещений, так как на улице слишком много источников ложных срабатываний: посторонних излучателей, птиц, животных, переносимого ветром легкого мусора. Внутреннее ИК активное СО с отражением при работе в помещении почти полностью лишено ложных срабатываний и пропусков нарушителя. Однако из-за ограниченной ЗО данное СО находит малое распространение.

Оно может эффективно использоваться для охраны отдельных особо ценных предметов (сейфов, драгоценностей, предметов искусства), узких проходов, люков, вентиляционных отверстий, муляжей датчиков или видеокамер. Каждый новый принцип обнаружения создает новые преграды на пути нарушителя.

ИК активное СО с отражением использует те же технические решения, что и фотолучевое СО. В его составе применяются ИК светодиоды и ИК фотодиоды в качестве излучающих и приемных элементов. И здесь и там энергия от И распространяется к ОО в виде узкого луча с углом θ . В фотолучевом СО она так и достигает приемника в концентрированном виде, чем определяется высокая дальность. Здесь же после отражения от ОО излучение рассеивается по всем возможным направлениям (в телесный угол 4π), поэтому на обратном пути от ОО к П плотность потока энергии оказывается ослабленной в $K_{\text{обр}} = 4\pi/\theta^2$ раз. Для значений угла $\theta = 0,1$ влияние рассеяния дает ослабление в $K_{\text{обр}} = 4\pi/(0,1)^2 \approx 1000$ раз. Кроме этого, ОО может перекрывать лишь часть луча и рассеивать не всю излучаемую мощность. В этом случае дополнительное ослабление определяется отношением площади сечения луча к площади ОО. Лучшим решением проблемы является использование узкого луча, площадь которого в точке появления нарушителя не превышает его размеров. В связи с этим и ЗО оказывается меньше размеров ОО. Еще один фактор, снижающий принимаемую мощность, – это потери при отражении от ОО. Их характеризует коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$, показывающий какая доля мощности отражается от поверхности по отношению к падающей. Для различных объектов коэффициент отражения находится в пределах $K_{\text{отр}} = 0,1 \dots 0,8$ (табл. 2.27.1). С учетом всех трех факторов дальность обнаружения не превышает нескольких метров, а размеры ЗО – нескольких дециметров. Размеры небольшие, но если надо охранять единственный люк, то не имеет значения, использовать ли ИК активное СО с отражением или другое СО с гораздо большими потенциальными возможностями.

Таблица 2.27.1 Значения коэффициентов отражения для различных объектов на длине волны $\lambda = 0,8 \dots 0,9$ мкм

Объект	$K_{\text{отр}}$
Халат черный	0,1
Автомобиль черный	0,15
Свитер серый	0,3
Кожа человека	0,3
Собака	0,35
Куртка серая	0,4
Автомобиль белый	0,45
Птица	0,45
Халат белый	0,5
Ватман	0,8

ИК излучение почти не рассеивается в воздухе, в связи с чем в дежурном режиме излучение от И не достигает П. Если ОО появляется в пределах заданной ЗО, отраженный сигнал поступает на ЧЭ. Появление или исчезновение сигнала фиксируется с гораздо большей степенью надежности, чем его ослабление или изменение на определенное число процентов, как в фотолучевых или радиолучевых СО. Поэтому и вероятность обнаружения ИК активных СО с отражением оказывается гораздо выше. Если сверх того излучение представляет собой не просто последовательность прямоугольных импульсов, а кодовую посылку из сменяющихся друг друга единиц и нулей, то появление сигнала от И невозможно спутать с сигналами от различных помеховых источников: солнца, осветительных ламп, нагревательных приборов. За счет этого достигается низкая частота ложных срабатываний СО.

Оценим максимальную дальность ИК активного СО с отражением. Будем считать, что И и П расположены в одной точке, а излучаемая мощность составляет около $W_{\text{прд}} = 1$ Вт. Энергия распространяется в пределах телесного угла Ω . Примем соответствующий плоский угол ДН примерно равным $\theta \approx 0,1$. Тогда на расстояниях между излучателем и ОО до $L = 3 \dots 4$ м ширина луча не превышает величины $\theta L = 0,3 \dots 0,4$ м, то есть она меньше размеров ОО, поэтому вся энергия достигает поверхности ОО, а отраженная волна распространяется в полупространство. Отраженная от человека мощность будет примерно равна ($K_{\text{отр}} \times W_{\text{прд}}$), где $K_{\text{отр}} \approx 0,2$. Тогда облученность в точке приема $E_{\text{прм}} = K_{\text{отр}} W_{\text{прд}} / (2\pi L^2)$. Принимаемая мощность отраженного излучения составит $W_{\text{прм}} = E_{\text{прм}} S_{\text{прм}} = K_{\text{отр}} W_{\text{прд}} S_{\text{прм}} / (2\pi L^2)$, где $S_{\text{прм}}$ – площадь приемного элемента, $S_{\text{прм}} \approx 2$ мм². Принимаемая мощность должна быть выше пороговой $W_{\text{прм}} > W_{\text{пор}} \approx 10$ нВт. Отсюда получаем ограничение на дальность обнаружения $L < (K_{\text{отр}} W_{\text{прд}} S_{\text{прм}} / (2\pi W_{\text{пор}}))^{1/2} = 2,5$ м. Если учесть необходимый запас излучателя по мощности и тот факт, что в пределах ДН распространяется не более половины мощности излучения, то максимальная дальность сокращается до 1...2 м. На больших расстояниях, где величина θL превышает размеры ОО, зависимость $W_{\text{прм}}$ от L становится обратно пропорциональной не второй, а четвертой степени L , поэтому увеличение

дальности свыше нескольких метров возможно только за счет узконаправленного (например, лазерного) излучения.

Основные достоинства ИК активных СО с отражением:

- высокая вероятность обнаружения; материалы с коэффициентом отражения, близким к нулю, в быту не встречаются;
- ИК активное СО с отражением является датчиком присутствия, а не движения; сигнал срабатывания формируется в течение всего времени нахождения ОО в пределах ЗО, а не только в моменты его появления или перемещения;
- высокая помехоустойчивость внутри помещений;
- простота монтажа и проверки работоспособности;
- возможность организации непрерывного полного автоматического контроля работоспособности СО; если в зоне распространения прямого луча установить дополнительный ИК приемник, то по наличию на его выходе сигнала можно постоянно контролировать исправность И; в этом случае СО не нуждается в обслуживании и периодических проверках.

Основные недостатки ИК активных СО с отражением:

- крайне ограниченные размеры ЗО;
- высокая удельная стоимость.

ИК активные СО с отражением не заслуживали бы столь пристального внимания и, по крайней мере, их можно было бы рассматривать как разновидность фотолучевых СО, и не выделять в самостоятельную группу СО, если бы не одно но. Они в такой же мере отличаются от фотолучевых, как радиолокационные СО — от радиолучевых. ИК активные СО с отражением открывают путь к многочисленным вариантам оптических локационных СО. Отраженное от различных объектов ИК излучение несет в себе не меньше информации, чем СВЧ излучение. Здесь присутствует информация о расстоянии до объекта, направлении на него и его скорости. Кроме того, анализ отраженных спектров в широком ИК диапазоне (1...1000 мкм) позволяет идентифицировать материал отражающей поверхности. Полученных данных более чем достаточно для обнаружения и селекции различных объектов. С учетом того, что оптический локаатор размещается в одной точке, оценивает местоположение и перемещение множества объектов, имеет узкий луч и большую дальность, его перспективы более чем обнадеживающие. Такое СО можно было бы смело назвать фотолокационным.

2.28. Телевизионные СО

Телевизионное СО формирует сигнал срабатывания за счет анализа видимого изображения определенной области пространства. Чаще всего СО входит в состав системы видеонаблюдения, предоставляющей изображение для наблюдения оператору. Естественно называть телевизионными СО только те устройства, которые активируют сигнал срабатывания автоматически без помощи оператора. При этом состав телевизионного СО во многом аналогичен составу системы видеонаблюдения.

Обычно телевизионное СО называется видеодетектором, обнаружителем активности или детектором движения, в особенности, когда оно служит полезным дополнением к системе видеонаблюдения. Тем не менее, мы будем пользоваться термином телевизионное СО, чтобы отличать самостоятельное устройство, включающее в свой состав все, что необходимо для выдачи сигнала срабатывания, от небольшого блока, фиксирующего изменения в видеосигнале.

Телевизионные средства и системы широко распространены, благодаря удобству предоставления информации в виде картинки на экране видеомонитора. Большой выбор систем видеонаблюдения, имеющихся на рынке, способен удовлетворить любые требования по параметрам и стоимости. Однако телевизионные СО, не требующие привлечения оператора, а тем более — качественные СО, встречаются не часто.

Телевизионные СО могут быть как пассивными, работающими при естественном освещении, так и активными, работающими при искусственной подсветке. Они допускают использование внутри помещений или на улице. Телевизионные СО позволяют применять их в качестве точечных средств — для охраны отдельных дверей, проходов или ценных предметов внутри помещения, а также в качестве линейных — для защиты участков вдоль забора или внешней границы здания, и даже в качестве объемных — для контроля отдельных помещений, стоянок, участков улицы или областей пространства. Чаще всего камеры видеонаблюдения немаскируемы, они имеют большие размеры, и специально устанавливаются на виду, чтобы предупредить нежелательные действия посторонних людей. В то же время имеются небольшие камеры с малым размером входного зрачка (менее одного миллиметра), допускающие их маскировку, камуфлируя камеры под окружающие предметы, устанавливая в ниши или вмуровывая в стены. Благодаря большому разнообразию моделей, видеокамеры обеспечивают широкий спектр применения и вариантов установки: в виде выносной камеры на кронштейне, скрытно в недоступном месте, в качестве дверного глазка или внутри переговорной панели домофона. Камеры могут быть цветными или черно-белыми, стационарными или поворотными, с дистанционным управлением, фиксированным или изменяемым полем зрения.

Система видеонаблюдения состоит из множества различных блоков. Кроме основного элемента – видеокамеры – в нее входят поворотное устройство, блок питания, ИК подсветка, средства передачи видеосигнала (кабель, радиоканал), видеомонитор для наблюдения изображения. В состав системы видеонаблюдения также могут входить видеодетектор, который один превращает систему наблюдения в средство обнаружения, видеорегистратор, квадрант и мультиплексор. Рассмотрим их по порядку.

Поворотное устройство (подвижная платформа, на которую устанавливается камера) служит для поворота камеры в горизонтальной плоскости и небольшого наклона вверх или вниз. Оно увеличивает обзор камеры, позволяя обходиться минимальным их числом. Поворотное устройство управляется оператором со специального пульта, который часто совмещается с трансформатором (устройством приближения/удаления изображения). Многие пульты имеют возможность программирования ряда предустановленных положений камеры для быстрого поворота камеры на заданные объекты. Также поворотные устройства могут управляться оператором по сети или направляться автоматически (например, на источник звука).

ИК подсветка необходима в случае недостаточной освещенности объектов. Выбор диапазона ИК связан с тем, что в этом случае подсветка не видна. Естественно, ИК подсветка эффективна только при использовании черно-белых видеокамер. Цветные камеры требуют освещения в видимом диапазоне. Устройства ИК подсветки для небольшой дальности (около 5 м) обычно имеют широкий угол, малую потребляемую мощность (около 5 Вт) и невысокую стоимость (30 \$). ИК подсветка большей дальности (до 100 м) отличается узким сектором освещения (20...30°), более высоким энергопотреблением (до 200 Вт) и стоимостью (до 700 \$).

Видеорегистратор представляет собой устройство записи и долговременного хранения видеoinформации. Наиболее распространены видеоманитофоны, цифровые видеорегистраторы с записью на жесткий диск большого объема или персональные компьютеры.

Квадрант (или делитель экрана) необходим, когда на одном видеомониторе необходимо одновременно наблюдать изображения с четырех (или другого количества) камер. Он делит экран на четыре равные части и отображает самостоятельную картинку на каждой из частей. Для большого количества камер существуют делители экрана на 9 или 16 равных частей. Наблюдение изображений при еще большем их количестве практически невозможно, оно требует использования нескольких мониторов. При необходимости делитель экрана позволяет переходить в полноэкранный режим, когда на мониторе отображается картинка с одной выбранной камеры.

Мультиплексор, называемый также коммутатором, решает ту же проблему другим образом. Он имеет много видеовыходов и один выход, что позволяет последовательно переключать изображение с нескольких камер на один монитор. При этом можно устанавливать длительность выдержки до последующего переключения,

исключать определенные камеры из общей последовательности или переключаться на любую заданную камеру. Более сложный, так называемый матричный коммутатор, имеет не только много видеовыходов, но и ряд управляемых выходов. За счет этого можно направлять различные сигналы на заданные мониторы. Программируемые матричные коммутаторы обеспечивают гибкость, наращивание и оперативное управление структурой системы. Они обладают множеством дополнительных функций и легко интегрируются в системы охранной сигнализации и управления доступом, хотя и стоят дороже обычных коммутаторов.

Видеокамера является основным элементом как системы видеонаблюдения, так и телевизионного СО. Видеокамера состоит из объектива, диафрагмы, чувствительной матрицы, электронного блока обработки, устройства подогрева и кожуха. Объектив направляет световой поток на матрицу чувствительных элементов. Диафрагма ограничивает интенсивность света, падающего на матрицу. Матрица может быть выполнена по технологии КМОП или с использованием приборов с зарядовой связью (ПЗС). Блок обработки преобразует снимаемый с матрицы электрический сигнал в видеосигнал стандартной формы. Устройство подогрева служит против запотевания оптической системы и предотвращает уменьшение чувствительности приемной матрицы при низких температурах. Оно необходимо при использовании видеокамеры вне отапливаемых помещений. Кожух защищает камеру от внешних механических воздействий.

Видеокамеры делятся на черно-белые и цветные. В черно-белых используется одна матрица. Ее чувствительность без специальных фильтров распространяется за пределы видимого света. Для получения цветного изображения применяется два метода. В первом используется одна матрица и три оптических фильтра, каждый из которых выделяет один основной цвет (красный, зеленый или синий). Во втором используются три матрицы, каждая для своего цвета, и оптическая система, расщепляющая свет на три составляющие и направляющая их на различные матрицы. Второй метод обходится дороже, но он обеспечивает более точную цветопередачу и лучшее разрешение.

Видеокамеры характеризуются несколькими основными параметрами (табл. 2.28.1). Приведенные здесь же преимущественные значения параметров позволяют ориентироваться при выборе видеокамер. Кроме этих параметров есть ряд других, в основном неформальных, которые также влияют на процесс выбора.

Таблица 2.28.1 Основные параметры видеокамер

№	Параметр	Значение
1	Чувствительность	0,1 лк
2	Количество точек матрицы	440 000
3	Разрешение	540 ТВЛ
4	Размер матрицы	1/3»
5	Фокусное расстояние	5...50 мм
6	Тип крепления объектива	CS
7	Быстродействие	1/50...1/10000 с

Под чувствительность видеокамеры понимают минимальную освещенность объекта, при которой на изображении камеры все еще можно различать переход от черного к белому. Точнее данный параметр следовало бы назвать порогом чувствительности. Чувствительность черно-белых камер составляет около 0,1 люкса (лк), цветных – 2 лк. Ее зависимость от длины волны света обычно повторяет характеристику человеческого глаза. Черно-белые камеры чувствительны также к ближневидимому ИК излучению, благодаря чему возможна невидимая ИК подсветка изображения при низкой освещенности (например, в ночное время). Иногда чувствительность камеры измеряется по освещенности на матрице, что дает существенно меньшие (до 10 раз) значения; в этом случае должна быть указана светосила объектива, с которым проводились измерения. Примерные значения освещенности при различных условиях наблюдения (на улице на широте Москвы или в помещениях) приведены в таблице 2.28.2, а коэффициентов отражения поверхностей разных объектов в области видимого света – в таблице 2.28.3. Необходимо иметь в виду, что для обеспечения минимальной различимости изображения, освещенность должна превосходить чувствительность хотя бы в 10 раз. Значение максимально допустимой освещенности определяет (вместе с чувствительностью) полный интервал условий работы камеры. Для камер, работающих на улице, максимально допустимая освещенность должна быть не менее 100 000 лк.

Таблица 2.28.2 Освещенность при различных условиях

Обстановка	Освещенность, лк
Безоблачный солнечный день на улице	10 000...100 000
Пасмурный день на улице	100...10 000
Рабочее место в офисе; магазин	300...3000
Свет в прихожей	50...200
Автомобильная стоянка	30...80
Сумерки	1...100
Уличное освещение ночью	1...10
Безоблачная ночь, полная луна	0,1...1
Облачная ночь, полная луна	0,01...0,1
Безоблачная ночь, звездное небо	0,001...0,01
Облачная ночь, звездное небо	0,0001...0,001

Таблица 2.28.3 Коэффициенты отражения различных объектов

Объект	Коэффициент отражения
Снег	0,75...0,9
Белая краска	0,75...0,9
Алюминий	0,6...0,7
Автостоянка с автомобилями	0,3...0,5
Кирпич	0,3...0,4
Бетон	0,25...0,4
Трава, деревья	0,2
Человеческое лицо	0,15...0,25
Асфальт	0,05...0,1

Количество точек матрицы представляет собой произведение числа точек (светочувствительных ячеек) в каждой строке на число строк. Матрица камеры видеонаблюдения обычно имеет от $600 \times 450 = 270\,000$ до $750 \times 580 = 440\,000$ точек (пикселей). Точные значения количества пикселей по горизонтали и по вертикали определяются производителем матрицы и алгоритмом работы камеры. Они редко оканчиваются на ноль или на пять. Их отношение чаще всего равно 4:3, то есть соответствует отношению горизонтального размера кадра к вертикальному. Однако встречаются и отклонения в меньшую сторону, когда размер пиксела по горизонтали превышает его размер по вертикали. Кроме того, не все пиксели могут быть активны, используя для формирования изображения. В любом случае, чем больше количество точек матрицы, тем выше качество и разборчивость изображения.

Разрешающая способность видеокамеры (по горизонтали) определяется максимально различимым количеством вертикальных линий. Оно оценивается с помощью специальных таблиц и измеряется в телевизионных линиях (ТВЛ). Разрешение в 380...420 ТВЛ считается стандартным для черно-белых камер, 520...600 ТВЛ – высоким. Соответствующие параметры цветных камер несколько ниже (примерно на 20%): около 320 ТВЛ для обычного разрешения и 450 – для высокого. Разрешение определяется не только количеством пикселей матрицы, но и электронной схемой обработки; оно примерно равно (0,65...0,8) от числа пикселей в одной строке (0,55...0,65 – для цветных камер). Например, от матрицы 752×582 в среднем можно ожидать разрешения $752 \times 0,72 = 540$ ТВЛ. Для целей видеонаблюдения достаточно обычного разрешения 380...420 ТВЛ, высокое разрешение 520...600 ТВЛ позволяет различать мелкие детали изображения, лица людей, номера машин.

Размер матрицы определяется величиной ее диагонали. Он называется также форматом матрицы. Величина диагонали обычно принимает ряд стандартных значений в дюймах: 1/4", 1/3", 1/2", 2/3", 1". При отношении сторон кадра 4:3 величина диагонали в 1,25 раза превосходит горизонтальный размер матрицы. Исходя из этого, для наиболее распространенного формата 1/3" можно было бы теоретически получить величину диагонали в миллиметрах $1/3" = 25,4/3 = 8,47$ мм и размер матрицы $6,77 \times 5,08$ мм. Реальные размеры чувствительной области матрицы оказываются несколько меньше (табл. 2.28.4), они составляют около 2/3 от полученных теоретических значений. С увеличением размера матрицы повышается ее чувствительность, но также возрастает стоимость.

Таблица 2.28.4 Размеры матриц

Обозначение	Диагональ, мм	Размеры, мм
1/4»	4	3,2×2,4
1/3»	6	4,8×3,6
1/2»	8	6,4×4,8
2/3»	11	8,8×6,6
1»	16	12,8×9,6

Фокусное расстояние объектива f должно соответствовать размеру матрицы. Поскольку матрица размещается в фокальной плоскости объектива, оно определяет такую важную характеристику камеры, как угол обзора θ . Если обозначить горизонтальный размер светочувствительной области матрицы за a , тогда очевидно $\operatorname{tg}(\theta/2) = a/2f = A/2L$ (рис. 2.28.1), где A – горизонтальный размер поля зрения объектива на расстоянии L от камеры. Отсюда получаем формулу для определения угла $\theta = 2\operatorname{arctg}(a/2f)$. Рассчитанные по ней значения для матрицы формата 1/3» приведены в таблице 2.28.5. Знание угла важно при выборе объектива таким образом, чтобы обеспечивать заданное поле зрения A на выбранной дальности $A = 2L\operatorname{tg}(\theta/2)$. Например, если необходимо наблюдать за выходом в холл из коридора, имеющего поперечные размеры 4×3 м, а камера может быть установлена на противоположной стороне холла на расстоянии $L = 10$ м от выхода, то угол $\theta = 2\operatorname{arctg}(A/2L) = 2\operatorname{arctg}(4/20) = 0,39$ рад = 23° , следовательно, для матрицы 1/3" ($a = 4,8$ мм) потребуется объектив с фокусным расстоянием $f = a/(2\operatorname{tg}(\theta/2)) = aL/A = 12$ мм (или немного меньше).

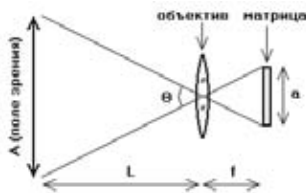


Рис. 2.28.1 Угол обзора камеры

Таблица 2.28.5 Угол обзора по горизонтали в зависимости от фокусного расстояния f для матрицы формата 1/3"

f , мм	5	10	20	50
Угол θ , град. (рад)	51 (0,90)	27 (0,47)	14 (0,24)	5,5 (0,10)

По величине фокусного расстояния объективы делятся на обычные (стандартные), короткофокусные (широкоугольные) и длиннофокусные (телеобъективы). Широкоугольные объективы с небольшим фокусным расстоянием необходимы для наблюдения на малых дальностях или для обзора больших площадей, крупных объектов, стадионов, открытых концертных площадок, автомобильных стоянок. Они обеспечивают общий обзор большого пространства, но не дают детального изображения. Длиннофокусные объективы с малым углом θ приближают и укрупняют изображения удаленных объектов, они позволяют различать лица или номера автомобилей. Длиннофокусные объективы обладают узким полем зрения и могут использоваться для наблюдения за пространством вдоль забора или за въездными воротами с большого расстояния. Объектив, являющийся длиннофокусным для матрицы малого размера, может стать короткофокусным при использовании с более крупной матрицей. Совместить преимущества широкого обзора и разборчивости мелких деталей позволяют поворотные устройства и трансфокаторы. Поворотные устройства нацеливают камеру (с длиннофокусным объективом) в том или ином на-

правлении в зависимости от складывающейся обстановки. Трансфокаторы (объективы с переменным фокусным расстоянием) дают возможность удалять или приближать изображение. Поворотные устройства и трансфокаторы требуют управления оператором и удорожают стоимость камеры. Они плохо сочетаются с видеодетекторами.

Тип крепления объектива определяется его присоединительным размером. Он важен для камер со сменными объективами. В видеонаблюдении применяются три типа крепления: резьба 12×0,5, C и CS. Резьба 12×0,5 (диаметр 12 мм с шагом 0,5 мм) предназначена преимущественно для миниатюрных камер. Крепления C и CS имеют одинаковую резьбу диаметром 1» (25,4 мм) с шагом 1/32» (0,794 мм) и отличаются расстоянием от задней плоскости объектива до фокальной плоскости. У объектива CS это расстояние меньше на 5 мм, поэтому видеокamera CS может работать и с объективом C – через переходное удлинительное кольцо. В настоящее время наиболее распространено крепление CS.

Быстродействие камеры определяется временем выдержки отдельного кадра. Обычно оно устанавливается в пределах от 1/50 до 1/10000 с, хотя существуют и более быстродействующие (до 1/100000 секунды и менее). Большой диапазон времени выдержки позволяет камере подстраиваться под различные условия освещенности.

Важное значение имеет наличие в камере автодиафрагмы и электронного затвора. Они позволяют без вмешательства человека поддерживать оптимальную освещенность на матрице за счет изменения величины входного отверстия и времени выдержки. Их применение предпочтительно в условиях меняющейся освещенности (например, на улице). При этом максимально закрытая диафрагма обеспечивает наибольшую глубину резкости.

Еще один важный параметр камеры – наличие компенсации встречной засветки, или по другому, компенсации заднего света. Данная функция необходима, когда камера направлена против источника света (например, на окно или дверь, выходящую на улицу). Обычная камера подстраивается под среднюю освещенность, поэтому на ее изображении будет темный силуэт человека на светлом фоне улицы. Наличие функции компенсации встречной засветки (автоматической) подстраивает изображение по его центральной части, поэтому будет виден не общий силуэт, а детальное изображение человека.

Собственно детектор движения, который является небольшим фрагментом в системе видеонаблюдения, представляет собой ту цель, ради которой велось все предшествующее изложение. Принцип действия видеодетектора состоит в сравнении последующего кадра изображения с предыдущим. При изменении изображения, связанном с движением какого-либо предмета в поле зрения камеры, активируется сигнал тревоги. Обычно можно задать на картинке прямоугольную область анализа изменений (или несколько областей) и порог срабатывания. Области анализа выбираются в

тех частях изображения, где появление посторонних людей наиболее нежелательно. Тогда видеодетектор будет реагировать только на исчезновение определенного предмета или на появление человека вблизи от определенной двери, игнорируя передвижение людей в других местах внутри поля зрения камеры.

Работа видеодетекторов подвержена воздействию большого количества помех. К ним относятся изменения освещенности, связанные с восходом, заходом солнца или выходом его из-за туч, включением, выключением или миганием искусственного освещения, попаданием света от фар проезжающих автомобилей, бликами на стеклах или лужах. Кроме этого, в поле зрения появляется множество движущихся объектов, таких как опадающая листва, животные, птицы, качающиеся под действием ветра деревья. Мешает работе детекторов вибрация камеры и колебания кронштейна, на котором она закреплена. Изображение меняется также во время дождя, тумана, снегопада, запотевания объектива, покрытия его инеем или пылью, что требует тщательной настройки порога срабатывания видеодетектора. Поэтому телевизионные СО еще далеки от совершенства, они имеют пониженную помехоустойчивость при работе на улице. Видеодетекторы встраиваются в современные видеокамеры или видеорегистраторы, но в основном служат для облегчения работы операторов, принимающих окончательное решение о наличии или отсутствии ОО.

Для повышения эффективности системы видеонаблюдения и снижения числа ложных срабатываний видеодетекторов необходимо соблюдать определенные правила при установке компонентов системы. Прежде всего, камеры должны быть надежно закреплены для стабилизации изображения. В условиях низкой освещенности необходимо установить дополнительные осветительные приборы или ИК подсветку. Для защиты от солнечного света или фар проезжающих автомобилей служат козырек над камерой, шторы или жалюзи на окнах. Своевременная замена ламп освещения избавит от неожиданного ложного срабатывания после перегорания одной из них. Необходимо по мере возможностей убрать из поля зрения все подвижные объекты — деревья, кусты, флаги, животных. Если источники меняющегося света или подвижные объекты невозможно убрать или заэкранировать, то следует хотя бы направить камеру таким образом, чтобы они не попадали в ее поле зрения (в непосредственной близости от контролируемых областей анализа). Но даже после соблюдения всех предосторожностей возможно появление неожиданных источников ложных срабатываний — насекомых, ползущих по объективу, отражений от стеклянной двери или открываемого окна. Избавиться от них поможет тщательный выбор порога срабатывания видеодетектора.

Основные достоинства телевизионных СО:

- высокая информативность видимого изображения, анализируя которое можно определить наличие человека, скорость и направление движения, а также идентифицировать его личность и получить много других данных; в связи с этим, а

также с возможностью менять направление и угол обзора камеры, телевизионные СО обладают потенциально высокими показателями обнаружения и помехоустойчивости; пока эти показатели достигаются при работе внутри помещений или совместно с оператором;

- обширная ЗЧ, позволяющая одновременно наблюдать за большой площадью, стоянкой автомобилей, длинным прямолинейным рубежом или подходом к стене здания;
- изменяемая ЗЧ камеры; можно быстро повернуть камеру в нужном направлении, приблизить изображение наблюдаемого объекта или дать общий план;
- работоспособность аппаратуры внутри помещений и на улице;
- возможность записи видеосигналов и последующего многократного их просмотра; возможность наблюдения сигналов оператором и управления параметрами камер;
- обнаружение изменений видеосигнала в произвольной области кадра; ее можно оперативно менять при изменении расстановки предметов внутри помещения, путей передвижения людей, степени опасности различных действий или положения камеры; обнаружение передвижения различных объектов: отдельного человека, групп людей, автомобилей;
- определение текущего местоположения ОО и его направления движения;
- непрерывный контроль работоспособности телевизионного СО; любая неисправность проявится в изменении изображения и будет мгновенно зарегистрирована; при наличии оператора для подтверждения исправности достаточно просто посмотреть на экран;
- возможность маскировки камер; небольшие камеры легко закамуфлировать под окружающие предметы, камеры с малым входным отверстием (pin-hole) вмуровываются в стену, крупные камеры маскируются установкой большого количества муляжей, ничем не отличающихся от настоящих камер;
- большой выбор аппаратуры на рынке; всегда можно подобрать комплекс или составные части по необходимым параметрам, условиям эксплуатации и стоимости; совместимость составных частей и возможность наращивания комплекса.

Основные недостатки телевизионных СО:

- снижение вероятности обнаружения при пониженной освещенности, при загрязнении или запотевании оптики или при воздействии метеорологических факторов — тумана, дождя, снегопада, дымки;
- ложные срабатывания при изменениях освещенности, при появлении посторонних предметов, насекомых, вибрации; снижение помехоустойчивости особенно сильно проявляется на улице в ненастную ветреную погоду; стабильную работу видеодетекторов обеспечивает пра-

- вильный выбор места размещения и тщательная установка камер;
- наличие множества факторов, осложняющих работу алгоритмов автоматического обнаружения объектов, таких как блики и отражения от поверхностей стекла или воды, свет фар, одновременное движение нескольких объектов; подавляющее большинство видеодетекторов обеспечивает слежение за определенной областью кадра, а не за перемещением объекта в поле зрения;
- сложность и дороговизна оборудования; в состав телевизионного СО входит множество обязательных элементов: камеры, устройства подсветки и обогрева, кабели связи, видеодетекторы, видеорегистраторы, мониторы;
- сложность и дороговизна установки оборудования; все элементы необходимо смонтировать, причем в различных местах, соединить кабелями, и ни разу не ошибиться, подать питание, а затем отъюстировать камеры и настроить остальное оборудование; монтажные работы производятся квалифицированным (то есть высокооплачиваемым) персоналом;

- трудоемкое обслуживание; все оборудование требует периодической проверки, а камеры — сверх того — очистки и прогирки оптических элементов; эффективность работы систем видеонаблюдения повышается под контролем оператора, но его непрерывное дежурство требует постоянных больших расходов; качество работы зависит от состояния оператора и количества камер;
- невысокая надежность; система состоит из множества составных частей, выход из строя каждой из которых приводит к неисправности системы;
- высокое энергопотребление системы по сравнению с СО других типов; оно еще более возрастает при необходимости подсветки или обогрева камер.

Телевизионное СО в минимальной комплектации состоит из видеокамеры, видеодетектора, видеорегистратора и черно-белого монитора. При средней стоимости видеокамеры 1500...6000 руб (50...200 \$), видеорегистратора с детектором движения — 3000...18000 руб (100...600 \$), черно-белого монитора — 3000...6000 руб (100...200 \$) — одно телевизионное СО обойдется в 7500...30000 руб (250...1000 \$).

2.29. Прочие СО

На рынке средств и систем охранной сигнализации имеется множество различных по принципу действия и исполнению средств обнаружения. Достаточно прийти в любой магазин, посетить выставку или зайти на сайт — просто глаза разбегаются. Может показаться, что аппаратуры достаточно для решения любой задачи, и ничего другого не надо. Но это не так. Все СО имеют те или иные недостатки: малую ЗЧ или наоборот, слишком большую для данной комнаты, низкую чувствительность к ползущему человеку или слишком высокую к передвижению животных. Одни СО слишком дороги, другие — заметны издали, третьи — сложно монтировать, четвертые требуют постоянного контроля, пятые — регулярной замены батареек. Некоторые СО не отличаются высокой помехоустойчивостью, и это становится настоящей проблемой при большом количестве датчиков. Потенциальные нарушители тоже не стоят на месте. Поэтому и СО должны быть разнообразными и постоянно модернизироваться, чтобы максимально препятствовать действиям злоумышленников при минимальной цене.

Выше были рассмотрены СО двадцати восьми различных физических принципов действия, но они не исчерпывают всех возможных их типов. К прочим СО относятся редкие, не доведенные до практического использования или работающие в ограниченных условиях применения, а также другие СО, не сформировавшиеся в отдельные самостоятельные группы. Здесь можно было бы провести подробный анализ таблицы

из 21×21 МНИ, упоминавшейся в конце раздела 1.2, и найти не один десяток новых принципов действия. Но, скорее всего, каждому читателю будет интереснее и полезнее сделать это самостоятельно. Ведь и кроме этого имеется множество других более насущных задач.

Обычно в качестве ОО рассматривается человек. Его появление в здании, коридоре или помещении наиболее вероятно. На открытой местности человек может сесть в автомобиль. С точки зрения обнаружения это будет совсем другой объект. Он движется с гораздо большей скоростью и может проскочить ЗО лучевого СО незамеченным, если в соответствующий алгоритм не ввести возможность обнаружения быстрых объектов. Для разных ОО нужны разные СО. Тот же автомобиль обладает большей массой (по сравнению с человеком). При использовании тензометрических или сейсмических СО, ПДД или ЛВВ следует ожидать увеличения отношения сигнал/помеха и улучшения показателей при использовании данных типов СО. Большой магнитный момент автомобиля создает благоприятные условия для использования магнитометрических СО, а значительный тепловой поток — для ИК пассивных СО. Сильный шум и обильный выхлоп позволяют выйти на улицу таким типично комнатным СО, как акустические пассивные и ольфактронные.

Если уж речь пошла о улице и дороге, то здесь могут появиться и другие объекты: велосипедист, всадник, лыжник, вьючное животное. Для каждого из них характерны различные параметры и нужен свой алго-

ритм обнаружения. Но если использовать один ЧЭ, например, сейсмический датчик, то все алгоритмы можно включить в состав одного прибора. Он будет иметь несколько выходов, формируя на каждом из них самостоятельный сигнал тревоги при обнаружении человека, автомобиля или велосипедиста. Такое средство обнаружения естественно назвать распознающим. Распознавание объектов обнаружения имеет смысл только в том случае, когда разным сигналам соответствует различная ответная реакция. Если по каждому из них всегда включается запись сигнала с видеокамеры, то в распознавании нет особой необходимости. Все эти задачи при необходимости разрешимы с использованием соответствующих ФМО. Они могут возникнуть при необходимости обеспечения безопасности жителей отдельного коттеджа или дачного товарищества. Всегда полезно заранее знать, кто направляется к вам в гости, идет он пешком или едет на автомобиле, несет куст смородины, канистру бензина или пистолет в кармане. Противодействие новым угрозам требует дополнительных затрат. При этом затраты на сигнализацию естественно соотносить с возможным ущербом от действий незамеченного злодея. Чем больше ценность охраняемых предметов, чем больше возможный ущерб, тем значительнее могут быть атакующие силы, но тем лучше и изощренней должна быть и защита.

2.30. Комбинированные СО

Комбинированными СО называются средства, использующие два и более различных физических принципа обнаружения для выработки общего сигнала срабатывания. Комбинированное СО не дает нового физического принципа, оно сочетает другие из числа известных. Чаще всего каждому используемому физическому принципу соответствует собственный ЧЭ (рис. 2.30.1). Сигнал с выхода каждого ЧЭ ($i = 1, 2, 3...$) усиливается и проходит предварительную обработку в отдельном блоке обработки (БО i). Получаемые сигналы X_i поступают на блок совместной обработки (БСО), формирующий общий сигнал тревоги. Основное назначение комбинированного СО состоит в повышении вероятности обнаружения или снижении вероятности ложных срабатываний (по сравнению с показателями отдельных СО) за счет более полного учета поступающей информации.

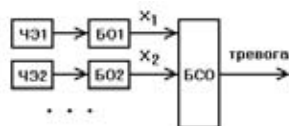


Рис. 2.30.1 Комбинированное СО

Комбинированные СО называются также совмещенными датчиками или датчиками двойной техноло-

Если кто-то подумает, что совершенствованием известных физических принципов, новыми физическими принципами или поиском других объектов обнаружения ограничиваются перспективы развития СО, то он ошибется. Есть еще ряд не менее острых проблем. При анализе ФМО предполагалось обнаружение объектов, перемещающихся по поверхности земли в воздушной среде. Но если вам понадобится обезопасить свою яхту от пловца, аквалангиста или водолаза, то вы неожиданно убедитесь почти в полном отсутствии СО для водной среды. Несмотря на обилие яхт, лодок, судов, водозаборов, водостоков, причалов, набережных, пляжей и прочего хозяйства охранять их затруднительно (до тех пор, пока нарушитель не выйдет на сушу). А ведь безопасность на яхте не менее актуальна, чем безопасность на даче.

Как говорится, в папку под названием "Прочее" можно положить все что угодно. Кажется, я уже наложил сюда слишком много. Хотя еще ни слова не сказал о других возможностях обнаружения. Чтобы обезопасить себя и свое имущество от человека-нарушителя вовсе не обязательно обнаруживать его самого. Можно контролировать с помощью тех же датчиков сами охраняемые предметы: драгоценности в шкатулке, папки в сейфе, картины на стене, хрустальные подвески на люстре или монеты на витрине. Принципы обнаружения будут в основном теми же, но параметры датчиков и алгоритмов обнаружения изменятся.

гии (для $i = 2$), а сам метод – методом совмещения зон или комплексирования. Можно встретить наименование комбинированных СО непосредственно по физическим принципам его составных частей, например, сейсмо-магнитометрическое СО или ИК пассивное + радиоволновое доплеровское СО.

Количество отдельных СО в составе одного комбинированного СО ничем не ограничено. Чаще всего их два, но может быть и пять-семь. Наилучшим образом сочетаются СО с однотипными ЗО: точечные с точечными, линейные с линейными, объемные с объемными. Размеры ЗО также должны примерно совпадать и располагаться так, чтобы нарушитель попадал в них одновременно или последовательно по мере своего движения. Внутренние СО сочетаются с внутренними, а внешние – с внешними, хотя возможна комбинация внешнего СО на подходе к зданию и внутреннего – на окнах или входной двери. Дополнительные ограничения сокращают количество возможных комбинаций СО.

Комбинированные СО по своему составу допускают два варианта сочетания: объединение разнопомеховых СО и объединение равнопомеховых СО. Если для нескольких СО характерны различные помеховые воздействия, способные вызвать их срабатывание, то их ЗО максимально совмещаются. Тогда срабатывание одного из СО, подтвержденное срабатываниями дру-

гих, с высокой степенью достоверности говорит о появлении нарушителя (а не помехового воздействия). Если для объединяемых СО характерны одинаковые помехи, то соответствующие ЗО разносятся вдоль маршрута нарушителя, так чтобы исключить их перекрытие. В этом случае одновременное срабатывание нескольких СО игнорируется, а к общему сигналу тревоги приводит лишь последовательное срабатывание сначала одного, а затем другого (или других) СО. Второй вариант сочетания часто применяется для объединения нескольких СО одного и того же типа (например, двух фотолучевых), тогда в результате объединения получается СО того же физического принципа действия. Далее будем рассматривать только комбинированные СО на основе датчиков различных типов. В любом случае важно обеспечивать максимальное сближение ЗО всех составных частей.

Наиболее популярное комбинированное СО для помещений состоит из радиолокационного СО (микроволнового доплеровского) и ИК пассивного объемного СО. Общий сигнал тревоги формируется только при одновременном срабатывании обоих СО. Благодаря этому эффективно подавляются ложные срабатывания от воздействий, влияющих на одно из СО: источников тепла, осветительных приборов, работающих вентиляторов, потоков воды по окнам во время дождя, перемещения людей вне помещения. Время наработки на ложную тревогу повышается и достигает 3000...5000 часов, расширяются возможности использования комбинированного СО, упрощается выбор места для установки прибора. Оба СО имеют примерно одинаковые объемные ЗО и дальность 10...15 м. При напряжении питания 10...15 В комбинированное СО потребляет ток в пределах 30 мА. Также можно встретить другие комбинации для помещений: акустическое пассивное СО (датчик разбивания стекла) с ИК пассивным СО, УЗ активное доплеровское СО с ИК пассивным СО и т.д.

На улице наиболее популярно сочетание радиолучевого СО и фотолучевого СО. Они монтируются на общих стойках высотой 1,5...2 м, при этом фотолучевое состоит из нескольких параллельных лучей, перекрывающих всю высоту стойки. Поскольку срабатывание комбинированного СО требует подтверждения со стороны обоих датчиков, его ЗО сужается до ширины ЗО фотолучевого датчика. Это удобно, так как не требует освобождения дополнительного пространства.

Комбинированные СО отличает ряд достоинств:

- высокая помехоустойчивость алгоритмов, требующих подтверждения срабатывания одного СО информацией от других СО, а именно так построена работа большинства комбинированных СО; значительное повышение эффективности работы комбинированного СО при небольшом увеличении стоимости; добавление каждого нового датчика увеличивает время наработки на ложное срабатывание в среднем на один-два порядка, а это не только сокращает трудозатраты на охрану, но и повышает доверие к системе сигнализации;

- сужение ЗО до размеров области пересечения ЗО составных частей; снижение чувствительности к передвижению людей вне ЗО;
- размещение двух (или более) датчиков в одном корпусе; благодаря этому стоимость комбинированного СО меньше стоимости отдельных СО, входящих в его состав; применение одного комбинированного СО вместо нескольких датчиков упрощает монтаж, сокращает расход кабеля, упрощает обслуживание, повышает надежность, снижает энергопотребление, уменьшает габариты, повышает маскируемость и улучшает внешний вид помещения или участка местности.

Комбинированные СО не лишены некоторых недостатков:

- необходимость подтверждения срабатывания одного датчика срабатываниями других снижает не только вероятность ложной тревоги, но и вероятность обнаружения;
- зоны обнаружения нескольких СО не всегда удается удачно совместить; радиолокационное доплеровское СО чувствительно к радиальному перемещению объектов, а ИК пассивное — к тангенциальному; датчик разбивания стекла необходимо направлять на окна, а ИК пассивное СО — не направлять на них;
- возможны сложности при установке комбинированного СО; ЗО всех составных частей необходимо не только согласовать между собой (что делается заранее), но и вписать в помещение каждую по отдельности; разные типы СО могут иметь специфические требования к условиям применения, размещение их в одном корпусе накладывает некоторые дополнительные ограничения.

По типу сигналов X_i , поступающих на входы БСО (рис. 2.30.1), комбинированные СО делятся на три группы: логические, оптимальные логические и оптимальные допороговые. В логических алгоритмах сигналы X_i являются логическими и равнозначными. По сути пара (ЧЭ_i + БО_i) представляет собой законченное СО, формирующее на своем выходе сигнал срабатывания ($X_i = 1$) или его отсутствие ($X_i = 0$), причем нет информации, позволяющей отдать предпочтение какому-либо СО. Оптимальные логические алгоритмы используют те же бинарные сигналы X_i ; отличие заключается в устройстве БСО, учитывающего текущую степень достоверности сигналов срабатывания X_i , поступающих от тех или иных СО. Оптимальные допороговые алгоритмы работают с аналоговыми сигналами X_i (непрерывными или многозначными). Обычно СО определенного физического принципа выделяет некий информативный признак X_i (или несколько признаков). Он несет основную информацию о наличии ОО, а его сравнение с пороговым значением позволяет активировать сигнал срабатывания. Если СО работает самостоятельно, то оно обязано дать окончательный ответ о наличии или отсутствии ОО. Если же оно входит в состав комбинированного СО, то преобразование

допорогового сигнала в бинарный приводит к значительной потере информации. Поэтому целесообразно подавать на БСО допороговые сигналы, в которых полезная информация присутствует в наиболее полном виде, а окончательное решение будет приниматься за счет учета всей совокупности аналоговых сигналов X_i . Следует уточнить, что сигнал с одного ЧЭ_и может обрабатываться несколькими БО или с одного БО можно снять несколько информативных сигналов X_i (например, величину воздействия, его длительность, частоту повторений), участвующих в формировании сигнала срабатывания, поэтому количество сигналов X_i может превышать число датчиков.

Начнем с логических комбинированных СО. Наиболее простой, но и наиболее важный вариант их построения называется логической схемой «2 по И» или просто 2И. В данном варианте используется минимальное количество датчиков – два, а сигнал тревоги комбинированного СО активируется при срабатывании обоих датчиков в пределах промежутка времени $\tau_{\text{ПАМ}}$, называемого временем памяти или временем выдержки. Время памяти выбирается минимально возможным, чтобы сократить вероятность ложного срабатывания комбинированного СО, но оно не должно быть меньше реального времени между срабатываниями двух датчиков. Если эти срабатывания независимы, что почти всегда справедливо для датчиков различного физического принципа, то вероятность обнаружения комбинированного СО составит $P_{\text{ОБН2И}} = P_{\text{ОБН1}} \times P_{\text{ОБН2}}$, где $P_{\text{ОБН1}}$ – вероятность обнаружения первого СО, $P_{\text{ОБН2}}$ – вероятность обнаружения второго СО. В случае помеховых воздействий, представляющих собой отдельные единичные акты, таких как грозовой разряд, проход животного или брошенная палка, соотношение для вероятности ложных срабатываний будет иметь тот же вид $P_{\text{ЛС2И}} = P_{\text{ЛС1}} \times P_{\text{ЛС2}}$, где $P_{\text{ЛС1}}$, $P_{\text{ЛС2}}$ – вероятности ложного срабатывания первого и второго СО. Непрерывные помеховые воздействия (дождь, ветер, нагревательный прибор) описываются частотой ложных срабатываний (количеством ложных срабатываний в единицу времени) для первого СО $N_{\text{ЛС1}}$ и для второго СО $N_{\text{ЛС2}}$. Обратная величина называется временем наработки на ложное срабатывание $T_{\text{ЛС}} = 1/N_{\text{ЛС}}$. Тогда частота ложных срабатываний комбинированного СО очевидно будет равна $N_{\text{ЛС2И}} = 2\tau_{\text{ПАМ}}N_{\text{ЛС1}}N_{\text{ЛС2}}$. Именно отсюда следует необходимость всемерного сокращения величины $\tau_{\text{ПАМ}}$. Логика 2И позволяет эффективно подавлять ложные срабатывания, но она же ухудшает такую важную характеристику как вероятность обнаружения.

Наличие двух СО с бинарными выходными сигналами допускает еще одну логическую схему их объединения в комбинированное СО – схему «2 по ИЛИ» или 2ИЛИ. В ней общий сигнал тревоги активируется при срабатывании любого датчика. В данной логической схеме значительно повышается вероятность обнаружения $P_{\text{ОБН2ИЛИ}} = 1 - (1 - P_{\text{ОБН1}}) \times (1 - P_{\text{ОБН2}})$, но возрастает также и вероятность ложного срабатывания $P_{\text{ЛС2ИЛИ}} = 1 - (1 - P_{\text{ЛС1}}) \times (1 - P_{\text{ЛС2}})$ или частота ложных срабатываний $N_{\text{ЛС2ИЛИ}} = N_{\text{ЛС1}} + N_{\text{ЛС2}}$. Вновь улучшение од-

ной из важнейших характеристик сопровождается ухудшением другой.

Пример. Два СО с одинаковыми показателями $P_{\text{ОБН1}} = P_{\text{ОБН2}} = 0,95$ и $T_{\text{ЛС1}} = T_{\text{ЛС2}} = 10$ час объединяются в комбинированное СО по схеме 2И ($\tau_{\text{ПАМ}} = 1$ мин) или 2ИЛИ. Оценим вероятностные характеристики для логической схемы 2И: $P_{\text{ОБН2И}} = 0,95 \times 0,95 \approx 0,9$; $T_{\text{ЛС2И}} = T_{\text{ЛС1}}T_{\text{ЛС2}} / 2\tau_{\text{ПАМ}} = 10 \times 10 \times 30 = 3000$ час. Для логической схемы 2ИЛИ: $P_{\text{ОБН2ИЛИ}} = 1 - 0,05 \times 0,05 \approx 0,998$; $T_{\text{ЛС2ИЛИ}} = 1/(1/T_{\text{ЛС1}} + 1/T_{\text{ЛС2}}) = 10/2 = 5$ час.

Чисто логическое объединение двух СО позволяет улучшать только одну из двух основных характеристик – вероятность обнаружения или вероятность ложной тревоги – одновременно ухудшая другую. Картина меняется, если комбинированное СО состоит из трех датчиков. Тогда возможны три логические схемы: 3И, 2 из 3-х, 3ИЛИ. Для случая 3И общий сигнал тревоги формируется при одновременном (в пределах $\tau_{\text{ПАМ}}$) срабатывании всех трех датчиков, тогда $P_{\text{ОБН3И}} = P_{\text{ОБН1}}P_{\text{ОБН2}}P_{\text{ОБН3}}$; $P_{\text{ЛС3И}} = P_{\text{ЛС1}}P_{\text{ЛС2}}P_{\text{ЛС3}}$; $N_{\text{ЛС3И}} = 3(\tau_{\text{ПАМ}})^2N_{\text{ЛС1}}N_{\text{ЛС2}}N_{\text{ЛС3}}$. Для схемы 3ИЛИ, формирующей общий сигнал тревоги при срабатывании любого датчика, те же показатели составят $P_{\text{ОБН3ИЛИ}} = 1 - (1 - P_{\text{ОБН1}}) \times (1 - P_{\text{ОБН2}}) \times (1 - P_{\text{ОБН3}})$; $P_{\text{ЛС3ИЛИ}} = 1 - (1 - P_{\text{ЛС1}}) \times (1 - P_{\text{ЛС2}}) \times (1 - P_{\text{ЛС3}})$; $N_{\text{ЛС3ИЛИ}} = N_{\text{ЛС1}} + N_{\text{ЛС2}} + N_{\text{ЛС3}}$. Аналогично для схемы 2 из 3-х, когда общий сигнал формируется при срабатывании в пределах интервала $\tau_{\text{ПАМ}}$ любой пары (или всех трех) датчиков, получаем: $P_{\text{ОБН2/3}} = P_{\text{ОБН1}}P_{\text{ОБН2}} + P_{\text{ОБН1}}P_{\text{ОБН3}}(1 - P_{\text{ОБН2}}) + P_{\text{ОБН2}}P_{\text{ОБН3}}(1 - P_{\text{ОБН1}})$; $P_{\text{ЛС2/3}} = P_{\text{ЛС1}}P_{\text{ЛС2}} + P_{\text{ЛС1}}P_{\text{ЛС3}}(1 - P_{\text{ЛС2}}) + P_{\text{ЛС2}}P_{\text{ЛС3}}(1 - P_{\text{ЛС1}})$; $N_{\text{ЛС2/3}} = 2\tau_{\text{ПАМ}}(N_{\text{ЛС1}}N_{\text{ЛС2}} + N_{\text{ЛС2}}N_{\text{ЛС3}} + N_{\text{ЛС1}}N_{\text{ЛС3}})$. Последняя логическая схема улучшает обе основные вероятностные характеристики.

Пример. Три СО с одинаковыми показателями $P_{\text{ОБН1}} = P_{\text{ОБН2}} = P_{\text{ОБН3}} = 0,95$ и $T_{\text{ЛС1}} = T_{\text{ЛС2}} = T_{\text{ЛС3}} = 10$ час объединяются в комбинированное СО по схеме 3И ($\tau_{\text{ПАМ}} = 1$ мин), 2 из 3-х ($\tau_{\text{ПАМ}} = 1$ мин) или 3ИЛИ. Оценим параметры комбинированных СО. Логическая схема 3И обеспечивает $P_{\text{ОБН3И}} = 0,95 \times 0,95 \times 0,95 \approx 0,86$; $T_{\text{ЛС3И}} = 10 \times 10 \times 10 \times 1200 = 1200000$ час = 140 лет. Для схемы 2 из 3-х: $P_{\text{ОБН2/3}} = 0,95 \times 0,95 \times (3 - 2 \times 0,95) = 0,99$; $T_{\text{ЛС2/3}} = 10 \times 10 \times 10 = 1000$ час. Для алгоритма 3ИЛИ: $P_{\text{ОБН3ИЛИ}} = 1 - 0,05 \times 0,05 \times 0,05 = 0,9999$; $T_{\text{ЛС3ИЛИ}} = 10/3 = 3$ час.

Соотношения для произвольной логической схемы «К из N», подразумевающей формирование общего сигнала тревоги при срабатывании не менее чем K датчиков из их общего числа N, при необходимости нетрудно получить самостоятельно. Они громоздки и поэтому здесь не приводятся. Схемы «К из N» позволяют в широких пределах варьировать значения вероятностных показателей комбинированных СО. Но что делать, если датчиков всего два? Как сделать выбор между низкой вероятностью обнаружения (в схеме 2И) и высокой вероятностью ложной тревоги (в схеме 2ИЛИ)? Ответ может дать алгоритм случайного выбора (или по-другому – смешанная стратегия). При небольшом усложнении стандартной логики он позволяет добиться компромиссного решения. Если комбинированное СО работает долю времени α по схеме 2И, а оставшуюся долю

времени $(1 - \alpha)$ – по схеме 2ИЛИ, то в результате изменения параметра α в пределах от 0 до 1 могут быть получены все промежуточные значения вероятностных характеристик, лежащие на прямой, соединяющей точки 2И и 2ИЛИ в координатах $P_{обн}$ и $P_{лс}$ (рис. 2.30.2).

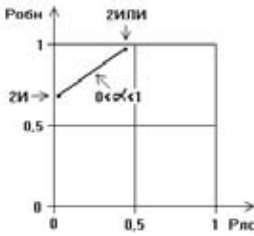


Рис. 2.30.2 Показатели алгоритма случайного выбора

Пример. Имеется два СО с показателями $P_{обн1} = 0,98$, $P_{обн2} = 0,9$, $P_{лс1} = 0,2$, $P_{лс2} = 0,1$. Необходимо синтезировать логический алгоритм, обеспечивающий $P_{лс} < 0,05$ и по возможности большее значение $P_{обн}$. В этом случае логическая схема 2И обеспечивает характеристики $P_{обн2и} = 0,98 \times 0,9 = 0,882$; $P_{лс2и} = 0,2 \times 0,1 = 0,02$. Для логической схемы 2ИЛИ получаем $P_{обн2или} = 1 - (1 - 0,98)(1 - 0,9) = 0,998$; $P_{лс2или} = 1 - (1 - 0,2)(1 - 0,1) = 0,28$. Если алгоритм случайного выбора работает долю времени α по схеме 2И и долю времени $(1 - \alpha)$ по схеме 2ИЛИ, то его показатели составят $P_{обн} = \alpha P_{обн2и} + (1 - \alpha) P_{обн2или}$ и $P_{лс} = \alpha P_{лс2и} + (1 - \alpha) P_{лс2или}$. Приравняв второе соотношение к желаемой величине $P_{лс} = 0,05$, получаем $\alpha = (P_{лс2или} - P_{лс}) / (P_{лс2или} - P_{лс2и}) = 0,88$. Тогда $P_{обн} = 0,882\alpha + 0,998(1 - \alpha) = 0,90$. Таким образом, комбинированное СО, работающее 88% времени по схеме 2И и 12% времени – по схеме 2ИЛИ, обеспечит средние показатели $P_{обн} = 0,9$ и $P_{лс} = 0,05$.

Еще одно полезное дополнение к логическим алгоритмам называется прогрессивным обнаружением или обнаружением с пересчетом. Смысл его заключается в том, что при последовательном пересечении нарушителем нескольких датчиков сигналы срабатываний располагаются в той же последовательности. Тогда имеет смысл построить алгоритм комбинированного СО таким образом, чтобы к общему сигналу тревоги приводило срабатывание K датчиков из их общего числа N , но при соблюдении дополнительного условия: датчики должны срабатывать в порядке их расположения вдоль маршрута нарушителя. Например, при установке пяти датчиков в последовательности 1, 2, 3, 4, 5 и принятом алгоритме «3 из 5-и» комбинация срабатываний 1, 5, 3 не приведет к общей тревоге, так как отсутствуют три срабатывания в заданной последовательности. Наложение дополнительных ограничений почти не отражается на вероятности обнаружения, но сокращает число ложных срабатываний.

Оптимальные логические алгоритмы, как и оптимальные допороговые, используют решающее правило Неймана-Пирсона. Оно строится на основе изучения распределения плотности вероятности $w_s(X)$ параметра X при наличии полезного сигнала, а также плотности $w_p(X)$ для помеховых воздействий. Тогда оптималь-

ное решающее правило записывается в виде $w_s(X) / w_p(X) > \Pi$, где Π – фиксированный порог, превышение которого приводит к срабатыванию СО. Отношение в левой части называется отношением правдоподобия. Вероятность обнаружения $P_{обн}$ и вероятность ложного срабатывания $P_{лс}$ будут равны

$$P_{обн} = \int w_s(X) dX; \quad P_{лс} = \int w_p(X) dX$$

где интегрирование ведется по той области параметра X , попадание в которую приводит к срабатыванию. Интегрирование по всей области изменения (X) даст вероятности, равные 1. В такой записи ясно, что к срабатываниям будут приводить те значения параметра X , которые дают максимальный вклад в вероятность обнаружения при минимальном вкладе в вероятность ложного срабатывания. Изменение величины порога Π позволяет регулировать значения $P_{обн}$ и $P_{лс}$, но при этом всегда обеспечивается максимум $P_{обн}$ при заданной $P_{лс}$ и минимум $P_{лс}$ при заданной $P_{обн}$.

Параметр X может быть вектором $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$. В случае независимости отдельных компонентов X_i обе плотности вероятности записываются в виде произведений

$$w_s(X_1, X_2, \dots, X_N) = \prod_{i=1}^N w_{s_i}(X_i); \quad w_p(X_1, X_2, \dots, X_N) = \prod_{i=1}^N w_{p_i}(X_i).$$

Тогда после логарифмирования оптимальное решающее правило значительно упрощается и принимает вид:

$$\sum_{i=1}^N \ln(w_{s_i}(X_i) / w_{p_i}(X_i)) > L,$$

где L – значение порога. При выполнении данного неравенства формируется сигнал тревоги. Алгоритм поясняет блок-схема оптимального комбинированного СО (рис. 2.30.3). Она состоит из функциональных преобразователей параметра X_i в логарифм отношения правдоподобия (ЛОП_{*i*}), сумматора получаемых сигналов (Σ) и компаратора (K), сравнивающего сумму с порогом. Для зависимых параметров алгоритм несколько усложняется, он требует более подробных исходных данных. Параметры X_i могут быть бинарными для оптимального логического алгоритма или непрерывными – для оптимального допорогового. Наилучших результатов следует ожидать в случае непрерывных параметров.

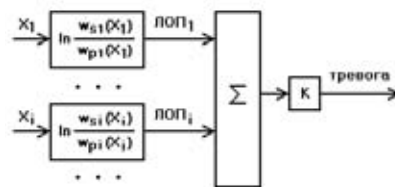


Рис. 2.30.3 Оптимальное комбинированное СО

Для оптимального логического алгоритма параметры X_i принимают два значения ($X_i = 0$ при отсутствии

срабатывания i -ого датчика, $X_i = 1$ при его срабатывании). В этом случае плотности вероятности имеют простой вид (табл. 2.30.1). При появлении ОО срабатывание формируется с вероятностью $P_{\text{ОБН}i}$, а пропуск ОО происходит с вероятностью $(1 - P_{\text{ОБН}i})$. При помеховом воздействии СО срабатывает с вероятностью $P_{\text{ЛС}i}$ и не срабатывает с вероятностью $(1 - P_{\text{ЛС}i})$. Для распределенных во времени помех аналогом $P_{\text{ЛС}i}$ является величина $(\tau_{\text{ПАМ}} \times N_{\text{ЛС}i})$.

Таблица 2.30.1 Плотности вероятностей бинарных сигналов

X_i	0	1
$w_{S_i}(X_i)$	$(1 - P_{\text{ОБН}i})$	$P_{\text{ОБН}i}$
$w_{P_i}(X_i)$	$(1 - P_{\text{ЛС}i})$	$P_{\text{ЛС}i}$

С учетом полученных распределений оптимальный логический алгоритм легко приводится к виду, более удобному для его реализации:

$$\sum_{i=1}^N \xi_i(X_i) > L; \xi_i(0) = 0, \xi_i(1) = \ln \frac{P_{\text{ОБН}i}(1 - P_{\text{ЛС}i})}{P_{\text{ЛС}i}(1 - P_{\text{ОБН}i})}$$

В случае срабатывания i -ого датчика генерируется сигнал $\xi_i(1)$, равный его «весу», который тем больше, чем выше его вероятность обнаружения $P_{\text{ОБН}i}$, и чем ниже его вероятность ложного срабатывания $P_{\text{ЛС}i}$. Если суммарный «вес» всех сработавших датчиков превысит порог L , то формируется сигнал тревоги комбинированного СО. Наиболее просто алгоритм реализуется с помощью формирователей импульсов, количество которых пропорционально величине $\xi_i(1)$.

Отличие оптимальной логики от обычной состоит в учете того, что сигналы срабатываний не одинаковы, одним из них можно доверять в большей степени, чем другим. Степень доверия определяется значениями вероятностных характеристик $P_{\text{ОБН}i}$ и $P_{\text{ЛС}i}$, которые должны быть известны заранее. Они оцениваются до прохода нарушителя и поэтому называются априорными (доопытными) вероятностями. Данные значения могут быть определены для различных условий (дождь, ветер и т.д.) в ходе предварительных экспериментов и заложены в память алгоритма. Но также возможно накопление информации о них в процессе работы комбинированного СО в результате так называемого обучения, в ходе которого происходит подстройка СО под конкретную обстановку или меняющиеся помеховые условия. Цикл обучения может протекать с учителем, когда

правильность срабатываний подтверждается оператором, или без учителя, — когда безошибочность работы подтверждается срабатыванием большинства датчиков. Многие комбинированные СО контролируют частоту ложных срабатываний каждого датчика, фиксируя срабатывания, не подтверждаемые другими датчиками. Повышение частоты ложных срабатываний от определенного датчика служит достаточным основанием для снижения доверия к предоставляемой им информации вплоть до его полного отключения (до тех пор, пока его работоспособность не восстановится). Если один из датчиков обладает высокой вероятностью обнаружения и низкой вероятностью ложных срабатываний, то его «вес» может повыситься настолько, что для формирования общего сигнала тревоги будет достаточно срабатывания одного этого датчика.

Пример. Три СО обладают характеристиками $P_{\text{ОБН}1} = 0,8$; $P_{\text{ЛС}1} = 0,2$; $P_{\text{ОБН}2} = 0,8$; $P_{\text{ЛС}2} = 0,1$; $P_{\text{ОБН}3} = 0,95$; $P_{\text{ЛС}3} = 0,01$. Они объединяются в одно комбинированное СО. Определим параметры оптимального логического алгоритма. Весовая функция для первого СО будет равна $\xi_1(1) = \ln(P_{\text{ОБН}1}(1 - P_{\text{ЛС}1}) / (P_{\text{ЛС}1}(1 - P_{\text{ОБН}1}))) = 2,77$; для второго — $\xi_2(1) = \ln(P_{\text{ОБН}2}(1 - P_{\text{ЛС}2}) / (P_{\text{ЛС}2}(1 - P_{\text{ОБН}2}))) = 3,58$; для третьего — $\xi_3(1) = \ln(P_{\text{ОБН}3}(1 - P_{\text{ЛС}3}) / (P_{\text{ЛС}3}(1 - P_{\text{ОБН}3}))) = 7,54$. Теперь можно представить все возможные комбинации сигналов срабатывания, расположив их в порядке убывания логарифма отношения правдоподобия (ЛОП) или, что то же самое, в порядке убывания суммы весовых функций $\xi_i(X_i)$ (табл. 2.30.2). Здесь же приводится вероятность выпадения каждой комбинации, то есть ее вклад $\Delta P_{\text{ОБН}}$ в вероятность обнаружения и вклад $\Delta P_{\text{ЛС}}$ в вероятность ложного срабатывания. Установив порог L в пределах 11,12...13,89, получим срабатывание комбинированного СО от единственной комбинации (1,1,1) и соответствующие вероятностные характеристики $P_{\text{ОБН}} = 0,608$; $P_{\text{ЛС}} = 0,0002$. По мере снижения порога L новые комбинации будут добавляться к числу тревожных, а вероятность обнаружения и вероятность ложного срабатывания будут расти на величины соответствующих добавок $\Delta P_{\text{ОБН}}$ и $\Delta P_{\text{ЛС}}$. Но при этом между ними всегда будет сохраняться оптимальное соотношение. Сам алгоритм построен таким образом, чтобы максимальный вклад в $P_{\text{ОБН}}$ сопровождался минимальным вкладом в $P_{\text{ЛС}}$. Суммы всех значений $\Delta P_{\text{ОБН}}$ или $\Delta P_{\text{ЛС}}$ в соответствующих столбцах равны 1, то есть при наличии нарушителя (или при его отсутствии) всегда реализуется одна из приведенных комбинаций.

Таблица 2.30.2 Комбинации сигналов срабатывания X_i и их вероятности

Комбинация (X_1, X_2, X_3)	$\Sigma(\xi_i(X_i))$	$\Delta P_{\text{ОБН}}$	$\Delta P_{\text{ЛС}}$
1, 1, 1	13,89	$P_{\text{ОБН}1} \times P_{\text{ОБН}2} \times P_{\text{ОБН}3} = 0,608$	$P_{\text{ЛС}1} \times P_{\text{ЛС}2} \times P_{\text{ЛС}3} = 0,0002$
0, 1, 1	11,12	$(1 - P_{\text{ОБН}1}) \times P_{\text{ОБН}2} \times P_{\text{ОБН}3} = 0,152$	$(1 - P_{\text{ЛС}1}) \times P_{\text{ЛС}2} \times P_{\text{ЛС}3} = 0,0008$
1, 0, 1	10,31	$P_{\text{ОБН}1} \times (1 - P_{\text{ОБН}2}) \times P_{\text{ОБН}3} = 0,152$	$P_{\text{ЛС}1} \times (1 - P_{\text{ЛС}2}) \times P_{\text{ЛС}3} = 0,0018$
0, 0, 1	7,54	$(1 - P_{\text{ОБН}1}) \times (1 - P_{\text{ОБН}2}) \times P_{\text{ОБН}3} = 0,038$	$(1 - P_{\text{ЛС}1}) \times (1 - P_{\text{ЛС}2}) \times P_{\text{ЛС}3} = 0,0072$
1, 1, 0	6,35	$P_{\text{ОБН}1} \times P_{\text{ОБН}2} \times (1 - P_{\text{ОБН}3}) = 0,032$	$P_{\text{ЛС}1} \times P_{\text{ЛС}2} \times (1 - P_{\text{ЛС}3}) = 0,0198$
0, 1, 0	3,58	$(1 - P_{\text{ОБН}1}) \times P_{\text{ОБН}2} \times (1 - P_{\text{ОБН}3}) = 0,008$	$(1 - P_{\text{ЛС}1}) \times P_{\text{ЛС}2} \times (1 - P_{\text{ЛС}3}) = 0,0792$
1, 0, 0	2,77	$P_{\text{ОБН}1} \times (1 - P_{\text{ОБН}2}) \times (1 - P_{\text{ОБН}3}) = 0,008$	$P_{\text{ЛС}1} \times (1 - P_{\text{ЛС}2}) \times (1 - P_{\text{ЛС}3}) = 0,1782$
0, 0, 0	0	$(1 - P_{\text{ОБН}1}) \times (1 - P_{\text{ОБН}2}) \times (1 - P_{\text{ОБН}3}) = 0,002$	$(1 - P_{\text{ЛС}1}) \times (1 - P_{\text{ЛС}2}) \times (1 - P_{\text{ЛС}3}) = 0,7128$

Возможности оптимального логического алгоритма поясняет график зависимости $R_{\text{обн}}$ от $R_{\text{лс}}$ при различных значениях порога L в диапазоне от 0,1 до 13,8 (рис. 2.30.4). Здесь, как и в алгоритме случайного выбора, отдельные точки соединены технически реализуемыми отрезками прямых линий. Оптимальная логика в состоянии улучшить оба показателя, что видно из сравнения с точкой, соответствующей логике «2 из 3-х». Крайние точки графика – для логики НИ и НИЛИ – не оптимизируются, они совпадают для обычной и для оптимальной логики.

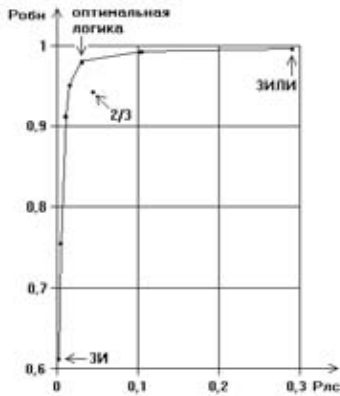


Рис. 2.30.4 График зависимости $R_{\text{обн}}$ от $R_{\text{лс}}$

Оптимальный допороговый алгоритм принципиально ничем не отличается от оптимального логического, их блок-схемы одинаковы (рис. 2.30.3). Основное усложнение допорогового алгоритма связано с необходимостью накопления более подробной информации о плотностях вероятностей $w_s(X)$ и $w_p(X)$. Допороговый параметр X может быть не только непрерывным, но и многозначным, принимающим несколько (более двух) значений с той или иной вероятностью. В последнем случае распределение имеет дискретный вид, аналогичный приведенному в таблице 2.30.1. Если отдельное СО формирует сигнал срабатывания на основе анализа сигналов в форме ЛОП, то это упрощает задачу построения комбинированного СО. По крайней мере один такой алгоритм нам уже известен из раздела 2.6.

Наиболее важным, и в то же время наиболее распространенным случаем распределения допорогового параметра X является его нормальное (Гауссово или колоколообразное) распределение, когда значения параметра группируются вокруг определенной точки. Оно описывается плотностью вероятности

$$w(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}\right); -\infty < X < \infty$$

где μ – математическое ожидание (среднее значение параметра X), σ – среднеквадратическое отклонение (СКО), характеризующее величину разброса парамет-

ра X относительно его среднего значения. Приведенное выражение для плотности вероятности удовлетворяет условию нормировки, которое означает, что параметр X с вероятностью 1 принимает какое-либо значение из интервала допустимых значений

$$\int_{-\infty}^{\infty} w(X) dX = 1$$

Вероятность того, что величина X превысит пороговое значение C , определяется интегралом

$$P(X > C) = \int_C^{\infty} w(X) dX = 1 - \int_{-\infty}^C w(X) dX$$

Данный интеграл позволяет определять значения вероятностей обнаружения или ложного срабатывания. Для нормального распределения он не выражается через элементарные функции, поэтому для проведения оценок пользуются табличными значениями интеграла ошибок (в статистике), получаемыми численным интегрированием выражения

$$\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X \exp(-t^2/2) dt$$

Следует иметь в виду, что под названием интеграла ошибок в различных справочниках могут скрываться несколько отличающиеся выражения. Нормальное распределение с произвольными параметрами μ и σ всегда может быть приведено к виду интеграла ошибок заменой $t = (X-\mu)/\sigma$, то есть сдвигом начала отсчета в точку μ и изменением масштаба в σ раз. Некоторые значения интеграла вероятностей приведены в таблице 2.30.3. Для больших значений X можно использовать асимптотическое разложение

$$\Phi(X) \approx 1 - \frac{\exp(-X^2/2)}{\sqrt{2\pi}X} \times \left(1 - \frac{1}{X^2} + \frac{3}{X^4} - \dots\right)$$

Нормальные распределения одного из допороговых параметров X_i в общем случае имеют вид

$$w_{S_i}(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{S_i}^2}} \exp\left(-\frac{(X_i - \mu_{S_i})^2}{2\sigma_{S_i}^2}\right);$$

$$w_{P_i}(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{P_i}^2}} \exp\left(-\frac{(X_i - \mu_{P_i})^2}{2\sigma_{P_i}^2}\right)$$

Здесь μ_{S_i} и μ_{P_i} – средние значения полезных и помеховых сигналов, а σ_{S_i} и σ_{P_i} – их СКО (рис. 2.30.5). Среднее значение помехового сигнала μ_{P_i} чаще всего равно 0 (или это может быть сделано сдвигом начала отсчета). Величина σ_{P_i} определяет ширину шумовой дорожки. При появлении полезного сигнала происходит смещение шумовой дорожки на величину μ_{S_i} без изме-

Таблица 2.30.3 Значения интеграла ошибок

X	0	0,5	1	1,28	1,5	1,64	2	2,05	2,33	2,5	3
Φ(X)	0,5	0,691	0,841	0,9	0,933	0,95	0,977	0,98	0,99	0,9938	0,9987

нения ее ширины. Если измерять параметры μ_{Si} и X_i в единицах $\sigma_{Pi} = \sigma_{Si} = \sigma$, то есть ввести новые нормированные переменные $\mu_i = \mu_{Si} / \sigma_{Pi}$ и $x_i = X_i / \sigma_{Pi}$, то выражения для плотностей вероятности принимают вид

$$w_{Si}(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu_i)^2}{2}\right); \quad w_{Pi}(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2}\right)$$

Здесь μ_i – отношение сигнал/шум. Величина μ_i может медленно меняться со временем при изменении помеховой обстановки (за счет возрастания σ_{Pi} во время дождя, усиления ветра или воздействия других факторов).

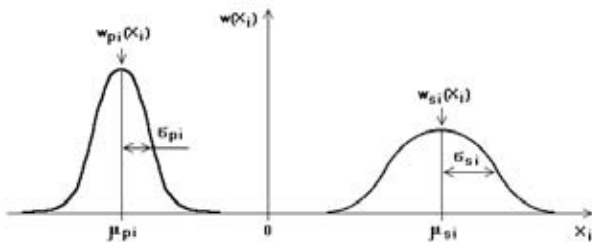


Рис. 2.30.5 Плотности вероятности полезных и помеховых сигналов

Теперь выражение для ЛОП упрощается

$$\ln(w_{Si}(x_i) / w_{Pi}(x_i)) = \mu_i x_i - (\mu_i)^2 / 2$$

и оптимальное решающее правило принимает вид линейного неравенства

$$\sum_{i=1}^N \mu_i x_i > L$$

в частности, для двух датчиков $\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 > L$. Соответствующее равенство дает семейство прямых линий, меняющих свое положение в зависимости от выбранного значения порога L (рис. 2.30.6). С увеличением порога уменьшаются значения вероятности обнаружения и вероятности ложной тревоги. Наклон прямых остается постоянным, они всегда перпендикулярны к отрезку PS , соединяющему точку концентрации помеховых сигналов P и полезных – S . Решающее правило 2И формирует сигнал срабатывания при одновременном превышении порогов обоими сигналами ($x_1 > \Pi_1$) и ($x_2 > \Pi_2$).

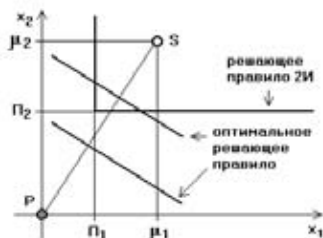


Рис. 2.30.6 Оптимальное решающее правило для двух параметров x_1 и x_2

Прежде всего возникает вопрос, дает ли оптимальный допороговый алгоритм выигрыш по сравнению с

обычной логикой, например, с логикой 2И, и если да, то насколько он велик и при каких условиях он будет максимален? Для ответа на него следует зафиксировать величину вероятности ложного срабатывания для логики 2И на некотором уровне $\delta = P_{ЛС2И} = P_{ЛС1} \times P_{ЛС2}$, затем подобрать величину порога L оптимального алгоритма, дающую то же значение $P_{ЛСОПТ} = \delta$, и сравнить обеспечиваемые обоими алгоритмами значения вероятностей пропуска нарушителя $\chi = (1 - P_{Обн2И}) / (1 - P_{ОбнОПТ})$.

Сначала выберем небольшую вероятность ложного срабатывания $\delta = 0,01$ и будем считать, что оба датчика имеют одинаковое отношение сигнал/помеха $\mu_1 = \mu_2 = \mu \gg 1$. Тогда $P_{ЛС1} = P_{ЛС2} = (\delta)^{1/2} = 0,1$ и соответствующие значения порогов $\Pi_1 = \Pi_2 = 1,28$ (табл. 2.30.3). В этом случае вероятность обнаружения логического алгоритма 2И составит $P_{Обн2И} = P_{Обн1} \times P_{Обн2} \approx (1 - \exp(-(\mu - 1,28)^2 / 2)) / ((2\pi)^{1/2}(\mu - 1,28))^2 \approx 1 - 2\exp(-(\mu - 1,28)^2 / 2) / ((2\pi)^{1/2}(\mu - 1,28))$. Модифицируем оптимальный допороговый алгоритм умножением неравенства на постоянную величину, так чтобы $Y = (\mu x_1 + \mu x_2) / ((2)^{1/2} \mu) > L$. Тогда случайный параметр Y имеет СКО $\sigma_Y = 1$ и математическое ожидание для помехового сигнала $\mu_{PY} = 0$, а для полезного сигнала $\mu_{SY} = (2)^{1/2} \mu \approx 1,41\mu$. Из условия сохранения вероятности ложного срабатывания $P_{ЛСОПТ} = \delta = 0,01$ получаем значение порога $L = 2,33$ (табл. 2.30.3). Отсюда вероятность обнаружения оптимального алгоритма $P_{ОбнОПТ} \approx 1 - \exp(-1,41\mu - 2,33)^2 / 2) / ((2\pi)^{1/2}(1,41\mu - 2,33))$. Оценка выигрыша оптимального допорогового алгоритма по сравнению с логикой 2И составит $\chi(\mu) = (1 - P_{Обн2И}) / (1 - P_{ОбнОПТ}) = 2(1,41\mu - 2,33) / (\mu - 1,28) \times \exp(0,5\mu^2 - 2,02\mu + 3,53)$. Ряд значений $\chi(\mu)$ приведен в таблице 2.30.4.

Таблица 2.30.4 Оценка выигрыша $\chi(\mu)$

μ	3	4	5	6
$\chi(\mu)$	16	77	960	32000

Аналогичные оценки могут быть получены для случая произвольной величины δ , если воспользоваться значениями порогов из таблиц интеграла ошибок или их приближительной оценкой $\Pi \approx (-2(\ln((2\pi)^{1/2}\delta)) + \ln(-2\ln((2\pi)^{1/2}\delta)))^{1/2}$. Получаемые соотношения довольно громоздки, но из них следует, что величина выигрыша χ возрастает при комбинировании датчиков с высоким отношением сигнал/шум и при необходимости обеспечения высоких вероятностных характеристик.

Чтобы воспользоваться оптимальным алгоритмом, остается дать ответ еще на один вопрос: каким образом выбирать пороговые значения? На первый взгляд проблема кажется неразрешимой. Действительно, зависимость значения порога L от требуемых характеристик не выражается в аналитическом виде. Проблема осложняется тем, что отношения сигнал/шум μ_i непрерывно меняются. Если в решающем правиле $\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 > L$ зафиксировать величину L , то любые изменения уровня шумов будут сопровождаться изменением вероятностных характеристик алгоритма.

Для выхода из сложившейся ситуации необходимо связать значение порога с текущим уровнем шумов. Если непрерывно контролировать величину СКО σ любого случайного сигнала с нормальным распределением амплитуд и поддерживать постоянное отношение Π/σ уровня порога Π к текущему значению σ , то будет сохраняться постоянная частота ложных срабатываний, так как сигналы в БО фильтруются в узкой полосе частот полезных сигналов. При этом оптимальный алгоритм гарантирует максимально возможную вероятность обнаружения. Аналогично, если поддерживать на постоянном уровне отношение $(\mu-\Pi)/\sigma$, то будет обеспечена постоянная вероятность обнаружения (при минимальной вероятности ложного срабатывания). Алгоритм с постоянной частотой ложных срабатываний более актуален, так как ложные срабатывания проявляются сразу, а нарушители ходят не каждый день. А при чем же здесь оптимальный алгоритм? Он обеспечивает наилучший наклон границы решающего правила $\sum \mu_i X_i > L$.

Итак, оптимальное решающее правило комбинированного СО, приспособленное для практической реализации, приобретает вид

$$\sum_{i=1}^N \mu_i x_i / M > L, \text{ где } M = \sum_{i=1}^N (\mu_i)^2$$

Здесь μ_i – текущее значение отношения сигнал/шум i -ого канала. Оно определяется отношением среднего (или минимального обнаруживаемого) значения полезного сигнала и текущей величины СКО помехи σ_{pi} . Значение μ_i определяет «вес» допорогового сигнала x_i , также измеряемого в единицах σ_{pi} , благодаря чему СКО всех x_i устанавливается равным 1. M – нормирующий коэффициент, величина которого определяется текущими значениями μ_i . Благодаря ему СКО суммы, стоящей в левой части, также поддерживается на уровне 1. Величина порога L устанавливается в диапазоне $L = 3 \dots 7$ в зависимости от требуемой частоты ложных срабатываний.

Оценка текущих значений СКО не вызывает сложностей. Для реализации алгоритма нужно определить

сумму произведений $(\mu_i x_i)$. Операцию деления ее на сумму квадратов μ_i с успехом заменяет усилитель с АРУ, поддерживающей на своем выходе шумовую дорожку единичной (или нормированной) ширины. Постоянная времени АРУ должна составлять десятки секунд, чтобы отслеживать только медленные помеховые изменения. Аналогичные нормирующие цепи АРУ устанавливаются на выходах X_i каждого датчика. Если полезные сигналы с датчиков поступают на сумматор не одновременно, то БО комбинированного СО должен быть снабжен элементами памяти или пиковыми детекторами. Впрочем, любой временной параметр можно рассматривать как еще один дополнительный параметр X_{N+1} .

Пример. Рассмотрим вариант реализации оптимального комбинированного СО (ОК!СО), состоящего из двух датчиков с выходами в виде допороговых сигналов X_1 и X_2 , измеряемых в вольтах. Запишем его алгоритм в виде $Y = \eta(\mu_{s1}X_1/(\sigma_1)^2 + \mu_{s2}X_2/(\sigma_2)^2) > L$, где L – величина порога. Будем считать, что шумы обоих датчиков независимы друг от друга, их СКО меняются в одних и тех же пределах $\sigma_1 = 0,2 \dots 1$ В, $\sigma_2 = 0,2 \dots 1$ В, а уровни полезных сигналов составляют $\mu_{s1} = 4$ В и $\mu_{s2} = 4$ В. В приведенном неравенстве η – нормирующий множитель, задающий фиксированное СКО левой части σ_y . Тогда постоянный порог L обеспечивает постоянную частоту ложных срабатываний. Регулировка его уровня в пределах $L = (3 \dots 7)\sigma_y$ позволяет устанавливать наработку на ложное срабатывание от нескольких минут до десятков лет. Отношение сигнал/шум в каждом из каналов меняется в зависимости от текущей помеховой обстановки в пределах $\mu_{s1}/\sigma_1 = 4 \dots 20$, $\mu_{s2}/\sigma_2 = 4 \dots 20$.

Приведенных данных достаточно, чтобы представить вариант ОКСО в законченном виде (рис. 2.30.7). Допороговый сигнал первого датчика X_1 проходит через две нормализующие цепи, необходимые в данном случае для корректной работы микросхем аналоговых перемножителей DA2 и DA3. Первая из цепей выполнена на элементах DA1.1, R3, R4, R5, она служит для усиления входного сигнала X_1 в 10 раз. Вторая цепь состоит из резисторов R1, R2, она делит сигнал на 10.

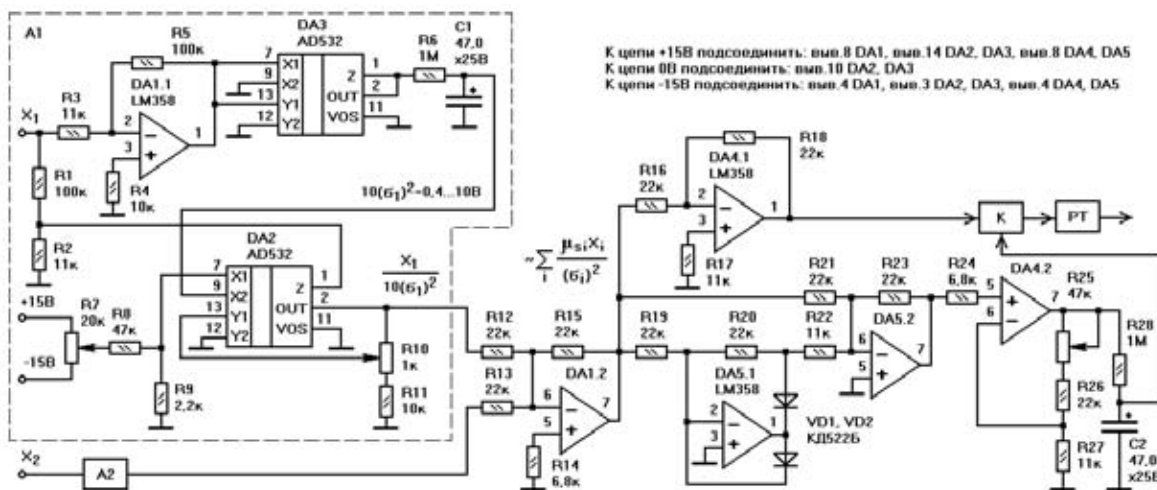


Рис. 2.30.7 Оптимальное комбинированное СО

Микросхема DA3 представляет собой аналоговый перемножитель в стандартной схеме включения. На два ее входа (X_1 и Y_1) подается один и тот же сигнал (равный $-10X_1$), а с ее выхода (OUT) снимается сигнал, пропорциональный произведению $U_{OUT} = X_1 \times Y_1 / 10 = 10(X_1)^2$. Здесь и далее все значения выражены в вольтах. Сигнал усредняется интегрирующей цепочкой R6, C1 с постоянной времени $\tau = R6 \times C1 = 30$ с. Время усреднения подстраивает алгоритм под медленные изменения помеховой обстановки. В результате на вход X2 (вывод 9) микросхемы DA2 поступает сигнал, в 10 раз превышающий квадрат СКО входного шумового сигнала; он мнется в пределах $10(\sigma_1)^2 = 0,4...10$ В.

Микросхема DA2 включена по стандартной схеме делителя. Сигнал на ее выходе OUT (вывод 2) равен $U_{OUT} = 10Z/X2 = X_1 / (10(\sigma_1)^2)$. В случае, если СКО помехового сигнала возрастает от $\sigma_1 = 0,2$ В до $\sigma_1 = 1$ В, уровень выходного сигнала будет понижаться от $U_{OUT} = 0,2/0,4 = 0,5$ В до $U_{OUT} = 1/10 = 0,1$ В. Если полезный сигнал ($X_1 = 4$ В) приходит на фоне помех минимального уровня, то сигнал на выходе DA2 составит $U_{OUT} = 4/0,4 = 10$ В, а на фоне максимальных помех – $U_{OUT} = 4/10 = 0,4$ В. Отношение сигнал/шум меняется в тех же пределах, что и на входе схемы, – от $10/0,5 = 20$ до $0,4/0,1 = 4$. Элементы R7 и R10 служат для точной установки нуля и коэффициента пропорциональности в схеме деления.

Схема блока A2 полностью повторяет схему блока A1. На ее вход поступает допороговый сигнал второго датчика X_2 , а с выхода снимается сигнал $U_{OUT} = X_2 / (10(\sigma_2)^2)$.

На элементах DA1.2, R12...R15 выполнен инвертирующий сумматор. Его выходной сигнал (на выводе 7 DA1.2) $U_{OUT} = -(R15/R12) \times X_1 / (10(\sigma_1)^2) - (R15/R13) \times X_2 / (10(\sigma_2)^2) = -0,1(X_1/(\sigma_1)^2 + X_2/(\sigma_2)^2)$. Это выражение полностью реализует оценку левой части неравенства в алгоритме ОКСО. В данном случае сигналы обоих каналов суммируются с единичными коэффициентами, так как значения μ_{s1} и μ_{s2} совпадают. Если бы они были различны, то следовало бы выбрать R12 и R13 в соответствии с этими значениями.

На элементах DA5.1, DA5.2, VD1, VD2, R19...R23 реализован двухполупериодный детектор сигналов низкого уровня. Правильная работа детектора обеспечивается точным выполнением соотношений $R19 = R20$ и $R21 = R23 = 2R22$. Усилитель протектированного сигнала на элементах DA4.2, R24...R27 имеет коэффициент усиления, регулируемый (с помощью R25) в пределах $K_{yc} = 3...8$. Интегратор R28, C2 с постоянной времени $R28C2 = 30$ с устанавливает на своем выходе уровень порога, в 3...8 раз превышающий средневыпрямленное значение шума на выходе сумматора. Строго говоря, в данном месте следовало бы поставить цепочку, выделяющую среднеквадратическое значение шума, однако, здесь мы пользуемся тем, что средневыпрямленное значение примерно на 10% ниже среднеквадратического. Для синусоидаль-

ного сигнала их отношение равно $(8)^{1/2}/\pi \approx 0,90$. Поэтому, определив средневыпрямленное значение, необходимо увеличить его на 10%, чтобы получить оценку среднеквадратического. Таким образом диапазону $L = (3...7)\sigma_y$ соответствует диапазон $K_{yc} = 3...8$. Несмотря на видимое усложнение схемы, получение средневыпрямленного значения с помощью пары ОУ обходится дешевле, чем определение среднеквадратического значения с помощью двух аналоговых перемножителей (один понадобится для перемножения, второй – для извлечения квадратного корня).

Текущий сигнал $-\eta(\mu_{s1}X_1/(\sigma_1)^2 + \mu_{s2}X_2/(\sigma_2)^2)$ подается через инвертор DA4.1 на компаратор (К), где сравнивается с установленным порогом. В зависимости от типов используемых датчиков компаратор может быть однополярным или двухполярным и иметь селекцию по длительности выброса. Приведенная схема (рис. 2.30.7) обеспечивает постоянную частоту ложных срабатываний ОКСО при поддержании максимальной вероятности обнаружения в условиях меняющейся помеховой обстановки каждого из датчиков.

Микросхему аналогового перемножителя AD532 можно заменить на 525ПC1, 525ПC2, 525ПC3, MC1591, AD530, AD534. При этом нельзя забывать, что ряд перемножителей требует введения дополнительных цепей начальной балансировки.

Основные достоинства оптимальных комбинированных СО:

- высокая эффективность; автоматическое поддержание оптимального соотношения между вероятностью обнаружения и вероятностью ложного срабатывания; значительный выигрыш по сравнению с алгоритмами стандартной логики;
- возможность изменения одного из параметров $R_{обн}$ и $R_{лс}$ в связи со сменой обстановки или временем суток (день/ночь); значение другого параметра всегда будет наилучшим;
- высокая надежность; сохранение работоспособности при выходе из строя части датчиков; ОКСО способно активировать сигнал тревоги даже от одного датчика, обладающего достаточным «весом»;
- возможность добавления датчиков или их замены датчиками другого типа, если они имеют унифицированный выходной сигнал; алгоритм ОКСО не зависит от типов используемых датчиков; комбинированное СО легко наращивается или модернизируется;
- способность алгоритма к обучению за счет накопления информации в конкретных условиях; адаптация алгоритма под меняющуюся интенсивность непрерывных помех, что особенно важно при установке датчиков на улице;
- простота схемотехнической реализации алгоритмов оптимального комбинирования; высокая эффективность алгоритмов при малых вложениях.

2.31. Сравнение СО различных типов

Даже беглый взгляд на количество различных типов СО убеждает в их большом разнообразии. Несмотря на это, хотелось бы обозреть все типы СО одновременно в сравнении друг с другом. Однако, общее количество показателей, используемых для сравнения СО, составляет более пятидесяти. В различных случаях и условиях применения оказываются важными разные показатели. Для удаленного контроля коттеджа в зимнее время имеет значение отсутствие ложных срабатываний, для охраны большого количества экспонатов – низкая стоимость одного датчика. Скорее всего, синтез единого универсального показателя для сравнения СО между собой невозможен. Выбор конкретного типа СО требует детального анализа всех характеристик. Тем не менее, можно выделить два основных показателя, дающих отправную точку для начала любого сравнения. Вне всякого сомнения и независимо от применения, любого пользователя прежде всего интересует стоимость СО и его вероятностные характеристики. Последние включают в себя с одной стороны высокую вероятность обнаружения, то есть способность СО формировать сигнал срабатывания при появлении нарушителя, а с другой – низкую вероятность ложной тревоги, то есть отсутствие срабатываний в дежурном режиме. Оба показателя часто можно заменить одним общим – отношением сигнал/помеха. Известно, что при отношении менее 3-х крайне затруднительно добиться удовлетворительных вероятностных характеристик, при отношении более 6-и – вероятностные характеристики хорошие, а при отношении более 10-и – отличные.

Сравним потенциальные возможности датчиков по их способности выдавать или не выдавать сигнал тревоги. Естественно сравнивать пассивные и активные СО отдельно друг от друга. Начнем с пассивных СО (табл. 2.31.1). Рядом с названием типа СО приведен но-

мер соответствующего раздела. Уровни полезных и помеховых воздействий указаны для их основных видов. Для ряда экстремальных факторов они могут выходить за указанные средние пределы. Уровни воздействий относятся к принципу обнаружения в целом и не подразумевают каких-либо конкретных моделей техники, для которых возможны вариации в сторону их улучшения или ухудшения.

Активные лучевые (или параметрические) СО контролируют величину принимаемой мощности (или другого параметра, например, емкости или индуктивности). Они характеризуются начальным уровнем этого параметра и его изменениями для полезных и помеховых воздействий (табл. 2.31.2). Изменения могут быть представлены как в абсолютном выражении, так и в относительном – в виде глубины модуляции m . Соотношение полезных и помеховых изменений дает возможность оценить отношение сигнал/помеха.

Ряд активных СО контролирует уровень отраженного сигнала (табл. 2.31.3). Они реагируют на факт появления сигнала с заданными параметрами. Интенсивность отраженного сигнала пропорциональна площади поверхности предмета, попадающего в ЗО. Поэтому отношение сигнал/помеха примерно определяется отношением площадей ОО и постороннего предмета и составляет около 10...100.

Второй по важности вопрос (после качества работы СО) – его стоимость. Другие показатели, такие как надежность, внешний вид, потребляемый ток или напряжение питания, менее важны. Они рассматриваются отдельно для каждого конкретного применения. Стоимость (в отличие от отношения сигнал/шум) характеризует определенные модели СО. Она представлена в виде средних значений, полученных из розничных прайс-листов различных фирм. Естественно сравнивать точеч-

Таблица 2.31.1 Пассивные СО

Тип СО	Контролируемый параметр	Уровень полезных воздействий	Уровень помеховых воздействий	Отношение сигнал/ помеха
Электромеханические (2.1)	смещение	1...10 мм	<1 мм	>10...100
Электромеханические (2.1)	сила (обрыва)	10...2000 Н	<10 Н	>10...100
Тензометрические (2.2)	сила	10...2000 Н	<10 Н	>10...100
ПДД (2.3)	давление	0,6...10 кПа	20...100 Па	6...100
Наклонометрические (2.4)	угол наклона	$(5...500) \times 10^{-6}$	$10^{-7}...10^{-8}$	50...500
Вибрационные (2.5)	вибросмещение	0,2 мкм ...0,1 м	<0,02 м	1...10
Сейсмические (2.6)	виброскорость	0,01...20 мм/с	0,01...1 мм/с	1...20
Термические (2.7)	температура	>70...100°C	<60°C	>10
Барометрические (2.9)	дифференциальное давление	10...300 Па	0,1...0,3 Па	>30
Акустические пассивные (2.10)	звуковое давление	0,002...0,2 Па	0,002...0,2 Па	1...100
Ольфактронные (2.12)	объемная доля	<0,01...100 ppm	-	-
Электростатические (2.14)	заряд	1...100 нКл	1...200 пКл	5...500
Магнитометрические (2.15)	скорость изменения магнитной индукции	20...400 нТл/с	<4 нТл/с	>5...100
Гравиметрические (2.16)	скорость изменения гравитационного поля	$\approx 5 \text{ нм/с}^3$	$\approx 1 \text{ нм/с}^3$	≈ 5
ИК пассивные (2.25)	принимаемая мощность	0,1...10 мкВт	10...30 нВт	3...300

Таблица 2.31.2 Активные лучевые или параметрические СО

Тип СО	Контролируемый параметр	Начальный уровень	Уровень полезных изменений	Уровень помеховых изменений	Отношение сигнал/помеха
Шаговые (2.8)	сопротивление	~1 кОм	$m = 0,001...0,1$	$m < 0,1$	1...10
Акустические активные (2.11)	звуковое давление	0,01...2 Па	$m = 0,02...1$	$m < 0,02$	1...50
Радиационные (2.13)	уровень излучения	1...10 мкЗв/час	$m = 0,5...1$	$m < 0,05$	10...20
Емкостные (2.17)	емкость	100...1000 пФ	10...100 пФ	<2 пФ	5...50
Индуктивные (2.18)	индуктивность	10...1000 мкГн	$m = 0,01...0,2$	$m < 0,002$	5...100
Радиолучевые (2.22)	уровень принимаемой мощности	0,1...1000 мкВт	$m = 0,5...1$	$m < 0,05$	10...20
Радиометрические (2.24)	уровень принимаемой мощности	0,01...10 мкВт	$m = 0,02...0,5$	$m < 0,01$	2...50
Фотолючевые (2.26)	уровень принимаемой мощности	1 нВт...0,1 мВт	$m = 0,5...1$	$m < 0,1...0,2$	5...50

ные СО с точечными, линейные – с линейными, а объемные – с объемными. Среднерыночные оценки стоимости для точечных СО даны в расчете на одну охраняемую точку (табл. 2.31.4), для линейных – на единицу длины (табл. 2.31.5), а объемных – на единицу объема (табл. 2.31.6). Один и тот же тип СО в зависимости от его реализации может попадать в различные таблицы.

Таблица 2.31.3 Активные СО отраженного сигнала

Тип СО	Уровень отраженного сигнала
Радиолокационные (2.23)	1 пВт...1 мкВт (с доплеровским сдвигом)
ИК активные с отражением (2.27)	1 нВт...0,1 мВт
Телевизионные (2.28)	>0,1...2 лк

Таблица 2.31.4 Точечные СО

Тип СО	Стоимость, руб.
Электромеханические (2.1)	300...1200 (10...40 \$)
Тензометрические (2.2)	600...6000 (20...200 \$)
ПДД (2.3)	1500...6000 (50...200 \$)
Вибрационные (2.5)	200...2000 (7...70 \$)
Термические (2.7)	45...100 (1,5...3 \$)
Акустические пассивные (2.10) – ДРС	300...600 (10...20 \$)
Электростатические (2.14)	600...3000 (20...100 \$)
Емкостные (2.17)	600...1500 (20...50 \$)
Телевизионные (2.28)	7500...30000 (250...1000 \$)

Естественно, приведенные данные являются в какой-то мере условными. И дело не только в том, что отношение сигнал/помеха зависит как от размеров ЗО, так и от условий применения, выбора места установки или качества монтажа и настройки. Низкое отношение имеет значение в случае амплитудной селекции, оно может быть скомпенсировано применением более сложного алгоритма, использующего временные или частотные характеристики сигналов, накопление импульсов, информативные признаки тонкой структуры сигналов. Однако, если сигналы имеют четкое отличие по величине, то шансов добиться успеха – больше, причем, без существенного усложнения СО.

Таблица 2.31.5 Линейные СО

Тип СО	Стоимость, руб./м
Электромеханические (2.1)	8...50 (0,3...1,5 \$/м)
Тензометрические (2.2)	600...6000 (20...200 \$/м)
ПДД (2.3)	300...2000 (10...70 \$/м)
Вибрационные (2.5) – трибоэлектрические	70...240 (2,5...8 \$/м)
Вибрационные (2.5) – оптоволоконные	200...600 (7...20 \$/м)
Сейсмические (2.6)	150...600 (5...20 \$/м)
Электростатические (2.14)	150...300 (5...10 \$/м)
Магнитометрические (2.15)	600...4800 (20...160 \$/м)
Емкостные (2.17)	150...200 (5...7 \$/м)
Проводно-волновые (2.19)	60...450 (2...15 \$/м)
ЛВВ (2.20)	2000...4000 (70...130 \$/м)
Радиолучевые (2.22)	90...900 (3...30 \$/м)
ИК пассивные (2.25)	60...200 (2...7 \$/м)
Фотолючевые (2.26)	90...900 (3...30 \$/м)

Таблица 2.31.6 Объемные СО

Тип СО	Стоимость, руб./м ³
Барометрические (2.9)	3...30 (0,1...1 \$/м ³)
Акустические активные (2.11)	40...800 (1...25 \$/м ³)
Радиолокационные (2.23)	3...15 (0,1...0,5 \$/м ³)
Радиометрические (2.24)	3...15 (0,1...0,5 \$/м ³)
ИК пассивные (2.25)	1...5 (0,03...0,15 \$/м ³)

На окончательный выбор конкретной модели СО для определенного применения может повлиять любой из более чем пятидесяти показателей. Именно поэтому на рынке успешно присутствуют многочисленные, в том числе и весьма дорогие модели. Часто один-единственный показатель способен пересилить все остальные. Если важно обеспечить надежную охрану, то может иметь значение применение комбинированного СО, состоящего из трех-четырех СО различных физических принципов, или одного СО редкого типа. В любом случае техническое средство, в отличие от живого человека, не делает намеренных ошибок и всегда функционирует в соответствии с заложенной в него программой.

Литература

Если давать ссылку к каждой цифре и каждому факту, приведенным в этой книге, то список литературы превысит по размерам объем самой книги. Кроме того, используемые формулы и константы широко известны и присутствуют в различных изданиях. Ограничусь лишь указанием наиболее важных источников информации. Почти все приведенные формулы, описывающие физические явления, интенсивность полезных и помеховых воздействий, можно найти в любом курсе физики, например, в классическом трехтомнике Савельева (Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х томах). То, что выходит за рамки данного курса, описано во всеобъемлющем десятитомнике Ландау (Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. В 10 томах). Значения констант и физических параметров различных объектов взяты из справочника (Физические величины. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1991).

Любое СО представляет собой измерительное устройство. Измерения же производятся с помощью датчиков – преобразователей физических величин в электрический сигнал. От их качества и правильного выбора параметров – чувствительности, диапазона измерения, погрешностей – зависит значительная часть успеха. Поэтому датчики надо знать. И не только по отдельным описаниям или руководствам, но и по всеобъемлющим обзорам. Среди множества книг по чувствительным элементам и методам измерения электрических и неэлектрических величин перечислю лишь некоторые. 1) Измерение электрических и неэлектрических величин. Под общ. ред. Н.Н. Евтихиева. М., Энергоатомиздат, 1990. 2) Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение. М., Мир, 1989. 3) Датчики. Справочник. Под редакцией З. Ю. Готры, О. И. Чайковского. 4) Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения. М., Высшая школа, 1986. 5) Бриндли К. Измерительные преобразователи. М., Энергоатомиздат, 1991. Также полезна информация, содержащаяся на сайтах фирм-производителей ЧЭ, где приводятся их параметры и типовые схемы включения.

Электрические сигналы с выходов датчиков подвергаются последующей алгоритмической обработке. Много полезных соотношений, касающихся обработки сигналов в условиях воздействия помех, выбора оптимальных алгоритмов выделения информации, теории выбросов случайных процессов, приведено в трехтомнике Левина (Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х томах).

Алгоритмы обработки сигналов реализуются в виде электронных схем. Основы их построения подробно изложены во многих изданиях. Классическими являются два. 1) Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 3-х томах. М., Мир, 1993 (или другие годы). 2) Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М., Мир, 1983. Электронная схема складывается из отдельных каскадов: усилителей, фильтров, генераторов и т.д. Множество вариантов их исполнения можно найти в книге (Горошков Б. И. Радиоэлектронные устройства. М., Радио и связь, 1985). К сожалению, большая часть описываемых каскадов выполнена на устаревших элементах.

На работу СО влияют различные внешние факторы. Данные, описывающие климатические и погодные воздействия, характерные для различных местностей по всему миру, приведены в издании (Valley S.L. Handbook of Geophysics and Space Environment. AFCRL. New York, 1965). Для понимания отличительных особенностей передвижения человека и животных полезны сведения, имеющиеся в книгах (Кацитадзе З.И. Эволюция вертикальной ходьбы. Тбилиси, Сабчота Сакартвело, 1968) и (Muybridge E. Animals in motion. New York, 1957).

Технические сведения о выпускаемых и продаваемых СО, о принципах их действия, особенностях эксплуатации, а также о ценах, можно найти на Интернет-сайтах, таких как security-bridge.com, corbina.ru/~ksi, sec.ru, secur.ru, akvilona.ru, centers.ru и многих других. В качестве источников информации о конкретных типах СО использованы многочисленные рекламные проспекты, фирменные каталоги, патенты, статьи и описания конструкций из популярных журналов «Радио», «Радиоконструктор», «Радиолюбитель», «Радиоаматор» и др.

Бывает смешно и нелепо читать в переводной статье про «тамперный контакт», «протекторную зону», «портальный контроль» или «свободную интрузию». Большая часть специфических понятий, используемых в технике охранной сигнализации, имеет эквиваленты в других языках. Соответствие между многими наиболее употребляемыми русскими и англоязычными терминами и словосочетаниями можно найти в издании (Груба И.И. Англо-русский словарь по техническим средствам обнаружения и системам охранной сигнализации, М., Спутник Плюс, 2006).

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Основные понятия охранной сигнализации	5
1.1. Что такое средство обнаружения	6
1.2. Типы средств обнаружения	8
1.3. Как выбирать средства обнаружения	15
1.4. Пассивные средства обнаружения	16
1.5. Активные средства обнаружения	34
2. Средства обнаружения	43
2.1. Электромеханические СО	45
2.2. Тензометрические СО	51
2.3. Протяженные датчики давления	58
2.4. Наклонометрические СО	65
2.5. Вибрационные СО	67
2.6. Сейсмические СО	86
2.7. Термические СО	92
2.8. Шаговые СО	93
2.9. Барометрические СО	94
2.10. Акустические пассивные СО	98
2.11. Акустические активные СО	105
2.12. Ольфакторные СО	114
2.13. Радиационные СО	116
2.14. Электростатические СО	118
2.15. Магнитометрические СО	122
2.16. Гравиметрические СО	131
2.17. Емкостные СО	132
2.18. Индуктивные СО	145
2.19. Проводно-волновые СО	149
2.20. Линия вытекающей волны	152
2.21. Антенные СО	154
2.22. Радиолучевые СО	154
2.23. Радиолокационные СО	170
2.24. Радиометрические СО	174
2.25. Инфракрасные пассивные СО	176
2.26. Фотолучевые СО	186
2.27. ИК активные СО с отражением	198
2.28. Телевизионные СО	200
2.29. Прочие СО	205
2.30. Комбинированные СО	206
2.31. Сравнение СО различных типов	215
Литература	217

Серия «Библиотека инженера»

Груба Игорь Иванович

Системы охранной сигнализации

Технические средства обнаружения

Ответственный за выпуск
В. Митин

Верстка
СОЛОН-ПРЕСС

Обложка
СОЛОН-ПРЕСС

*ООО «СОЛОН-ПРЕСС»
123001, г. Москва, а/я 82
Телефоны:
(499) 254-44-10, (499) 252-36-96, (499) 252-25-21
E-mail: avtor@coba.ru,
www.solon-press.ru*

По вопросам приобретения обращаться:
ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»
Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, www.aliants-kniga.ru

По вопросам подписки на журнал «Ремонт & Сервис» обращаться:
ООО «Ремонт и Сервис 21»
тел.: (499) 795-73-26, www.remserv.ru

ООО «СОЛОН-ПРЕСС»
103050, г. Москва, Дегтярный пер., д. 5, стр. 2
Формат 60×88/8. Объем 27,5 п. л.
2-й завод — 200
Отпечатано ООО «Летер Групп»
Тираж 2000



Е•Х•Р•О ELECTRONICA

ВЕСНА В ЭЛЕКТРОНИКЕ!

ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ
В РОССИИ И ВОСТОЧНОЙ ЕВРОПЕ.
В 2012 ГОДУ НАМ ИСПОЛНЯЕТСЯ 15 ЛЕТ!

11-13 АПРЕЛЯ 2012. МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

**15-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
И КОМПЛЕКТУЮЩИХ**

Организаторы:



primexpo



ITE



При содействии:



ЕВРАЗИЯ



+7 (812) 380 6003/07/00, electron@primexpo.ru

www.expoelectronica.ru