

Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.

# Наладка устройств электрооборудования напряжением до 1000 В

Силовые трансформаторы

Распределительные устройства

Устройства релейной защиты и автоматики

Теория и практика для специалиста-наладчика

Секреты наладки и ремонта

Основные руководящие документы

Справочная информация

ISBN 5-91359-094-7



9 785913 590947

Находка для специалиста!



*Серия «Библиотека инженера»*

**Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.**

**Наладка устройств  
электрооборудования напряжением  
до 1000 В**

**Москва  
СОЛОН-ПРЕСС  
2010**

УДК 621.399

ББК 32.882

Д 93

*Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.*

**Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В.** — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. — 400 с.: ил. — (Серия «Библиотека инженера»).

**ISBN 978-5-91359-094-7**

В книге изложены методы наладки низковольтных (до 1000 В) систем электроснабжения широкого диапазона применения. Рассматриваются вопросы электрических измерений, испытательного оборудования и собственно типовые методики испытаний в соответствии с ПУЭ. Книга написана на уровне доступном для специалистов среднего звена: техников-электриков и электромонтеров предприятий промышленного, сельскохозяйственного и культурного назначения, жилищно-коммунального хозяйства. Может быть использована для учащихся средних специальных учебных заведений, курсов повышения квалификации.

#### **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](http://www.solon-press.ru) в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (499) 254-44-10, (499) 252-36-96.

**Бесплатно** высылается каталог издательства по почте. Для этого присылайте конверт с маркой по адресу, указанному в п. 1.

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](http://www.solon-press.ru/kat.doc).

Интернет-магазин размещен на сайте [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru).

По вопросам приобретения обращаться: **ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»**

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, [www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

Сайт издательства «СОЛОН-ПРЕСС»: [www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru)

E-mail: [avtor@coba.ru](mailto:avtor@coba.ru)

**ISBN 978-5-91359-094-7**

© Дубинский Г. Н., Левин Л. Г., 2010

© Макет и обложка «СОЛОН-ПРЕСС», 2010

## Предисловие

Наладка устройств электроснабжения включает в себя широкий комплекс работ по проверке и испытаниям электрооборудования, которые проводятся при вводе электроустановки в эксплуатацию, в целях профилактики или после ремонта. В отличие от ранее изданной книги по наладке устройств высоковольтного электроснабжения [18], предназначенной для сравнительно узкого круга профессионалов, настоящее пособие ориентировано на самый широкий круг электриков, которым по роду своей деятельности приходится заниматься работами по проверке и испытаниям в электроустановках до 1000 В, — будь то в цехах промышленных предприятий, на объектах жилищно-коммунального или сельского хозяйства.

В последние годы резко возросла энерговооруженность жилых и общественных зданий. В жилых зданиях, в частности, установленная мощность электрооборудования в отдельных квартирах достигает нескольких десятков киловатт: помимо электроосвещения, ее потребляют электропечи и кондиционеры, устройства обогрева полов, стиральные машины и электрочайники, телевизоры и компьютеры и пр. Это потребовало не только проведения специальных работ по вводу в действие электроустановок зданий и сооружений, но и повышенного внимания к обеспечению условий электробезопасности. Ведь если в производственном помещении произошло, например, повреждение изоляции какого-либо электрооборудования, оно будет замечено и устранено обслуживающим электротехническим персоналом, тогда как в квартире такое же повреждение может вызвать самые опасные последствия для жильцов. К сожалению, уровень бытового электротравматизма в России на порядок выше, чем в развитых странах Европы.

В связи с этими обстоятельствами в 1995 г. в стране была создана Система сертификации электроустановок зданий, призванная повысить надежность и безопасность эксплуатации бытовых электроустановок и предусматривающая осуществление с этой целью ряда организационных и технических мероприятий. В частности, был регламентирован перечень, программа и методика сертификационных испытаний электроустановок зданий. Конечно, никакие меры не могут обеспечить стопроцентной безопасности, но ее повышению принятая система безусловно способствовала. Впо-

следствии обязательную сертификацию отменили, оставив выполнение соответствующих работ на добровольной основе.

Излагаемый в книге материал соответствует требованиям Правил устройства электроустановок (ПУЭ) и Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). При ссылке на ПУЭ в тексте в скобках указываются номера соответствующих пунктов ПУЭ 7-го издания (ПУЭ-7), когда же приводятся ссылки на 6-е издание (ПУЭ-6) или другие источники, — эти случаи оговариваются особо. Наряду с названными документами, обязательный характер имеют также инструкции заводов-изготовителей электрооборудования, приборов и аппаратов и требования органов Ростехнадзора и Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (ФАТРМ).

При пользовании названными документами необходимо руководствоваться следующим:

1) нормы и требования 6-го издания ПУЭ действительны до даты ввода в действие соответствующих глав ПУЭ-7, после чего они утрачивают силу;

2) нормы и требования, отличные от ПУЭ, могут выполняться лишь в тех случаях, когда они являются более жесткими, например, требования Ростехнадзора, владельца электроустановки или опыт наладочных организаций;

3) в случаях, когда требования ПУЭ и ПТЭЭП не совпадают, надо руководствоваться тем, что первые «распространяются на вновь сооружаемые и реконструируемые электроустановки», вторые же — на находящиеся в эксплуатации или в ремонте;

4) в настоящее время в Российской Федерации введен ряд стандартов ГОСТ Р, идентичных соответствующим стандартам Международной Электротехнической комиссии (МЭК); стандарты МЭК полагаются и в основу разрабатываемых Технических регламентов. Следует иметь в виду, что требования ГОСТ Р приобретают обязательное значение после утверждения их в составе ПУЭ;

5) близким по содержанию к указанным государственным документам является сборник «Объем и нормы испытаний электрооборудования» РАО «ЕЭС России».

В общем объеме наладочных работ немалую долю и значение имеют электрические измерения, требования к проведению которых особенно возросли с образованием ФАТРМ. Первая часть предлагаемой книги начинается с освещения этих именно вопро-

---

сов, которые излагаются достаточно подробно еще и потому, что наладчики далеко не всегда уделяют им должное внимание, а зачастую недостаточно с ними знакомы. Вторая часть касается выбора способов и аппаратуры для регулирования электрических параметров при производстве наладочных работ. В ней дается также описание элементов полупроводниковой и вычислительной техники, входящих в состав проверяемой аппаратуры управления. Содержание третьей, наиболее объемной части, определено, в основном, тематикой, рекомендованной органами ФАТРМ и Ростехнадзора. Здесь описывается методика наладки конкретных объектов и их элементов в установках электроснабжения до 1000 В, включая технологию работ и аппаратуру для их проведения.

В настоящее время наладчик должен владеть не только приемами выполнения работ, но — в необходимой степени — и вопросами теории, знать не только возможности и особенности применяемых средств измерения и испытательного оборудования, но и разбираться в принципах конструкции и функционирования оборудования и аппаратуры, подлежащих наладке. Между тем область деятельности наладчика достаточно широка и требует знаний в различных областях электротехники, которые не всегда могут быть получены при учебной подготовке; кроме того, техника интенсивно обновляется. Многие наладчики преодолевают связанные с этим трудности путем самообразования. Однако просмотр значительного объема технической литературы различного профиля требует много времени, да и не всегда для этого есть возможность. Поэтому в данной книге некоторые методические материалы предваряются сведениями из производственных и учебных изданий. Разумеется, при этом она не может и не должна заменить инструкции, учебные пособия и т. п., к которым следует обращаться при необходимости более детального ознакомления с каким-либо вопросом.

За исключением отдельных замечаний, в книге не освещаются мероприятия по обеспечению безопасности, так как они составляют предмет отдельного курса, а экзамены на квалификационную группу по электробезопасности сдаются наладчиками ежегодно. Тем не менее надо твердо знать главное: безопасность проведения работ всегда должна иметь приоритетное значение. Не может быть и не нужно искать компромисса между стремлением выполнить работу во что бы то ни стало и возможностью нарушить при этом требования техники безопасности.

Не приводятся также правила пользования серийными электроизмерительными приборами и подробности их устройства, так как эти сведения содержатся в документах изготовителей.

Опытные образцы устройств по схемам рис. 1.14, 2.12, 3.55, 3.77, 3.91 выполнил инж. А. Тих.

Авторы благодарят инж. Л. Цыганова за внимательный просмотр рукописи и полезные замечания.

Заранее благодарны читателям, которые найдут возможность прислать свои отзывы и пожелания по адресу:

123001, г. Москва, а/я 82, ООО Издательство «СОЛОН-ПРЕСС»,  
E-mail: avtor@coba.ru

или

190031, г. Санкт-Петербург, ООО «ЭЛЕКТРОНАЛАДКА»,  
Казначейская ул, д.4,  
E-mail: enspb@electronaladka.com

# 1. Электрические измерения

## 1.1. Метрология

### 1.1.1. Основные понятия и определения

Измерение значений физических величин производят с помощью *средств измерения* (СИ). Измерения с помощью электрических приборов называют *электрическими измерениями*. При *прямом* измерении значение измеряемой величины получают непосредственно из опыта, пример — измерение электрического напряжения вольтметром. При *косвенном* измерении искомое значение находят расчетным путем на основании известной зависимости между измеряемой величиной и другими величинами, которые можно измерить непосредственно; пример — расчет сопротивления резистора на основании закона Ома по значениям тока через резистор и падения напряжения на нем, измеренным посредством амперметра и вольтметра

Результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины из-за погрешности измерений. *Абсолютная погрешность*  $\Delta A$  равна разности между измеренным  $A_{\text{из}}$  и действительным  $A_{\text{д}}$  значениями измеряемой величины  $A$ :

$$\Delta A = A_{\text{из}} - A_{\text{д}}.$$

Под действительным значением измеряемой величины понимают то значение ее, которое найдено экспериментальным путем с помощью образцовых приборов и для данной цели может быть принято за истинное.

*Относительной погрешностью* измерения называют отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta_A = \Delta A / A_{\text{д}}.$$

*Приведенной относительной погрешностью* называют отношение абсолютной погрешности к разности между верхним и нижним пределами измерительного прибора, а если нижний предел равен нулю, то — к верхнему пределу измерения в данном диапазоне  $a_{\text{в}}$  (для двусторонней шкалы — к сумме верхних пределов):

$$\delta_{\text{пр}} = \Delta A / a_{\text{в}}.$$



## 1. Электрические измерения

---

Предельное значение приведенной относительной погрешности, выраженное в процентах, указывает класс точности приборов, погрешность которых не зависит от значения измеряемой величины; к ним относится большинство стрелочных показывающих и самопишущих приборов. Предельная относительная погрешность приборов, зависящая от измеряемой величины, определяется формулой

$$\delta_m = c + d (x_k/x - 1),$$

а класс прибора — отношением  $c/d$ , где  $c$  и  $d$  — постоянные числа,  $x_k$  — конечное значение диапазона измерений,  $x$  — значение измеренной величины. Пример:

$\delta_m = 0,05 + 0,02(U_k/U - 1)$ , класс точности 0,05/0,02 (вольтметр) или

$\delta_m = 0,2 + 0,1(I_k/I - 1)$ , класс точности 0,2/0,1 (амперметр).

Стандартизированы классы 0,05 ... 4,0, но выпускаются и приборы с нормированной погрешностью (10—15)%.

Погрешность при косвенных измерениях зависит от того, какими соотношениями связана искомая величина с непосредственно измеряемыми величинами, и от погрешностей измерения этих величин. Если результат косвенных измерений величины  $A$  равен сумме или разности двух или нескольких величин, например  $A = B \pm C$ , то наибольшая возможная относительная погрешность будет:

$$\delta_a = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B \pm C},$$

где  $\Delta B$  и  $\Delta C$  — наибольшие возможные погрешности измерения величин  $B$  и  $C$ , а знак «+» или «-» выбирается в зависимости от того, складываются или вычитаются эти величины в формуле  $A = B \mp C$ .

Если искомая величина вычисляется как произведение нескольких величин, например

$$A = B^m C^n,$$

то наибольшая возможная относительная погрешность находится по формуле

$$\delta_a = m\delta_B + n\delta_C,$$

где  $\delta_B$  и  $\delta_C$  — относительные погрешности непосредственного измерения величин  $B$  и  $C$ .

Когда погрешности отдельных непосредственных измерений имеют разные знаки, то для учета самого неблагоприятного случая эти погрешности суммируют с одинаковыми знаками.

Различают систематические и случайные погрешности измерений. При повторных измерениях одной и той же величины *систематическая* погрешность остается неизменной или изменяется закономерно, а *случайная* изменяется произвольным образом. Постоянная систематическая погрешность может возникать, например, при пользовании СИ, параметры которых отличны от номинальных, переменная — вследствие закономерного изменения напряжения источника питания, в частности, из-за разряда аккумулятора. Случайные причины либо неизвестны, либо проявление их носит случайный характер (например, наводки от электромагнитных полей). Снижение случайных погрешностей достигается либо уменьшением их влияния (например, экранировкой измерительных цепей), либо повторением измерений.

### 1.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений

#### 1.1.2.1. Методические погрешности измерений (погрешности метода) и их причины

а) Несоответствие выбранного прибора или метода измерения реальным характеристикам измеряемой величины. Пример: измеряется амплитудное значение  $U_m$  напряжения переменного тока вольтметром, реагирующим на действующее значение напряжения  $U$ . Предполагая, что измеряемое напряжение имеет синусоидальную форму, вычисляют амплитудное значение как  $U_m = \sqrt{2}U$ . Возникающая при этом систематическая ошибка будет тем большей, чем больше степень отклонения реальной кривой напряжения от синусоиды.

б) Выход значений контролируемого параметра за пределы принятого диапазона. Пример: измеряется ток нагрузки линии с помощью трансформатора тока. Известно, что при большой кратности тока погрешность измерения может превысить допустимые пределы.

в) Отклонение за допустимые пределы разницы между значениями измеряемого параметра на входе прибора и в точке отбора. Пример — измерение напряжения на нагрузке: погрешность зависит от падения напряжения на соединительных проводах, а значит, и от расстояния до вольтметра.

г) Отличие принятого алгоритма вычислений от более строгой функциональной зависимости, связывающей искомую величину с результатами прямых измерений. Например, изменение активного сопротивления с температурой обычно выражают следующим алгоритмом:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где  $R_1$  — сопротивление, измеренное при температуре  $T_1$ ;  $R_2$  — сопротивление, измеренное при температуре  $T_2$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Для прецизионных измерений применяют более точную трехчленную формулу академика Б. С. Якоби:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2],$$

где  $\beta$  — второй температурный коэффициент.

### 1.1.2.2. Инструментальные погрешности

а) Погрешности, вызываемые медленно меняющимися внешними причинами, как то: погодные параметры, напряженность электрических и магнитных полей, напряжение источников питания и пр.

б) Погрешности, обусловленные ограниченной разрешающей способностью СИ. Пример: измерение параметра, значение которого соизмеримо с ценой деления шкалы прибора.

в) Динамические погрешности, обусловленные инерционностью прибора. Зависят как от свойств самого прибора, так и от характера изменения во времени измеряемой величины. Пример: измерение параметров быстропеременных процессов с помощью самописца.

г) Погрешности, вызываемые взаимодействием данного СИ с объектом измерения и другими приборами. Пример: измерение напряжения источника малой мощности вольтметром с невысоким внутренним сопротивлением.

д) Погрешности передачи измерительной информации. Примеры: падение напряжения в соединительных проводах, «размытое» изображение на экране осциллографа.

### 1.1.2.3. Погрешности, вносимые оператором (субъективные погрешности)

а) Погрешности считывания значений измеряемых величин со шкал и диаграмм.

б) Погрешности обработки кривых без применения технических средств. Пример: обработка осциллограмм с целью определения мгновенных значений тока или напряжения, сдвига фаз и др. параметров.

в) Погрешности, вызываемые воздействием оператора на объект измерения и СИ. Пример: влияние оператора и расположения проводов при измерении малых емкостей, параметров полевых транзисторов, микросхем и т. п.

Кроме того, свою долю погрешности могут внести средства вычислительной техники (калькуляторы, компьютеры и пр.), применяемые при обработке промежуточных результатов измерения (погрешность вычислений).

#### 1.1.2.4. Основная и дополнительная погрешности СИ

Погрешности, зависящие от внешних условий (влияющих факторов), принято подразделять на основные и дополнительные. *Основной погрешностью* ( $\delta_0$ ) называют погрешность в условиях, принятых за нормальные. *Дополнительные погрешности* ( $\delta_d$ ) возникают при отклонении влияющих факторов от нормальных значений. В число влияющих факторов входят:

а) Изменение температуры. Отклонение температуры, при которой производится измерение, от той, при которой градуировался прибор, вызывает погрешность ( $\delta_T$ ), равную основной на каждые  $10^\circ\text{C}$  отклонения.

б) Отклонение напряжения от номинального значения. Эту погрешность ( $\delta_n$ ) следует учитывать при настройке частотных реле, ею можно пренебречь при снятии векторных диаграмм, в других случаях — исключить выбором соответствующей схемы испытания.

в) Влияние внешних магнитных полей. Погрешность ( $\delta_M$ ) зависит от конструкции и степени защиты прибора и определяется в функции напряженности магнитного поля.

г) Отклонение положения прибора от нормального. При отклонении положения прибора на  $10^\circ$  погрешность ( $\delta_p$ ) численно равна классу прибора.

д) Погрешность измерительных трансформаторов ( $\delta_K$ ), возникающая из-за отклонения коэффициента трансформации от номинального значения.

### 1.1.2.5. Общая погрешность

Суммарная дополнительная погрешность рассчитывается как

$$\delta_D = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_n^2 + \delta_m^2 + \delta_n^2 + \delta_k^2},$$

а общая погрешность будет

$$\delta = \sqrt{\delta_o^2 + \delta_d^2}.$$

Пример. Определить возможную погрешность измерения напряжения срабатывания реле 50 В при следующих условиях: температура окружающей среды +5°; измерение производится вольтметром с пределом 150 В, класс точности 0,5. Пусть известно, что напряженность внешнего магнитного поля в месте расположения вольтметра составляет 1 Э (79,6 А/м), соответствующая погрешность пропорциональна напряженности и при 5 Э (398 А/м) приведенная погрешность равна 2,5%; наклон прибора от горизонтального положения 10°.

Предельное значение основной погрешности вольтметра на делении 50 В составит  $\delta_o = 0,5 \cdot 150/50 = 1,5\%$ . Если прибор градуировался при 15°С, то дополнительная погрешность от изменения температуры будет также 1,5%.

Дополнительная погрешность от влияния магнитного поля составит  $2,5 \cdot 3/5 = 1,5\%$ , от наклона прибора  $0,5 \cdot 3 = 1,5\%$ ; погрешности от изменения напряжения вольтметр не имеет.

Возможная суммарная дополнительная погрешность составит тогда

$$\delta_D = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2} = 2,6\%,$$

а возможная полная погрешность

$$\delta = \sqrt{1,5^2 + 2,6^2} = 3,0\%.$$

Погрешность можно снизить, применив вольтметр с меньшим верхним пределом измерения, например 100 или 50 В: тогда основная погрешность уменьшится соответственно до 1 или 0,5%, а полная до 2,0 или 1,0%. Дальнейшего снижения погрешности можно достичь путем устранения или уменьшения воздействия влияющих факторов, например, установив вольтметр в нормальное положение.

## 1.2. Системы электроизмерительных приборов

### 1.2.1. Аналоговые приборы

Измерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, называют *аналоговыми*. Эти приборы имеют оцифрованную шкалу, а перемещение их подвижной части (угловое или линейное) с указателем (стрелкой) определяется значением измеряемой величины. Отношение перемещения указателя к соответствующему значению измеряемой величины называется *чувствительностью*, обратная величина — *постоянной* прибора. Например, чувствительность к току может быть выражена в размерности деление/А, к напряжению — деление/В. Разность значений, обозначенных на двух соседних делениях шкалы, называется *ценой деления*.

*Цифровые* приборы преобразуют непрерывную входную величину (напряжение, ток и др.) в отдельные (дискретные) сигналы, а измерительная информация представляется в числовой форме на цифровом индикаторе (дисплее, табло). Поэтому цифровой прибор всегда содержит два основных функциональных узла: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровое отсчетное устройство. Система приборов отечественного производства часто обозначается буквами русского алфавита: цифровая — буквой Ц, аналоговые — в зависимости от конструкции измерительного механизма (ниже — в скобках).

В приборах *магнитоэлектрической* системы (**М**) подвижная часть механизма отклоняется в результате взаимодействия двух магнитных полей: постоянного магнита и катушки с током. Угол поворота стрелки прямо пропорционален току в катушке (измеряемой величине), а направление поворота (знак угла) зависит от направления тока. Особо чувствительные магнитоэлектрические приборы называются *гальванометрами*.

В обычных магнитоэлектрических вольтметрах и амперметрах подвижная часть установлена на подпятниках, из-за трения в которых эти приборы пригодны только для измерения сравнительно больших токов. В гальванометрах подвижная катушка подвешивается на металлической нити или ленте, благодаря чему устраняется трение в опорах и уменьшается противодействующий момент, а следовательно повышается чувствительность прибора и уменьшается погрешность. Измерение угла поворота катушки оптическим

путем обеспечивается с помощью зеркальца, в связи с чем такие гальванометры часто называют зеркальными. При эксплуатации они должны устанавливаться по уровню или отвесу.

Зеркальный отсчет выполняется субъективным или объективным методом. В первом случае перед зеркалом размещается освещенная шкала с делениями. Отраженный от зеркальца луч света направляется в зрительную трубу, в которой видна часть шкалы. Одну из отметок шкалы совмещают с вертикальной чертой на объективе, и при повороте катушки оператор увидит другую отметку шкалы, — деление, соответствующее измеряемой величине. Во втором случае узкий луч света направляют непосредственно на зеркальце. Отразившийся от него луч попадает на шкалу в виде тонкой световой полоски, которая перемещается по шкале на расстояние, пропорциональное углу поворота катушки. Когда не представляется возможным пользоваться зеркальными гальванометрами, требующими стационарной установки, применяют переносные гальванометры меньшей чувствительности (например, микроамперметры).

Катушка гальванометра замыкается на сопротивление, от значения которого зависит характер и время ее движения. Это объясняется тем, что при повороте катушки в поле постоянного магнита в ней индуцируется ЭДС, и возникающий в замкнутой цепи ток тормозит движение катушки. Кроме того, движение катушки тормозится трением о воздух и закручиванием подвеса. Суммарное действие сил, тормозящих (успокаивающих) движение катушки, оценивается так называемым *коэффициентом успокоения*  $\beta$ , по значению которого судят о характере движения. При  $\beta < 1$  процесс носит колебательный характер, причем при  $\beta = 0$  колебания становятся незатухающими. Если  $\beta > 1$ , катушка аperiodически приближается к положению равновесия, не переходя его. Пограничный случай  $\beta = 1$  называют режимом критического успокоения, когда катушка движется тоже аperiodически, но наиболее ускоренно. Сопротивление, на которое замкнута катушка в этом режиме, называют *внешним критическим* сопротивлением.

Гальванометры с повышенным моментом инерции подвижной части называют *баллистическими*. Наибольшее отклонение  $\alpha_m$  подвижной части такого гальванометра пропорционально количеству электричества  $Q$  импульса тока, протекшего через катушку:

$$C_q \alpha_m = Q,$$

где  $C_d$  — баллистическая постоянная (в кулонах на деление шкалы прибора). Наибольшая чувствительность получается при коэффициенте успокоения  $\beta=0$ , что может иметь место при очень большом сопротивлении внешней цепи гальванометра. По мере увеличения  $\beta$  чувствительность падает, при критическом успокоении — в 2,7 раза.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы выполняют обычно на ток до 0,1 А. Для измерения больших токов применяются встроенные или наружные шунты — прецизионные резисторы с малым сопротивлением (порядка десятых, тысячных долей ома и меньше). Шунт параллельно с катушкой включается в цепь измеряемого тока последовательно с нагрузкой. Номинальные значения падения напряжения на шунте стандартизированы и составляют обычно 75 или (реже) 45 мВ. Внутренние (встроенные в прибор) шунты изготавливаются на токи до нескольких десятков ампер. Такие амперметры называют прямоточными и включают в цепь тока непосредственно. Наружные шунты на большие токи (сотни и тысячи ампер) снабжаются двумя парами зажимов: внешняя (токовая) служит для подключения в цепь измерительного тока, внутренняя (потенциальная) — для соединения с прибором (милливольтметром, градуированным в амперах). Такое устройство позволяет избежать погрешности от включения в измерительную цепь падения напряжения на токовых зажимах.

В вольтметрах последовательно с чувствительным измерительным элементом включается встроенный резистор с достаточно большим сопротивлением; для расширения пределов измерения применяются наружные добавочные резисторы. Вольтметр подключается к тем точкам цепи, напряжение между которыми требуется измерить, в частности, параллельно нагрузке. При этом надо учитывать, что сопротивление цепи вольтметра должно быть существенно выше внутреннего сопротивления объекта измерения — практически не менее чем на порядок. добавочного резистора должно быть  $R_d = 500/50 - 2 = 8$  МОм.

Основные достоинства приборов магнитоэлектрической системы — равномерная (линейная) шкала, высокая точность (классы от 0,1 до 1,5), большая чувствительность, малое собственное потребление, незначительное влияние внешних магнитных полей; недостатки — непосредственное измерение только постоянного тока, чувствительность к перегрузкам и механическим воздействиям и др.



В цепях переменного тока измерители магнитоэлектрического типа могут использоваться лишь в двух случаях: 1) подвижная часть прибора имеет малый момент инерции, что позволяет ей следовать за изменением измеряемого сигнала, и 2) прибор применяется совместно с выпрямителем или термопреобразователем. Во всех остальных случаях магнитоэлектрический прибор измерит только постоянную составляющую сигнала, а в цепи синусоидального тока промышленной частоты и выше его показания будут равны нулю; на промышленной частоте заметны вибрация стрелки и характерный звук.

*Электромагнитные* приборы (Э) содержат неподвижную катушку и ферромагнитный сердечник, который втягивается внутрь катушки, когда по ней проходит измеряемый ток. Угол отклонения подвижной части пропорционален квадрату тока в катушке, поэтому направление поворота указателя не зависит от полярности тока. В цепи переменного тока прибор измеряет действующее (эффективное) значение тока. Шкала прибора в начале сжата, а в конце растянута.

Достоинства электромагнитных приборов — простота конструкции, надежность, пригодность для измерений в цепях как постоянного, так и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки (в 2...3 раза). Недостатки — большое собственное потребление, невысокая точность (обычно 1,5...2,5%), малая чувствительность, неравномерность шкалы. Существенное влияние на показания приборов оказывают внешние магнитные поля. Это влияние почти полностью исключается в так наз. *астатических* приборах. Астатический измерительный механизм содержит два одинаковых электромагнитных элемента, расположенных так, что действие внешнего магнитного поля на них взаимно компенсируется. Однако астатические приборы значительно сложнее и дороже.

Приборы электромагнитной системы рекомендуется применять для измерения переменного тока и напряжения. Сравнительно простые, надежные и дешевые, они получили широкое распространение в качестве щитовых приборов.

Рассмотренные электромагнитные приборы относят к группе нерезонансного типа: частота собственных колебаний их подвижной части намного меньше частоты измеряемого сигнала. Существуют и применяются также электромагнитные приборы резонансного типа, частота собственных колебаний подвижной части кото-

рых равна частоте тока в катушках. На этом принципе действуют электромагнитные частотомеры и вибрационные гальванометры.

*Электродинамические* приборы (**Д**) используют взаимодействие катушек с током, одна из которых неподвижна, а другая может поворачиваться на оси. Угол поворота подвижной части пропорционален произведению токов в этих катушках, или квадрату измеряемого тока (напряжения), если катушки соединены последовательно. Совершенствование конструкции позволяет приблизить шкалу к равномерной, кроме ее начальной части. В ваттметрах катушки не соединяются, а включаются в отдельные цепи: одна — параллельно нагрузке, другая — последовательно с ней. Электродинамические приборы применяются преимущественно на переменном токе, но могут работать и в цепях постоянного тока.

Достоинства приборов — высокая точность (до 0,1%), работа на постоянном и переменном токе, измерение действующего значения переменного тока и напряжения. Недостатки: невысокая чувствительность, влияние температуры на показания, значительное собственное потребление, ограниченный частотный диапазон (до 1...5 кГц).

К электродинамической системе относятся и так называемые *ферродинамические* приборы, в которых для усиления индукции применен магнитопровод из магнитомягкого материала. Этим достигается увеличение вращающего момента и уменьшение влияния внешних магнитных полей, повышение чувствительности и снижение потребления. Вместе с тем наличие нелинейного элемента (магнитопровода) снижает точность приборов. Такие измерительные механизмы находят применение в самописцах, где требуется большой вращающий момент, а также при воздействии тряски, вибрации, внешних магнитных полей.

*Индукционный* измерительный механизм (**И**) содержит неподвижные электромагниты и подвижную проводящую часть в виде, например, алюминиевого диска. Обмотки электромагнитов питаются переменным током. Переменные магнитные потоки электромагнитов пронизывают подвижную часть, индуктируют в ней токи и, взаимодействуя с ними, вызывают ее перемещение. Таким образом, индукционные измерительные механизмы могут работать только в цепи переменного тока. Применяются они как счетчики электрической энергии и реже как ваттметры. При этом обмотка одного из электромагнитов включается последовательно в цепь нагрузки, обмотка другого — параллельно нагрузке. Магнитные

## 1. Электрические измерения

---

потоки этих обмоток  $\Phi_I$  и  $\Phi_U$ , пропорциональные соответственно току нагрузки и напряжению на ней, создают на диске вращающий момент

$$M = k\Phi_I\Phi_U \sin \psi,$$

где  $k$  — коэффициент,  $\psi$  — угол между векторами потоков.

Путем надлежащего выбора конструктивных и схемных элементов можно добиться выполнения условий  $\psi = 90^\circ - \varphi$  или  $\psi = \varphi$  ( $\cos \varphi$  — коэффициент мощности). В первом случае вращающий момент будет пропорционален активной мощности  $P = UI \cos \varphi$ , во втором — реактивной  $Q = UI \sin \varphi$ . Спиральная пружина создает противодействующий момент, так что угол поворота диска пропорционален мощности. При отсутствии противодействующей пружины и равномерном вращении диска такое устройство будет отсчитывать соответственно активную и реактивную электрическую энергию, т. е. мощность, умноженную на время вращения диска.

Индукционные механизмы имеют большой вращающий момент, устойчивы к перегрузкам и влиянию внешних магнитных полей; недостатки их — инерционность, невысокая точность.

На основе рассмотренных систем строятся *логометры* — приборы, реагирующие на отношение двух электрических величин. Подвижная часть логометра состоит из двух катушек, жестко укрепленных на одной оси в магнитном поле неподвижных катушек. При отсутствии токов подвижная часть логометра может занимать любое положение. Напряжение на подвижные катушки подается от общего источника. Вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$  этих катушек зависят от токов  $I_1$  и  $I_2$  в них и угла поворота подвижной части  $\alpha$ :

$$M_1 = I_1 F_1(\alpha); M_2 = I_2 F_2(\alpha).$$

Моменты  $M_1$  и  $M_2$  направлены противоположно и при установленном положении подвижной части равны друг другу, так что

$$I_1/I_2 = F_2(\alpha)/F_1(\alpha),$$

то есть

$$\alpha = F(I_1/I_2).$$

Поскольку токи в катушках зависят от сопротивления в их цепи, логометр может быть использован для измерения полного сопротивления, включенного в цепь одной из катушек, если известно сопротивление в другой. На постоянном токе измерительные

механизмы в виде логометра применяются в омметрах, на переменном — в фазометрах, частотомерах, фарадметрах.

*Электростатические* приборы (С). Вращающий момент в них возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных металлических пластин, одна из которых подвижная, другая — неподвижная. Отклонение подвижной части вызывает изменение емкости, образуемой пластинами. Когда к подвижным и неподвижным пластинам подводится измеряемое напряжение, они заряжаются с противоположным знаком и притягиваются друг к другу. Перемещение подвижных пластин передается на указатель и отсчитывается по шкале. Отклонение подвижной части пропорционально квадрату напряжения и изменению емкости прибора, но благодаря надлежащему подбору формы и размеров пластин шкала прибора на участке от 15...25 до 100% практически равномерна.

Электростатические приборы используются для измерения постоянного напряжения и переменного напряжения частотой до нескольких мегагерц, преимущественно — для измерения высоких напряжений. Собственное потребление на постоянном токе близко к нулю, на переменном — весьма мало. На показания приборов практически не влияют частота измеряемого напряжения, температура окружающего воздуха и посторонние магнитные поля, но в сильной степени сказывается влияние электрических полей и влажности воздуха. Для уменьшения влияния внешних электрических полей применяется экранирование прибора; экран соединяется с одним из его зажимов, который при измерении заземляется.

*Термоэлектрический* (Т) прибор представляет собой совокупность одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Преобразователь состоит из термопары и нагревателя, через который пропускается измеряемый ток. ТермоЭДС преобразователя пропорциональна количеству теплоты, выделенной в нагревателе, т. е. квадрату действующего значения измеряемого тока. Поскольку это значение не зависит от частоты тока, термоэлектрическими приборами можно пользоваться и на постоянном, и на переменном токе, включая радиочастоты. К недостаткам приборов относятся инерционность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, недопустимость перегрузки, небольшой срок службы и значительное собственное потребление.

Приборы, содержащие *электронные* компоненты ( $\Phi$ ), представляют собой сочетание выпрямителя, усилителя постоянного тока и магнитоэлектрического измерительного механизма.

Различают вольтметры среднего  $U_{\text{ср}}$ , действующего (эффективного)  $U$  и амплитудного (максимального)  $U_m$  значения. Связь между ними устанавливается посредством коэффициентов амплитуды  $k_a$  и формы  $k_\Phi$ :

$$k_a = U_m / U; k_\Phi = U / U_{\text{ср}}$$

При синусоидальной форме напряжения  $k_a = \sqrt{2} = 1,41$ ;  $k_\Phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ .

Электронные вольтметры *среднего* значения содержат одно- или двухполупериодные выпрямители, диоды которых работают на линейной части своей вольт — амперной характеристики. В электронных вольтметрах *действующего* значения используют детекторы среднего квадратического значения. В таких детекторах применяются либо вентили с участком квадратичной вольт-амперной характеристики, либо термоэлектрические преобразователи, либо же квадратическая характеристика аппроксимируется с помощью резистивно-емкостных цепочек. Электронные вольтметры *действующего* значения с электростатическим измерительным механизмом не требуют использования преобразователей.

Вольтметрами *амплитудного* (пикового) значения (амплитудными вольтметрами) называют приборы, показания которых соответствуют амплитуде измеряемого синусоидального напряжения или максимальному значению напряжения, форма которого отличается от синусоиды. С этой целью в схему аналогового вольтметра вводятся выпрямитель и элемент памяти в виде конденсатора.

Различают амплитудные вольтметры с открытым или закрытым входом. Если измеряемое напряжение содержит постоянную составляющую  $U_0$ , амплитудный детектор с открытым входом измерит суммарную величину  $U_m + U_0$ . Чтобы измерить амплитуду  $U_m$ , применяют схему с закрытым входом, содержащим последовательно включенный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую.

Главные достоинства электронных вольтметров — высокая чувствительность (0,1...1,0 мкВ), малое собственное потребление, широкий диапазон измеряемых напряжений (от микровольт до киловольт) и рабочих частот (до сотен мегагерц).

Электронные счетчики содержат преобразователи мощности в частоту и счетчик импульсов для дальнейшего преобразования ее в сигнал, пропорциональный измеряемой электрической энергии. Широкое распространение получили электронные мегаомметры и др. К недостаткам электронных приборов относятся сравнительно большая погрешность (1,5...4%) и необходимость источника питания.

*Комбинированные* аналоговые приборы (**Ш**) — ампервольтметры (авометры, или тестеры, мультиметры) — универсальные многопредельные измерители, содержащие магнитоэлектрический прибор с добавочными резисторами и шунтами. Поскольку при измерении переменных токов и напряжений используются выпрямители, угол отклонения стрелки измерительного механизма соответствует среднему значению измеряемой переменной величины. Однако надо иметь в виду, что градуируется такой прибор по расчетному действующему значению синусоидальной величины, т. е. с учетом коэффициента формы 1,11. По этой причине при измерении параметров сигнала переменного тока, форма которого отличается от синусоиды, может быть получена значительная погрешность, тем большая, тем больше это отличие.

### 1.2.2. Цифровые приборы

*Цифровые* приборы (**Щ**) быстро вытесняют аналоговые. В наладочной практике широко применяются цифровые вольтметры, частотомеры, омметры, мультиметры, регистрирующие приборы. Они по всем основным показателям превосходят аналоговые приборы, а по стоимости приближаются к ним

Общим узлом для всех цифровых приборов является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Назначение АЦП — преобразование бесконечного множества значений непрерывной (аналоговой) величины в набор ограниченного количества цифровых эквивалентов, кодов. Основными *характеристиками АЦП* являются следующие.

- Длина шкалы  $L$  характеризует число ступеней преобразования (аналогично числу делений шкалы аналоговых приборов) и определяется разрядностью АЦП.
- Разрядность  $n$  — это число двоичных (бит) или десятичных разрядов и соответственно длина шкалы будет  $L = 2^n$  или  $L = 10^n$ .

- Разрешающая способность  $R = 1/L$  характеризует чувствительность АЦП.
- Квант  $q$  — единица младшего значащего разряда (в англоязычной терминологии — последний значащий бит или цифра). Его значение (вес) определяется как отношение верхнего предела измерения, например, номинального напряжения  $U_n$ , к длине шкалы  $L$ :  $q = U_n / L$ . Чем меньше вес кванта, тем выше чувствительность прибора.
- Погрешность квантования  $\Delta_{кв}$  является следствием преобразования бесконечного множества значений входного аналогового сигнала в ограниченное число возможных уровней выходного кода, в результате которого линейная зависимость между входной и выходной величинами заменяется ступенчатой. Максимальное значение этой погрешности

$$\Delta_{кв} = q / 2.$$

Цифровые индикаторы (дисплеи) приборов отражают значение измеряемой величины в десятичной системе счисления. Разрядность цифрового дисплея — это число полных десятичных разрядов, которые индицируются цифрами от 0 до 10. Число десятичных разрядов может быть как целым, например,  $n = 3$  или  $4$ , так и дробным, например,  $n = 3\frac{1}{2}$  или  $6\frac{1}{2}$ . Полной шкале трехразрядного прибора соответствует максимальное число 999, четырехразрядного — 9999 и т. д.

Но в ряде случаев наибольшие возможные значения измеряемой величины далеко не достигают этих чисел в данном диапазоне, а измерения в начале шкалы связаны с большой относительной погрешностью. Чтобы получить возможность работать в конце или середине шкалы, в старшем разряде оставляют только одну значащую цифру — обычно 1, иногда 4, редко 2. При этом разрядность числа определяется только по количеству *полных* разрядов, а *неполный* старший разряд обозначается правильной дробью и служит для расширения диапазона без снижения точности измерений.

Пусть, например, измеряется напряжение в сети 110 В. Трехразрядный прибор на пределе «100» может показать максимальное число 99,9, что недостаточно. Но если ввести еще один полный разряд и перейти таким образом к четырехразрядным числам, то номинальное напряжение сети составит только 11% от максимального числа 999,9 и измерения придется проводить в начале шкалы.

При этом по формуле  $p \dots$ , приняв для простоты  $c = d = 1$ , получим погрешность  $999,9/110 = 9,1\%$ . Если же в дополнение к *полным* трем разрядам ввести *неполный* старший разряд, содержащий только 1, то можно получить максимальное число 199,9 и тем самым расширить трехразрядный диапазон вдвое. Разрядность такого прибора будет  $3\frac{1}{2}$ , а погрешность  $199,9/110 = 1,8\%$ , т. е. в 5 раз меньше, чем в варианте с четырехразрядной индикацией. Аналогично, добавление числа 2 даст расширение диапазона втрое, числа 4 — в 5 раз.

*Преобразование аналог-код* может выполняться различными методами. Метод последовательного приближения (поразрядного взвешивания) заключается в последовательном сравнении измеряемого напряжения с рядом ступеней образцового напряжения таким образом, чтобы сумма их стала как можно ближе к измеряемому значению (подобно тому, как при взвешивании груза подбирают ряд гирь, начиная с самой тяжелой). Каждой ступени приписывается соответствующий двоичный разряд, и результат преобразования получается в двоичном коде. Образцовые напряжения создают, например, с помощью цепочки прецизионных резисторов, питаемых от стабилизированного источника. Этот метод обеспечивает высокое быстродействие и приемлемую точность.

Наиболее высокое быстродействие, но небольшая точность свойственны методу параллельного преобразования. Здесь входной сигнал сравнивается с опорными напряжениями одновременно с помощью большого числа компараторов. Результат сравнения преобразуется в двоичный код с разрядностью  $n$  бит, соответствующей числу компараторов  $2^n$ : например, для получения 8-разрядных слов требуется  $2^8 = 256$  компараторов.

Для измерения медленно меняющихся или постоянных величин применяются АЦП интегрирующего типа. Такие АЦП имеют самые высокие точность, чувствительность, помехоустойчивость, но малое быстродействие. Разновидностями данного типа являются время-импульсный и частотно-импульсный методы. В основу время-импульсного метода положен принцип преобразования входного сигнала во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению сигнала. Этот интервал заполняется импульсами известной частоты, количество которых подсчитывается и отображается устройством цифрового отсчета в единицах входной величины.



Согласно частотно-импульсному методу входной сигнал преобразуется в частоту следования импульсов, пропорциональную значению входной величины. Эти импульсы в течение известного интервала времени поступают на отсчетное устройство; подсчитанное таким образом количество импульсов будет пропорционально значению входной величины.

На этих принципах строятся самые различные цифровые *измерительные приборы*. Цифровые частотомеры могут измерять частоту периодического сигнала и интервалы времени. Входной сигнал преобразуется в серию прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды, следующих с частотой входного сигнала. Далее подсчитывается количество импульсов за равные интервалы времени, которое, таким образом, оказывается пропорциональным частоте входного сигнала. Если, например, длительность интервала принята равной 0,2 с, и за это время на отсчетное устройство поступило 200 импульсов, то измеряемая частота составляет  $200/0,2 = 1000$  Гц. В режиме измерения интервала времени или периода входной сигнал преобразуется в прямоугольный импульс фиксированной амплитуды, длительность которого равна периоду входного сигнала, и подсчитывается число тактовых импульсов стабильной частоты за этот интервал времени. Если, например, тактовая частота принята равной 1000 Гц, а в продолжение периода прошло 200 импульсов, то длительность его составляет  $200/1000 = 0,2$  с. Обычно предусматривается несколько значений тактовой частоты, т. е. несколько диапазонов измерения.

Одним из серийных приборов такого типа является частотомер ЧЗ-18. Его технические характеристики: диапазон измерения частоты 10 Гц ... 50 МГц, диапазон измерения интервала времени — 10 мкс ... 10 с, разрешающая способность 100 нс, входное сопротивление 10 кОм, входная емкость 50 пФ. Этот прибор может служить также источником стабильной частоты.

В цифровых вольтметрах входное напряжение преобразуется (усиливается или ослабляется, выпрямляется, фильтруется) и обрабатывается в соответствии с принятым алгоритмом в аналоговый сигнал, пропорциональный измеряемому параметру (например, действующему значению напряжения). Для перехода к цифровой форме служат, как правило, интегрирующие АЦП. Режим работы прибора задается клавиатурой. Некоторые модели содержат терминал для связи с компьютером.

Портативный цифровой мультиметр — один из самых употребительных приборов, применяемых при производстве наладочных работ для измерения напряжения (до 1000 В), тока (до 20 А), сопротивления (от долей ома до десятков мегаом), частоты. Некоторые модели имеют и другие опции: измерение емкости, проверка полупроводниковых приборов, «прозвонка» электрических цепей и др. Отличие от прочих цифровых приборов состоит в наличии на входе специальных преобразователей различных электрических величин в пропорциональное напряжение постоянного тока, которое и поступает на АЦП для преобразования в код. Конкретная величина и предел измерения выбираются переключателем. В режиме измерения тока используется внутренний шунт. Класс точности указывается для каждого параметра в отдельности, обычно в диапазоне от 0,1 до 5%. Большинство современных приборов обеспечивают автоматический выбор полярности и диапазона измерения, а также автоматическое отключение при длительном перерыве в работе. Масса мультиметров — менее 1 кг.

Цифровые приборы с микропроцессорами имеют более сложную структуру, но и более широкие возможности. Помимо микропроцессора, такой прибор содержит постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), в котором хранятся программы работы, и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в котором хранятся данные. Такая структура обеспечивает самые широкие возможности по преобразованию, хранению и передаче информации. Микропроцессорный прибор может не только автоматически выбирать диапазон и полярность входного сигнала, но и находить его максимальное, минимальное, среднее и действующее значения, производить математические операции, запоминать сотни результатов отдельных измерений.

## 1.3. Техника измерений

### 1.3.1. Измерение постоянного тока и напряжения

Эти параметры измеряют стрелочными приборами преимущественно магнитоэлектрической системы, а также электромагнитными, электродинамическими, электронными и комбинированными и, конечно, цифровыми приборами. Весьма малые напряжения (милливольты, доли милливольт) измеряют электронными приборами и магнитоэлектрическими гальванометрами.

Для расширения пределов измерения напряжения на постоянном токе применяются добавочные резисторы. Сопротивление добавочного наружного резистора можно вычислить по формуле

$$R_d = U_{\text{пр}} / I_H - R_B,$$

где  $U_{\text{пр}}$  — требуемый предел измерения вольтметра;  $I_H$  — ток полного отклонения указателя;  $R_B$  — внутреннее сопротивление вольтметра (катушки измерительного элемента и встроенного резистора). Пусть, например, требуется подобрать добавочный резистор для расширения до 500 В пределов измерения вольтметра на номинальное напряжение 100 В. Ток полного отклонения измерителя  $I_H = 50$  мкА, сопротивление рамки 2 кОм, сопротивление встроенного резистора  $1998 + 2 = 2000$  кОм; тогда внутреннее сопротивление прибора  $R_B = 1998 + 2 = 2000$  кОм = 2 МОм, и сопротивление добавочного резистора должно быть  $R_d = 500/50 - 2 = 8$  МОм.

Когда для расширения пределов измерения вольтметра применяются добавочные резисторы, измеренное напряжение рассчитывается по формуле

$$U = pU_B,$$

где  $p = \frac{R_d}{R_B} + 1$ ;  $U_B$  — показание вольтметра;  $R_B$  — внутреннее сопротивление вольтметра;  $R_d$  — сопротивление добавочного резистора.

Для расширения пределов измерения применяются также делители напряжения (потенциометры) с фиксированным коэффициентом деления, обычно кратным 10. Сопротивление делителя должно быть значительно больше выходного сопротивления объекта измерения, но меньше внутреннего сопротивления прибора. На постоянном токе делители напряжения выполняются из резисторов, на переменном — из резисторов (рис. 1.1,а) или конденсаторов (рис. 1.1,б). При условии  $R_B \gg R_2$  напряжение на выходе резистивного делителя напряжения будет

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U k_d,$$

где  $k_d$  — коэффициент деления.

Если значения сопротивлений выходного плеча делителя  $R_2$  и внутреннего сопротивления вольтметра  $R_B$  соизмеримы, то в качестве выходного сопротивления делителя следует принять не  $R_2$ , а

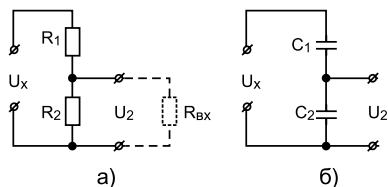


Рис. 1.1. Резисторный (а) и емкостный (б) делители напряжения

величину, представленную параллельным соединением сопротивлений  $R_2$  и  $R_{вх}$ . Значение ее будет меньше  $R_2$  и вследствие уменьшения коэффициента деления результат измерения напряжения будет получен с соответствующей погрешностью. Пример: плечи делителя  $R_1 = 9 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ; внутреннее сопротивление вольтметра равно  $2 \text{ кОм}$ . В этом случае эквивалентное сопротивление выходного плеча делителя будет  $\frac{1 \cdot 2}{1 + 2} = 0,67 \text{ кОм}$  и коэффициент деления  $0,67/9,67 = 0,069$  вместо  $0,10$ ; ошибка 31%.

Аналогичный подсчет показывает, что в случае применения вольтметра с внутренним сопротивлением  $10 \text{ кОм}$  ошибка уменьшится до 8%,  $20 \text{ кОм}$  — до 4,5%, и только при  $50 \text{ кОм}$  — до приемлемого значения 2%. Поэтому делители используются либо для грубых измерений, либо с электронными и цифровыми вольтметрами, входное сопротивление которых достигает сотен мегаом.

Малые токи (от нескольких микроампер до  $20 \dots 50 \text{ мА}$ ) измеряют микро- и миллиамперметрами, включая их в разрыв цепи тока непосредственно. Для измерения токов до нескольких тысяч ампер применяют шунты, свыше — трансформаторы постоянного тока (например, в электролизном производстве). Разумеется, постоянный ток в таких преобразователях непосредственно не трансформируется.

Как и трансформаторы переменного тока, они содержат магнитопровод с первичной и вторичной обмотками, причем первичной обмоткой может служить и сам токопровод с измеряемым током. В конструкциях с дросселями насыщения вторичная обмотка подключается к вспомогательному источнику переменного тока и при равенстве ампервитков переменного и постоянного тока в ней возникает ЭДС. Сила тока в этой обмотке оказывается пропорциональной значению измеряемого постоянного тока, т. е. такое устройство действительно выполняет функции измерительного трансформатора.

Однако конструкции этого типа громоздки, погрешности коэффициента трансформации составляют 2...3%. Лучшие показатели (погрешность до 1%) достигаются применением компараторного принципа. На магнитопроводе такого трансформатора размещена компенсационная обмотка, питаемая от вспомогательного источника постоянного тока. Регулируя сопротивление переменного резистора, измеряют силу тока в ее цепи. Когда нуль-магнитометр (например, датчик Холла) в магнитопроводе покажет, что индукция стала равна нулю, значение тока в компенсационной обмотке будет соответствовать измеряемому току.

### 1.3.2. Измерение переменного тока и напряжения

Эти величины можно измерять непосредственно приборами любой системы, кроме магнитоэлектрической. При больших значениях тока применяются трансформаторы тока, а для расширения пределов измерения вольтметров используют добавочные сопротивления и делители напряжения, в частности, емкостные (рис. 1,б). В последнем случае роль активных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  играют реактивные (емкостные) сопротивления

$$X_1 = 1/\omega C_1 \text{ и } X_2 = 1/\omega C_2 ,$$

а коэффициент деления будет

$$k_d = \frac{X_2}{X_1 + X_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Тогда, например, коэффициент деления 0,1 можно получить при значениях емкостей  $C_1 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 9 \text{ мкФ}$ , но при условии, конечно, что входное сопротивление вольтметра достаточно велико по сравнению с выходным сопротивлением  $X_2$  делителя.

Измерительный трансформатор тока (электромагнитный) содержит стальной магнитопровод с первичной и вторичной обмотками. Первичной обмоткой может служить проводник с измеряемым током, пропущенный в окно сердечника, или катушка из нескольких витков, которая включается последовательно в цепь тока (в рассечку токопровода). Вторичная обмотка питает низкоомные токовые цепи и выполняется, как правило, на номинальный ток 5 А. Работают эти трансформаторы в режиме, близком к короткому замыканию.

В этом режиме угол фазного сдвига между магнитными потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , создаваемыми в магнитопроводе токами первичной и

вторичной обмоток, близок к  $180^\circ$ . Поэтому результирующий магнитный поток  $\Phi$ , равный их геометрической сумме и намагничивающий сердечник, составляет лишь несколько процентов от потока  $\Phi_1$  и индуцирует в замкнутой вторичной обмотке небольшую ЭДС. Но когда по какой-либо причине цепь нагрузки разрывается и поток  $\Phi_2$  исчезает, весь поток  $\Phi_1$  становится намагничивающим и вторичная ЭДС резко возрастает, создавая опасность электропоражения людей и повреждения изоляции трансформатора. В связи с этим разрывать вторичную цепь включенного трансформатора тока не допускается. Если все же такая необходимость возникает, например, при замене измерительных приборов, следует предварительно вторичную обмотку трансформатора закортить. Для этого на клеммных сборках предусматриваются штатные перемычки.

По основным конструктивным признакам низковольтные трансформаторы тока можно подразделить на стационарные и переносные, катушечные и одновитковые. Стационарные трансформаторы устанавливаются в определенном месте, например, РУ-0,4 кВ, и служат для питания токовых цепей максимальных защит и измерительных приборов при эксплуатации электроустановки. Переносные аппараты применяются для оперативных измерений, в частности, при наладочных работах. Катушечные трансформаторы отличаются от одновитковых тем, что их первичная обмотка выполнена в виде катушки из нескольких витков (номинальный ток до 600 А).

Измерив вторичный ток  $I_2$ , можно рассчитать первичный ток  $I_1$ , зная *действительный* коэффициент трансформации  $n = I_1/I_2$ . На практике с этой целью используют значение *номинального* коэффициента трансформации  $n_n = I_{1n}/I_{2n}$ , которое приводится на щитке и в паспорте трансформатора в виде отношения номинальных значений первичного и вторичного токов, например, 300/5. Иначе говоря, вместо действительного значения первичного тока  $I_1 = nI_2$  принимается его расчетное значение  $I_{1p} = n_n I_2$ , в результате чего возникает погрешность  $\Delta I = I_{1p} - I_1 = (n_n - n)I_2$ ; относительная погрешность по току будет

$$\delta_I = \frac{I_{1p} - I_1}{I_1} = \frac{n_n - n}{n} 100\%.$$

Погрешность по току всегда отрицательна и тем больше, чем больше значение первичного тока отличается от номинального и

## 1. Электрические измерения

чем выше сопротивление нагрузки во вторичной цепи. Полезно иметь в виду, что трансформаторы допускают значительную перегрузку по току против номинального значения, а токовая погрешность при этом возрастает сравнительно медленно.

Переносные (лабораторные) трансформаторы тока изготавливаются обычно на несколько пределов измерений тока, для чего у первичной, а иногда и у вторичной обмотки делаются отводы. Кроме того, через отверстие в корпусе можно продеть проводник с измеряемым током сквозь окно сердечника, и тогда он будет служить первичной обмоткой. Если этот проводник пройдет через окно один раз, коэффициент трансформации будет наибольшим, например,  $600/5$ , а если пропустить его в окно несколько раз, намотав витки первичной обмотки поверх кожуха, то во столько же раз уменьшится коэффициент трансформации: до  $300/5$  при двух витках,  $200/5$  при трех и т. д.

На рис. 1.2 показан внешний вид малогабаритного (масса 1,5 кг) лабораторного трансформатора тока типа УТТ-5М на семь пределов измерения, верхний —  $600/5$ . Первичная обмотка имеет отводы на токи 15 и 50 А. Зажимы вторичной обмотки И1-И2 могут соединяться накоротко перемычкой, которую снимают во время испытаний при полностью собранной вторичной цепи.

Трансформатор тока УТТ-6М2 имеет верхний предел измерения  $2000/5$ .

Для измерения тока без разрыва цепи служат переносные трансформаторы тока с разъемным сердечником, который надевается на токоведущий провод. Эти так называемые токоизмерительные клещи выпускаются как с аналоговой, так и с цифровой системами измерения, и в современном исполнении являются многофункциональными приборами, которыми можно измерять не только ток, но и другие электрические параметры. Клещи токоизмерительные типа Ц91 предназначены для измерения тока до 500 А и напряжения до 600 В; клещи Ц4501 (взамен Ц91) — тока до 500 А, напряжения до 600 В и сопротивления до 2 кОм; клещи ЭЛ9000 могут измерять и мощность

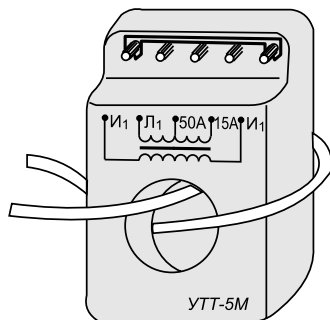


Рис. 1.2. Трансформатор тока типа УТТ-5М

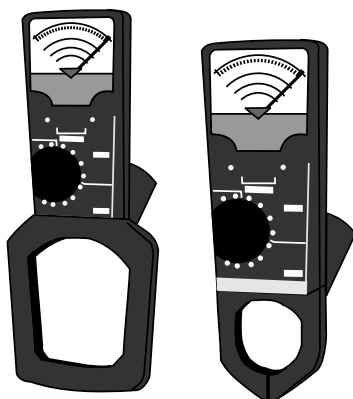


Рис. 1.3. Внешний вид токоизмерительных клещей НЮКИ

до 75 кВт. На рис. 1.3 показаны токопреобразующие клещи фирмы НЮКИ моделей 3127 и 3128. Переключателем устанавливаются пределы измерения: тока от 6 до 300 А (3127) и от 15 до 1500 А (3128); напряжения переменного тока от 150 до 750 В, постоянного 75 В; сопротивления 1 и 100 кОм; температуры от  $-50$  до  $200$  °С.

### 1.3.3. Измерение электрического сопротивления

В общем случае цепь переменного тока может содержать *активное*  $r$  и *реактивное* сопротивления:  $x_L$  — индуктивное,  $x_C$  — емкостное. Полное сопротивление определяется как

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

причем  $x_L = \omega L$ ,  $x_C = 1/\omega C$ , где  $L$  — индуктивность,  $C$  — емкость;  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота.

В наладочной практике чаще всего приходится измерять сопротивление постоянному току (его называют также *омическим*). При промышленной частоте омическое сопротивление проводников из цветного металла мало отличается от активного. При повышенных частотах активное сопротивление возрастает и может стать больше омического из-за влияния поверхностного эффекта. Этот термин, или скин-эффект, обозначает вытеснение переменного тока к поверхности проводника, из-за чего сечение проводящего канала уменьшается и сопротивление его увеличивается.



## 1. Электрические измерения

Непосредственное измерение сопротивления постоянному току производят *омметрами*. Аналоговые омметры часто строятся на основе измерительного механизма магнитоэлектрической системы. В простейших конструкциях измеряемое сопротивление подключается последовательно с катушкой измерительного механизма (рис. 1.4,*а*) или параллельно с ней (рис. 1.4,*б*), если значение сопротивления не превышает 1 Ом. В обоих случаях при неизменном значении ЭДС источника питания ( $E$ ) сила тока через измерительный прибор, т. е. отклонение подвижной части его измерительного механизма, будет зависеть только от значения измеряемого сопротивления ( $R_x$ ), в единицах которого и градуируется шкала прибора.

Шкалы приборов при обеих схемах неравномерны. Погрешность измерения сравнительно велика, показания омметра зависят от состояния элемента питания. Корректировка производится регулируемым магнитным шунтом или резистором. Магнитный шунт представляет собой передвижную ферромагнитную пластинку, перемещая которую с помощью рукоятки на панели прибора, можно изменять рабочий воздушный зазор магнитной системы измерительного механизма и тем самым индукцию в нем. Переменный резистор включается последовательно с батареей питания. Для корректировки омметра с последовательной схемой цепь измерения (зажимы  $R_x$ ) замыкают накоротко и устанавливают стрелку прибора на отметку «0», а с параллельной схемой — размыкают цепь измерения и устанавливают стрелку на отметку « $\infty$ ». Замыкание и разрыв цепи производят специальной кнопкой. Омметры с последовательной схемой более пригодны для измерения больших сопротивлений, с параллельной — малых. Необходимость регулировки является существенным недостатком таких распространенных приборов, как М371, М41070, в остальном имеющих неплохие

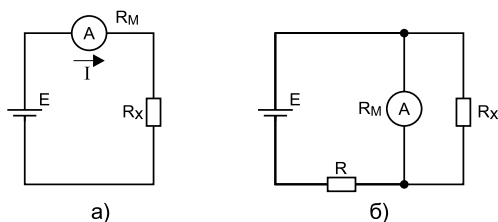


Рис. 1.4. Схемы омметров: а — последовательная; б — параллельная

показатели: класс точности 1,5; диапазон измерения от нескольких ом до нескольких мегаом; масса 0,5 кг.

Этого недостатка лишены омметры с логометрической измерительной частью. Здесь в цепи одной из катушек постоянно включено калиброванное сопротивление, в цепь другой вводится измеряемое сопротивление. Достоинством таких приборов является независимость показаний от напряжения источника питания, недостатком — сравнительно невысокая точность. Логометрические системы постоянного тока находят широкое применение в приборах для измерения очень высоких сопротивлений (мегаомметры).

Независимость показаний наряду с высокой точностью достигается в уравновешенных измерительных мостах постоянного и переменного тока. В общем случае плечи моста могут содержать полные (комплексные) сопротивления  $Z_x$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$ ; одна из диагоналей подключается к источнику переменного тока, в другую включают нуль-индикатор (рис. 1.5). При равновесии моста ток через индикатор равен нулю. Это состояние достигается при выполнении двух условий:

$$Z_x Z_4 = Z_2 Z_3;$$

$$\varphi_x + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3,$$

где  $z$  — модули (абсолютные значения) полных сопротивлений плеч моста;  $\varphi$  — углы фазного сдвига тока относительно напряжения в соответствующих плечах.

Преимущественное распространение получили мосты постоянного тока — с активными сопротивлениями плеч и питанием от источника постоянного тока (рис. 1.6). Условие равновесия одно:  $R_x R_4 = R_2 R_3$ .

Сопротивления плеч моста подбираются с помощью переключаемых или плавно регулируемых резисторов. Нуль-индикатором

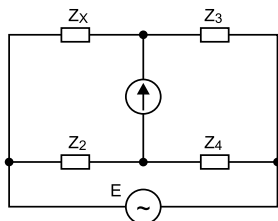


Рис. 1.5. Принципиальная схема моста переменного тока

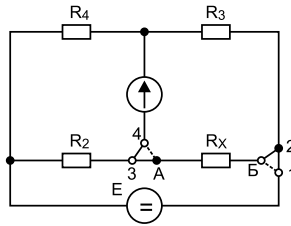


Рис. 1.6. Принципиальная схема моста постоянного тока

служит гальванометр или светодиодная схема. Недостатком таких четырехплечих (иначе — одинарных) мостов является то, что на результат измерения малых (до 10 Ом) сопротивлений оказывает влияние сопротивление переходных контактов и соединительных проводов, которое суммируется с измеряемым сопротивлением. По схеме одинарного моста постоянного тока (мост Уитстона) выполнен, в частности, простой в употреблении и сравнительно недорогой омметр типа ММВ. Два плеча прибора изготовлены в виде реохорда из калиброванной проволоки, по которой перемещается движок. Диапазон измерения 0,5 Ом...50 кОм, погрешность до 15%, масса около 1 кг.

Для уменьшения влияния присоединений измеряемое сопротивление подключается по четырехзажимной схеме, как на рис. При измерении сопротивлений от 10 до  $10^6$  Ом зажимы 1 и 2, 3 и 4 замыкаются перемычками, а резистор, сопротивление которого измеряется, подключают к зажимам 2 и 3 (сплошные линии). В этом случае соединения между точками А и 4, Б и 1 отсутствуют и сопротивление измеряется по двухзажимной схеме. Для перехода к четырехзажимной схеме перемычки 1-2, 3-4 снимаются, а точки А и 4, Б и 1 соединяются между собой; резистор  $R_x$  подключается к зажимам 1 и 2, 3 и 4. В этом случае сопротивление провода от  $R_x$  к зажиму 2 входит в плечо с сопротивлением  $R_3$ , а от  $R_x$  к зажиму 3 — в плечо с сопротивлением  $R_2$ . Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  значительно больше сопротивления проводов, а сопротивление проводов от зажимов  $R_x$  к зажимам 1 и 4 входит в диагональ моста.

Тем не менее при измерении малых сопротивлений (меньше 1 Ом) влияние соединений на погрешность одинарных мостов может быть достаточно велико. Это влияние сводится к минимуму в схеме двойного моста (мост Томсона), содержащего, в отличие от одинарного моста, двойной комплект плеч. В ряде приборов серийного производства двойные мосты совмещаются с одинарны-

ми, что позволяет расширить пределы измерения. Так, диапазон измерения моста типа Р329 — от 1 мкОм (двойной мост) до 1,1 МОм (одинарный мост), одинарно-двойного моста МОД — от  $10^{-8}$  до  $10^8$  Ом.

Высокую точность измерения сопротивления постоянному току обеспечивает метод сравнения измеряемого сопротивления  $R_x$  с образцовым сопротивлением  $R_o$  (рис. 1.7). Эти сопротивления могут соединяться как последовательно (рис. 1.7,а), так и параллельно (рис. 1.7,б). Плечо с сопротивлением  $R_x$  или  $R_o$  выбирается с помощью переключателя. В каждом случае значение измеряемого сопротивления вычисляется по данным двух измерений и будет равно соответственно

$$R_x = R_o U_x / U_o \text{ или } R_x = R_o I_o / I_x.$$

Аналогичным образом можно измерить и полное сопротивление на переменном токе. Метод сравнения часто используется в электронных омметрах.

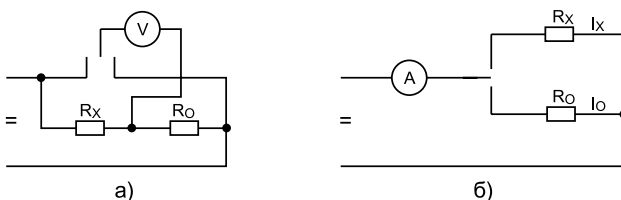


Рис. 1.7. Измерение сопротивления методом сравнения:  
а — последовательная схема; б — параллельная схема

В отдельных случаях измеряют сопротивление *косвенным* способом с помощью амперметра и вольтметра. К нему прибегают, например, когда значение сопротивления нелинейно зависит от тока или при измерении малых сопротивлений, когда чувствительность измерительного прибора оказывается недостаточной. По методу амперметра — вольтметра непосредственно измеряются сила тока  $I$  через сопротивление и создаваемое этим током падение напряжения  $\Delta U$  на нем, а значение сопротивления рассчитывается как  $\Delta U / I$ . Стабилизация тока позволяет исключить необходимость его измерения и выполнения расчетов; так делается, например, в приборе Ф4104.

При измерениях, требующих высокой точности, приходится считаться с внутренним сопротивлением приборов. Поэтому схема

## 1. Электрические измерения

рис. 7,а предпочтительна для измерения больших сопротивлений, когда сопротивлением амперметра можно пренебречь по сравнению с  $R_x$ , а схема рис. 1.7,б — для малых, когда можно пренебречь потреблением вольтметра по сравнению с током через измеряемое сопротивление.

Погрешность измерения методом амперметра-вольтметра рассчитывается по выражению

$$\delta_R = \gamma_V U_{\text{п}} / U_x + \gamma_A I_{\text{п}} / I,$$

где:  $\gamma_V, \gamma_A$  — класс точности вольтметра, амперметра;  $U_{\text{п}}, I_{\text{п}}$  — пределы измерений вольтметра, амперметра.

Для обеспечения требуемой точности при измерении малых сопротивлений необходимо, чтобы в результат измерения не вошло сопротивление контактов токовой цепи. С этой целью падение напряжения  $\Delta U$  снимается на участке цепи, расположенном между контактами, к которым подводится ток  $I$  (рис. 1.8).

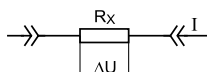


Рис. 1.8. Цепи тока и напряжения при измерении малых сопротивлений

### 1.3.4. Измерение электрической мощности

Мощность можно измерить непосредственно или косвенным образом. Непосредственное измерение мощности осуществляется ваттметрами, построенными на основе электродинамической и ферродинамической систем. При этом одна из катушек прибора включается последовательно в цепь тока нагрузки, другая — через добавочный резистор параллельно нагрузке (рис. 1.9). Изменение направления тока в одной из катушек вызывает отклонение подвижной части ваттметра в противоположную сторону. Прибор будет работать правильно, если зажимы обеих катушек, помеченные знаком «\*» и называемые генераторными, или сетевыми, будут подключены к одному и тому же полюсу (фазе) источника питания.

При нагрузке больше 10...20 А токовую катушку прибора включают через трансформатор тока. Для того, чтобы полярность подключения была правильной, генераторный зажим обмотки должен быть присоединен к началу (зажиму «И1») трансформатора тока. Значение измеряемой мощности в этом случае рассчитывается путем умножения показаний ваттметра на коэффициент трансфор-

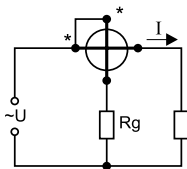


Рис. 1.9. Непосредственное включение ваттметра

мации. Если, например, прибор показал 0,25 кВт, а коэффициент трансформации трансформатора тока составляет 600/5, то фактически измеренная мощность нагрузки будет  $0,25 \cdot 600/5 = 30$  кВт.

Электродинамические ваттметры выпускают в виде переносных приборов высокого класса точности (0,1—0,5) для измерений на переменном токе частотой до 5 кГц. Ферродинамические ваттметры применяют главным образом на промышленной частоте, т. к. на постоянном токе они имеют значительную погрешность из-за гистерезиса сердечников, а на высокой частоте — большие потери.

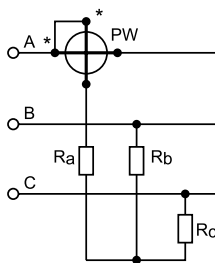
*Косвенно* измерение мощности производится посредством амперметра и вольтметра. При этом вольтметр может быть включен либо до амперметра, либо после него. Обоим вариантам свойственны методические погрешности из-за включения в результат измерения падения напряжения на амперметре в первом случае или тока собственного потребления вольтметра во втором. Выбор варианта зависит от характера нагрузки: при большом токе можно пренебречь ответвлением в цепь вольтметра, при малом — падением напряжения в токовой измерительной цепи.

Численно *полная (кажущаяся)* мощность определяется как произведение напряжения  $U$  [В] и тока  $I$  [А]:  $S = UI$  [В·А]. *Активная* мощность получается умножением этой величины на *коэффициент мощности*, который в цепях синусоидального тока равен  $\cos\varphi$ , где  $\varphi$  — угол фазного сдвига между током и напряжением:  $P = S\cos\varphi$  [Вт]. Составляющая полной мощности  $Q = S\sin\varphi$  [вар] носит название *реактивной* мощности. Зная активную мощность, измеренную ваттметром, и измерив фазометром угол  $\varphi$ , можно рассчитать полную мощность  $S = P/\cos\varphi$  или реактивную мощность  $Q = P\tan\varphi$ . Выпускаются и приборы, измеряющие реактивную мощность непосредственно (варметры). Измерив активную и реактивную составляющие, можно рассчитать полную мощность так:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

## 1. Электрические измерения

Мощность трехфазной системы определяется как сумма мощностей всех трех фаз. Применяются схемы измерения мощности одним, двумя или тремя приборами. При полностью симметричной нагрузке, т. е. когда напряжения, токи и углы сдвига между ними в каждой фазе одинаковы, можно измерить одним прибором мощность любой из фаз А, В или С и полученное значение утроить. Токовая обмотка ваттметра включается в рассечку фазного провода, а обмотка напряжения подключается одним концом («генераторным») к этой же фазе, а другим — к нулевому проводнику трехфазной системы. Если же такой проводник отсутствует или недоступен, нулевая точка создается искусственно посредством трех резисторов (рис. 1.10), сопротивления которых выбираются из условия  $R_{вт} + R_a = R_b = R_c$ , где  $R_{вт}$  — сопротивление обмотки напряжения ваттметра.



*Рис. 1.10. Измерение мощности трехфазного тока одним ваттметром по схеме с искусственной нулевой точкой*

При несимметричной нагрузке пользуются двумя или тремя приборами, показания которых суммируют. В трехпроводных сетях может быть применен метод двух ваттметров (схема Арона), в соответствии с которым токовые обмотки приборов вводятся в любые два линейных провода, обмотки напряжения присоединяются генераторными концами к тем же проводам, а двумя другими концами — к третьему проводу (рис. 1.11). Надо только иметь в виду, что показания каждого ваттметра могут быть как положительными, так и отрицательными (в зависимости от характера нагрузки), и потому они должны суммироваться алгебраически, т. е. с учетом знака. Для того, чтобы отсчитать показания аналогового ваттметра, подвижная часть которого отклонилась в обратную сторону, переключают направление тока в одной из его цепей, обыч-

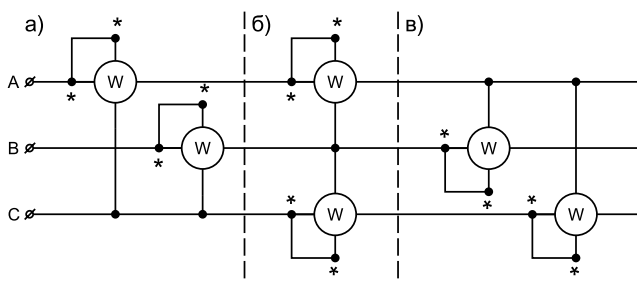


Рис. 1.11. Измерение активной мощности в трехфазной трехпроводной сети по методу двух ваттметров

но — в параллельной, с помощью переключателя. Выпускаются и двухэлементные ваттметры, где обе измерительные системы помещаются в одном корпусе и воздействуют на одну общую подвижную часть, так что суммирование производится автоматически.

В четырехпроводной сети применяется метод трех ваттметров, отличающийся тем, что нагрузочные концы всех трех потенциальных обмоток соединяются вместе и подключаются к нулевому проводу. Показания ваттметров суммируются арифметически. Часто применяются трехэлементные ваттметры.

Во всех рассмотренных схемах ваттметры могут включаться как непосредственно, так и через трансформаторы тока, но обязательно с соблюдением полярности.

### 1.3.5. Измерение электроэнергии

Для измерения энергии переменного тока применяются преимущественно приборы индукционной и электронной систем. Маркировка счетчиков: О — однофазный, А — активной энергии, Р — реактивной энергии, У — универсальный, 3 или 4 — для трех- или четырехпроводной сети.

Число оборотов диска индукционного счетчика, приходящееся на единицу измеряемой энергии, называется *передаточным числом* счетчика и обычно указывается на щитке прибора, например, 1200 оборотов на 1 кВт · час. Число, обратное передаточному, т. е. значение энергии, отсчитанное за один оборот диска, называется *номинальной постоянной* счетчика  $C_H$ , например:

$$C_H = 1/1200 \text{ [кВт} \cdot \text{ч/об]} = 1000 \cdot 3600/1200 = 3000 \text{ Вт} \cdot \text{с/об}.$$



Зная постоянную  $C_n$  и отсчитав число оборотов  $N$ , можно определить потребленную активную энергию  $W = C_n N$ . В действительности постоянная счетчика не остается неизменной, т. е.  $C_d \neq C_n$ , а зависит от нагрузки и внешних условий. Поэтому фактически будет израсходована энергия  $W_d = C_d N$ , а при расчете с использованием номинального значения  $C_n$  будет получена *погрешность*

$$\delta\% = \frac{W - W_d}{W_d} 100 = \frac{C_n - C_d}{C_d} 100\%.$$

Предел допускаемой погрешности определяет класс точности счетчика — от 0,5 до 4.

о назначению счетчики подразделяются на расчетные и контрольные (для технического учета); первые должны быть точнее. То же относится и к трансформаторам тока: они должны иметь класс точности не хуже 0,5 для работы с расчетными счетчиками и 1,0 — для технического учета. Нагрузка вторичной цепи трансформаторов тока, т. е. количество включенных в нее приборов и, следовательно, ее сопротивление, не должна превышать допустимой для данного класса точности. Исходя из этого, ориентировочно принимают максимальное сопротивление соединительных проводов в токовой цепи электромеханических счетчиков не более 0,2 Ом.

Погрешность счетчика зависит от значений тока и коэффициента мощности (эта зависимость называется нагрузочной характеристикой счетчика), а также от формы кривой тока нагрузки, несимметрии напряжений, чередования фаз, температуры и др. В нормальных режимах и при  $\cos\varphi \approx 1$  погрешность счетчика имеет отрицательный знак. На практике у индукционных счетчиков могут наблюдаться и положительные, и высокие значения погрешности, далеко выходящие за пределы класса точности, особенно на присоединениях с низким  $\cos\varphi$  ( $<0,5$ ) и малыми токами нагрузки.

Причиной неправильной работы счетчика часто бывает так называемый *самоход* — вращение подвижной части или мигание индикаторов счетчика под действием приложенного напряжения при отсутствии тока нагрузки, то есть когда потребитель не расходует энергии. Этот дефект может быть следствием неправильной регулировки при изготовлении прибора или нарушений в цепях питания, как, например, обратный порядок чередования фаз, отсутствие напряжения одной из фаз или разные значения фазных на-

пряжений на клеммных колодках. При включении на напряжение 80...110% номинального и разомкнутых токовых цепях диск индукционного счетчика не должен совершить более одного полного оборота за 10 мин, а у электронного счетчика не должны мигать индикаторы.

Схемы включения большинства счетчиков предусматривают обязательное соблюдение полярности: «начала» обмоток тока и напряжения должны подключаться со стороны питающей сети, «концы» — со стороны нагрузки. Выполнению этого требования способствуют соответствующие цифровые или буквенные обозначения выводов обмоток на колодке зажимов счетчика (встречаются обозначения «Г» — «генератор», «Н» — «нагрузка»). При включении однофазного индукционного счетчика с обратной полярностью в цепи напряжения или тока, создается отрицательный вращающий момент, вызывающий вращение диска в обратную сторону. Чтобы предотвратить возможность хищения электроэнергии таким способом, устанавливается стопор обратного хода. При изменении полярности в обеих цепях одновременно счетчик сохраняет работоспособность, но такое включение не рекомендуется. Новые типы электронных счетчиков измеряют энергию независимо от полярности. На рис. 1.12,а показана типовая схема включения однофазного индукционного счетчика, на

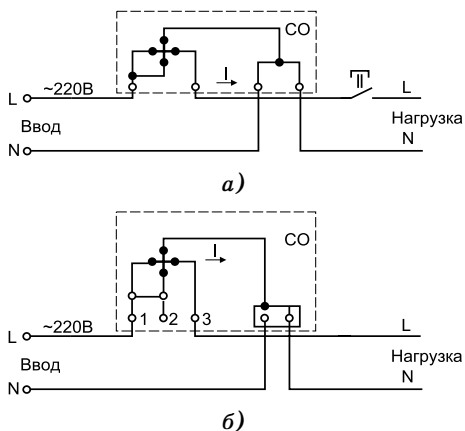


Рис. 1.12. Схема включения однофазного счетчика типа СО:  
а — типовая; б — типа СО-ЭЭ6705 (220 В, 10-40 А)

рис. 1.12,б — схема включения счетчика производства Ленинградского электромеханического завода. Счетчик имеет стопор обратного хода, все концы обмоток выведены на клеммник.

Трехфазные счетчики включаются в сеть либо непосредственно («прямоточные», на номинальный ток до 50 А), либо через трансформаторы тока. В последнем случае их называют универсальными, или трансформаторными, причем требование соблюдения полярности распространяется также и на трансформаторы тока.

Токовые цепи трехэлементного счетчика прямого включения вводятся в расщепку фазных проводов сети. Неправильная полярность одной из токовых цепей приводит к недоучету электроэнергии. Обмотки напряжения соединяются в «звезду», общая точка которой присоединяется к нулевому проводу сети. Обязательным требованием является соблюдение прямого порядка чередования фаз напряжения (А-В-С, В-С-А, С-А-В). Изменение осуществляется переключением двух проводов с одного элемента на другой.

Обмотки напряжения у трансформаторных счетчиков соединены так же, как у прямоточных. Схема подключения счетчика к сети осуществляется десятью проводами, если цепи напряжения и тока электрически разделены (рис. 1.13), или семью проводами, если соединить перемычками выводы Л1 и И1 на каждом трансформаторе тока и зажимы 1-2, 4-5 и 7-8 на счетчике. Для изменения порядка чередования фаз меняют местами три провода, питающие измерительные цепи любых двух элементов. В некоторых конструкциях семипроводная схема реализуется иным способом: перемычки не устанавливаются, а концы вторичных обмоток (И2) трансформаторов тока соединяются с концами токовых цепей

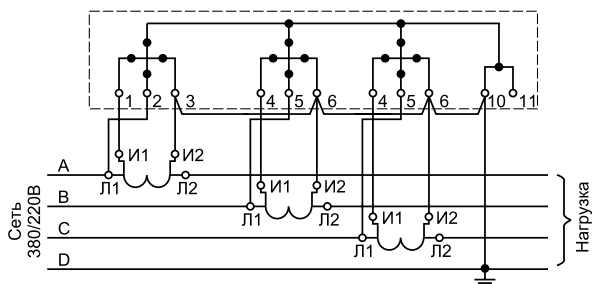


Рис. 1.13. Схема включения трехэлементного счетчика типа СА4У по десятипроводной схеме

счетчика и нулевым проводом. Удобны конструкции, снабженные испытательной коробкой: она позволяет проверить или заменить счетчик, не отключая нагрузки.

Для проверки правильности включения счетчика его показания сравнивают со значениями электроэнергии, рассчитанными по выражениям (на одну фазу):

для активной энергии  $W_a = U_\phi I t \cos\varphi$  [Вт · с],

для реактивной  $W_p = U_\phi I t \sin\varphi$  [вар · с],

где  $U_\phi$  — фазное напряжение (В),  $I$  — ток нагрузки (А),  $t$  — время наблюдения (с).

Рекомендуется, чтобы значение тока было не менее 0,1 номинального и за время  $t$  не изменялось, и, кроме того, коэффициент мощности нагрузки был не ниже 0,5. Если эти условия в режиме нормальной эксплуатации не обеспечиваются, ток в последовательной цепи создают искусственно с помощью регулируемого нагрузочного устройства или постоянного резистора, например, ТЭНа сопротивлением порядка 20 Ом, мощность 2 кВт. Метрологическая проверка счетчиков производится в специализированных лабораториях.

### 1.3.6. Измерение частоты, интервалов времени и угла сдвига фаз

#### 1.3.6.1. Измерение частоты

*Частота* — это число повторяющихся событий (колебаний) за единицу времени. Интервал времени, через который эти события регулярно повторяются, называют *периодом*. Частота ( $f$ ) и период ( $T$ ) — величины взаимно обратные:  $f = 1/T$ . Единица частоты герц (Гц) соответствует одному колебанию за 1 с. Угловая частота  $\omega$  измеряется числом радиан за 1с и связана с циклической частотой  $f$  соотношением  $\omega = 2\pi f$ ; при значении  $f = 50$  Гц (так наз. промышленная частота) угловая частота  $\omega = 314$  (рад/с или 1/с); угол 1рад =  $180/\pi = 57,3^\circ$  (град. эл. — градусы электрические).

Основными средствами частотно-временных измерений служат резонансные и цифровые частотомеры, а также осциллографы. Наиболее простым электромеханическим прибором для измерения частоты является электромагнитный резонансный частотомер. Здесь в поле электромагнита располагаются стальные пластинки с различной частотой собственных колебаний, значение которой

указано на поверхности каждой из них. Под действием переменного магнитного поля пластинки дважды за период будут притягиваться к магниту. Та пластина, частота собственных колебаний которой совпадает с двойной частотой тока, будет колебаться с наибольшей амплитудой и появится в окошке шкалы.

Электромеханические частотомеры строятся и на основе электро- или ферродинамического логометра. В них используется то обстоятельство, что индуктивное и емкостное сопротивления изменяются с частотой противоположным образом. Поэтому в цепи подвижных катушек вводятся конденсаторы и дроссели, реактивные сопротивления которых подобраны так, чтобы шкалу прибора можно было отградуировать в единицах частоты (Д596М, Д126 и др.).

Работа электронно-счетных частотомеров основана на подсчете числа импульсов измеряемой частоты за определенный интервал времени. Такие приборы обеспечивают высокую точность измерения в широком диапазоне частот. Частотомеры типа Э5034 и аналогичные позволяют измерить не только частоту в диапазоне от 0,1 Гц до 50 МГц, но и длительность (1 мкс —  $10^5$  с) импульсов и их количество ( $1-10^8$ ).

При использовании осциллографа период определяют обычно по характерным, легко отличимым точкам на кривой периодического (гармонического) сигнала — достижение амплитудного значения, переход сигнала через ось времени (т. е. через нуль) и др., а частоту — по числу переходов через нуль за одну секунду.

### 1.3.6.2. Измерение интервалов времени

При наладке часто приходится измерять небольшие *интервалы времени* в секундном и миллисекундном диапазоне, например, время срабатывания релейно- контакторных аппаратов — от момента подачи (снятия) напряжения на аппарат до замыкания или размыкания его контактов. Эту операцию обычно выполняют с помощью электромеханических секундомеров типа ПВ-53Л, П14-2М. Стрелки такого прибора приводятся в движение электромагнитом или электродвигателем, а останавливаются отключением электропривода от сети замыкающими (нормально открытыми, н.о.) контактами или шунтированием обмотки электромагнита размыкающими (нормально закрытыми, н.з.) контактами проверяемого аппарата. Чтобы не пересоединять провода при переходе от одной схемы измерения к другой, удобно ввести переключающий тумблер.

В качестве примера на рис. 1.14 приведены схемы проверки срабатывания электромагнитического аппарата — в данном случае реле переменного тока КТ — с выдержкой времени на замыкание/размыкание контактов. После подачи напряжения питания выключателем SF на схему рис. 1.14, а включается реле КТ с замыкающим контактом и начинает работать электросекундомер РТ. Когда спустя выдержку времени реле его н.з. контакт КТ.2 разомкнется, цепь питания секундомера прервется и он остановится, отсчитав установленную выдержку времени на размыкание н.з. контакта. Чтобы измерить выдержку времени на замыкание н.з. контакта, включают тумблер подготовки SB1, затем тумблер переключения режима SB2. Реле КТ отключается от сети, а секундомер РТ начинает отсчитывать выдержку времени, по истечении которой контакт КТ.1 шунтирует обмотку РТ.

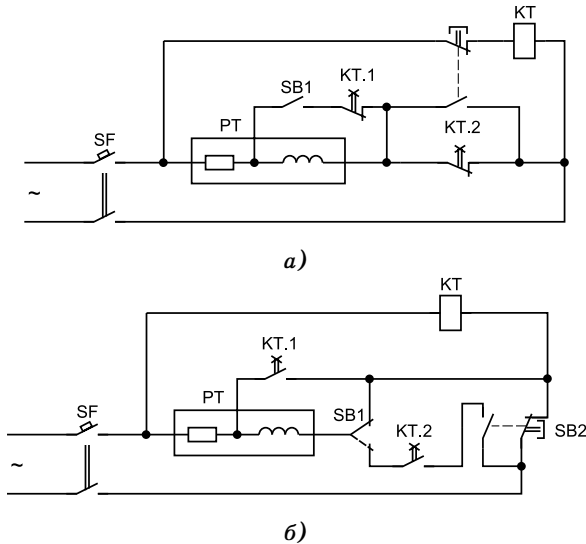


Рис. 1.14. Схема измерения времени срабатывания контактов: КТ — электромагнитное реле с задержкой на срабатывание замыкающего или размыкающего контакта; РТ — электромагнитический секундомер; SB1 — тумблер подготовки схемы к работе; SB2 — тумблер переключения схемы при измерении времени замыкания или размыкания контактов реле КТ; а — реле с размыкающим (н.з.) контактом; б — реле с замыкающим (н.о.) контактом

Схема рис. 1.14,б отражает работу замыкающего контакта реле КТ. В режиме работы с выдержкой времени *на замыкание н.о.* контакта после подачи питания включается реле КТ и запускается секундомер РТ через н.з. контакты SB2 и SB1. По истечении выдержки времени контакт Кт.1 замыкается и секундомер останавливается. Для измерения выдержки времени *на размыкание* тумблер SB1 переводится в положение, показанное пунктиром. Переключателем SB2 обесточивается реле КТ и запускается секундомер РТ. Когда выдержка времени окончится, контакты КТ.2 разорвут цепь питания секундомера.

Для измерений интервалов времени в миллисекундном диапазоне применяют электронные секундомеры (типа ЭМС-54 и т. п.), для тонких измерений — электронные (типа ЧЗ и др.), цифровые частотомеры и осциллографы. Если у используемого осциллографа отсутствует масштабная сетка горизонтальной развертки и калибрационные метки, измеряемый интервал времени сравнивают с длительностью импульсов известной частоты, например, 50 Гц.

Более широкие возможности, чем прибор ЭМС-54, имеет измеритель временных интервалов типа Ф738. Тогда как первый может измерять интервалы времени в диапазоне 5...500 мс, прибор Ф738 имеет пределы от 1 мс до 10 с и позволяет измерять не только время срабатывания контактной системы, но и разность времен срабатывания контактов реле в любой комбинации. Цифровой измеритель параметров реле Ф291 реализует те же функции, но имеет верхний предел измерения 100 с.

### 1.3.6.3. Измерение угла сдвига фаз

Определить угол сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ , а также коэффициент мощности в однофазной цепи можно косвенным методом по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра:  $\cos\varphi = P/S$ , вычислив предварительно  $S = UI$ , где  $P$  — активная,  $S$  — полная мощность. Недостатком такого метода является необходимость одновременного отчета показаний трех приборов и производства вычислений. В приборах непосредственного отчета — фазометрах часто используется электродинамический логометр, неподвижная катушка которого включается последовательно с нагрузкой, а подвижная — параллельно с ней. При надлежащем подборе параметров параллельной цепи прибора угол  $\varphi$  отклонения его подвижной части будет равен фазному углу нагрузки:  $\alpha = \varphi$ ,  $\cos\alpha = \cos\varphi$ . Шкала фазометра может быть отградуи-

рована в значениях угла  $\varphi$  или коэффициента мощности  $\cos\varphi$  (Д578, Д5000).

Другой способ измерения фазового сдвига — преобразование его во временной интервал. При этом в моменты перехода через нуль двух сравниваемых по фазе периодических сигналов вырабатываются короткие импульсы и фиксируется сдвиг во времени их поступления. Этот промежуток времени  $\Delta t$  пропорционален фазовому сдвигу  $\Delta\varphi$  между сигналами и может измеряться аналоговым, цифровым или микропроцессорным методом. Фазометры, построенные на основе микропроцессора, обеспечивают наиболее широкие функциональные возможности, позволяя измерять не только значение фазового сдвига за любой выбранный период, но и его изменение во времени, среднее значение и др.

Для измерения малых фазовых сдвигов применяются фазометры с умножением частоты. В них используются два умножителя частоты в  $n$  раз, выходные сигналы которых сдвинуты на угол  $\varphi_n = n\Delta\varphi$ . Такой угол можно измерить с большей точностью, а затем вычислить  $\Delta\varphi = \varphi_n/n$ .

На экране осциллографа фазовый сдвиг можно наблюдать непосредственно или определить с помощью так наз. фигур Лиссажу. Если на входы  $X$  и  $Y$  подать синусоидальные сигналы одинаковой частоты и подобрать масштаб изображения так, чтобы их амплитуды были равны, то на экране осциллографа появятся сравнительно простые геометрические фигуры (прямая, окружность или эллипс), по виду которых нетрудно определить сдвиг фаз между входными сигналами.

Очень удобны для практических целей вольтамперфазометры типа ВАФ-85М. Многопредельный детекторный прибор имеет класс точности 4 при измерении силы тока и напряжения переменного тока и 1,5 — при измерении угла сдвига фаз. Пределы измерения напряжения от 1 до 250 В, тока — до 10 А, угла — до  $180^\circ$ . Измерение тока на пределах 1, 5 и 10 А производится с помощью токосъемной клещевой приставки, охватывающей проводник с током и работающей как трансформатор тока. При измерении малых значений переменного тока на пределах 10, 50 и 250 мА прибор включается непосредственно в рассечку цепи измеряемого тока. Для измерения меньших значений тока можно ввести в рассечку гибкий проводник, пропущенный несколько раз через окно клещей, не забыв затем разделить полученные показания прибора на число витков в окне.



Для измерения фазы тока или напряжения служит сельсин с трехфазным ротором. На статор сельсина подается трехфазное напряжение с прямым порядком следования фаз А, В, С. Отсчет угла производится относительно вектора напряжения АВ по лимбу, механически связанному с ротором сельсина. Угол между двумя токами (напряжениями) или током и напряжением вычисляется как разность углов, отсчитанных при двух измерениях.

Поскольку прибор может измерять как напряжение и ток, так и угол сдвига между ними, он может быть использован и для определения мощности. Менее известно то, что с помощью приборов типа ВАФ можно определить направление и напряженность магнитного поля.

Вольтамперфазоиндикатор «Парма ВАФ-А» построен на современной микроэлектронной базе и позволяет измерять напряжение и силу тока, частоту, углы сдвига фаз, активную и реактивную мощность, а также определять чередование фаз в трехфазных системах. Измерение угла сдвига фаз производится относительно опорного канала. Канал содержит компараторы, которые преобразуют входной синусоидальный сигнал в прямоугольные импульсы и через оптроны передают их для дальнейшей обработки в микроконтроллер. Измерительный канал содержит два преобразователя напряжение-частота, служащих для непосредственного измерения тока и напряжения. Микроконтроллер производит программную оценку поступающих сигналов и выбор режима работы прибора. Результаты измерений выводятся на дисплей, в левой части которого индицируются значения углов, в правой — тока и напряжения. Для измерения углов сдвига фаз между током и напряжением используются опорные клещи, между напряжением и током — измерительные клещи. Результат определения порядка чередования фаз выводится в текстовом виде: «прямое чередование фаз» или «обратное чередование фаз».

Вольтамперфазоиндикатор М4185, кроме измерения напряжения, тока, частоты, мощности и углов сдвига фаз обеспечивает вычисление потребляемой энергии и коэффициента мощности, а также контроль нагрузки измерительных трансформаторов тока и напряжения. Возможно использование внешней памяти, подключение персонального компьютера, работа в диалоговом режиме.

НПП «Динамика» (г. Чебоксары) предлагает универсальный прибор нового поколения — вольтамперфазоиндикатор «РЕТО-МЕТР». Измерения полностью автоматизированы, пределы изме-

рения также выбираются автоматически. Основная погрешность прибора не более  $\pm 0,5\%$  от показаний,  $+ 0,3\%$  от предела. Диапазоны измерения напряжения от 0,01 до 600 В, переменного тока от 0,01 до 20 А, угла сдвига фаз от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , частоты от 20 до 250 Гц, сопротивления от 10 Ом до 10 кОм (в режиме «прозвонки» до 10 Ом). Кроме того, прибор осуществляет и другие функции: определение порядка чередования фаз трехфазной сети, вычисление активной мощности, определение полярности обмоток измерительных трансформаторов и электродвигателей. Масса прибора — менее 300 г.

### 1.3.7. Измерение емкости и индуктивности

Емкость нетрудно измерить методом амперметра-вольтметра, найдя реактивное сопротивление  $x_c = U/I$  по напряжению  $U$  на конденсаторе и току  $I$  через него и вычислив затем из выражения  $x_c = 1/\omega C$  значение  $C = 1/\omega x_c$ . Правда, этот расчет справедлив лишь для конденсатора без потерь, т. е. если считать сопротивление конденсатора чисто емкостным. В действительности сопротивление конденсатора содержит небольшую активную составляющую, из-за которой угол фазного сдвига между напряжением на конденсаторе и током через него отличается от  $90^\circ$  на небольшой угол  $\varphi$ . Принято характеризовать потери тангенсом этого угла  $\operatorname{tg}\varphi$ ; в большинстве случаев вполне допустимо ими пренебречь. Если все же требуется погрешность метода исключить, можно воспользоваться другим косвенным способом, измерив с помощью гальванометра заряд емкости  $Q = CU$  и вычислив затем значение  $C = Q/U$ .

Непосредственное измерение можно осуществить приборами, принцип действия которых основан на зависимости тока или напряжения от включенной в цепь емкости. Измерение емкости включается в опции цифровых и микропроцессорных приборов, мультиметров. Применяются и мосты переменного тока с питанием на фиксированной частоте 400 ... 1000 Гц. Мост балансируют путем попеременной подстройки двух его плеч, а результат считывают по лимбам переменных резисторов (пример — измеритель емкости Е8-3). Малые значения емкости (сотни, тысячи пикофарад) удобно измерять резонансным методом: неизвестная емкость включается в измерительный LC-контур, наступление резонанса фиксируется чувствительным прибором. Однако надо учесть, что на переменном токе нельзя измерять емкость полярных электро-

литических конденсаторов, так как знакопеременным напряжением конденсатор может быть поврежден.

В отличие от конденсатора, пренебрегать активными потерями в катушке с индуктивностью, как правило, недопустимо. Активное сопротивление катушки бывает одного порядка с индуктивным, а зачастую и превышает его. Только в отдельных случаях, с более или менее грубым приближением можно принимать полное сопротивление катушки равным индуктивному  $x_L = U/I = \omega L$  и считать, что  $L = U/I\omega$ .

В принципе применение метода амперметра-вольтметра может обеспечить достоверный результат, если рассчитать полное сопротивление  $z = U/I$ , измерить омметром активное сопротивление  $r$  и вычислить затем индуктивное сопротивление  $x_L = \sqrt{z^2 - r^2}$  и индуктивность  $L = x_L/\omega$ . Погрешность будет зависеть от класса точности используемых приборов, формы кривой напряжения и тем больше, чем больше отношение  $r/x_L$ .

Достаточно точные результаты можно получить путем осциллографирования тока переходного процесса в цепи с индуктивностью (рис. 1.15). С этой целью обмотку с током  $I_0$  (контакт тумблера S1 замкнут) замыкают тумблером S2 на шлейф (вибратор) осциллографа РО, сопротивление которого намного меньше ограничительного  $R_{ог}$  (рис. 1.15,а), и осциллографируется ток в образовавшейся цепи. Полученная осциллограмма позволяет определить омическое сопротивление в этой цепи по формуле  $R = U_0/I_0$ , где  $U_0$  и  $I_0$  — начальные значения напряжения и тока. Это значение можно принять за сопротивление катушки  $R_k$ , если пренебречь сопротивлением шлейфа, в противном случае последнее надо вычесть из расчетного значения  $R$ . Индуктивность  $L_k$  можно найти из выражения для постоянной времени  $\tau_k = L_k/R_k$ , откуда  $L_k = \tau_k R_k$ . Постоянную времени, в свою очередь, находят как точку  $t = \tau_k$  по кривой на рис. 1.15,б (экспонента) одним из двух способов: либо по соответствующей ей точке  $i = 0,37 I_0$  на вертикальной оси, либо с помощью касательной к кривой тока в точке  $i = I_0$ .

Для непосредственного измерения индуктивности служат мосты переменного тока. Одно из плеч такого моста содержит образцовую индуктивность, в другое вводится измеряемая индуктивность, остальные же два плеча образуются реохордом, с помощью которого производится уравнивание моста (приборы 5083, P5084).

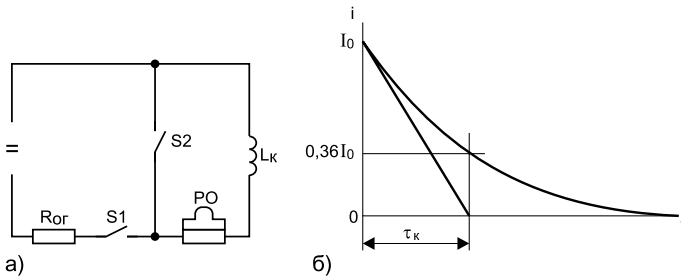


Рис. 1.15. Определение индуктивности с помощью осциллографа: а — принципиальная схема; б — кривая спада тока в цепи катушки с индуктивностью  $L_k$ ;  $R_k$  — ограничительный резистор;  $S1, S2$  — тумблеры;  $PO$  — вибратор магнитоэлектрического осциллографа

Малые индуктивности (порядка миллигенри) могут быть измерены резонансным способом. Измеряемая индуктивность  $L_x$  включается параллельно конденсатору переменной емкости  $C_0$ , снабженному шкалой, градуированной в единицах индуктивности. Изменяя емкость конденсатора, добиваются резонанса в контуре  $L_x C_0$ , о достижении которого судят по максимальным показаниям вольтметра, включенного параллельно контуру.

Используя тот или иной способ измерения, необходимо принимать во внимание особенность катушек со стальным сердечником: из-за нелинейности кривой намагничивания стали индуктивность их в значительной степени зависит от тока в обмотке, а также и от частоты переменного тока. Поэтому индуктивность катушки со стальным сердечником следует измерять при тех же значениях постоянного и переменного тока и частоты, что и в рабочем режиме.

Когда рассматривают отдельный контур или катушку с током  $i_1$ , то связь между этим током и создаваемым им магнитным потоком определяется собственной индуктивностью (коэффициентом самоиндукции)  $L_1$ . Если же вблизи данного контура расположен другой с током  $i_2$  и коэффициентом самоиндукции  $L_2$ , то создаваемый током  $i_2$  магнитный поток будет пронизывать не только свой, но частично и первый контур. Точно такое же влияние будет оказывать и первый контур на второй; такие контура называются индуктивно- или магнитносвязанными. Связь между током в одном контуре и создаваемым им потоком в другом характеризуется *взаимной индуктивностью*  $M$ , которая, как и собственная индуктивность  $L$ , измеряется в генри (Г).

Если катушки соединить последовательно согласно, то индуктивность цепи будет  $L_c = L_1 + L_2 + 2M$ , а если встречно, то  $L_b = L_1 + L_2 - 2M$ . По одному из способов экспериментального определения взаимной индуктивности  $M$  измеряют ЭДС  $E = \omega MI$ , наведенную (индуктированную) в какой-либо из магнитно связанных катушек током  $I$  в другой, и находят  $M = E / \omega I$ . По второму способу определяют индуктивности  $L_c$  и  $L_b$  и вычисляют взаимную индуктивность  $M = (L_c - L_b) / 4$ . Надо только иметь в виду, что при слабой магнитной связи между катушками этот способ может дать большую погрешность, поскольку результат зависит от разности двух близких значений. Повышение точности можно достичь резонансным методом, согласно которому индуктивность  $M$  включают последовательно с регулируемой емкостью  $C$ , добиваются наступления резонанса и тогда из уравнения  $\omega M = 1 / \omega C$  находят  $M = 1 / \omega^2 C$ . Недостаток метода заключается в трудности подбора конденсатора переменной емкости в нужном диапазоне.

В настоящее время ряд фирм выпускает многофункциональные цифровые приборы, позволяющие измерить активное сопротивление (в том числе по четырехпроводной схеме), индуктивность, емкость, тангенс угла потерь и др., например, лабораторный LCR-метр AM-3002 («АКТАКОМ»).

### 1.3.8. Измерение магнитных величин

В приборах для измерения характеристик постоянных и переменных магнитных полей магнитные величины преобразуются в электрические с помощью измерительной катушки, витки которой сцепляются с магнитным потоком. Плоскость катушки располагается при этом перпендикулярно вектору магнитной индукции или напряженности магнитного поля. Если измерительная катушка предназначена для измерения магнитного поля внутри образца, витки ее должны плотно охватывать образец. Катушка для измерения магнитного поля на поверхности образца должна быть прямоугольного сечения и располагаться так, чтобы ее ось совпадала с вектором напряженности магнитного поля.

#### 1.3.8.1. Измерение постоянного магнитного потока

Специальный измерительный прибор — веберметр — представляет собой магнитоэлектрический гальванометр с пренебрежимо малым противодействующим моментом. Рамка гальванометра будет перемещаться до тех пор, пока по ней протекает ток. Чтобы со-

здать импульс тока, вводят измерительную катушку в магнитное поле или, наоборот, создают магнитное поле при заранее введенной катушке. Ток во вторичной цепи рамки, замкнутой на измерительную катушку, будет зависеть от скорости изменения магнитного потока, а угол отклонения рамки веберметра будет пропорционален значению потока. Шкала веберметра градуируется а единицах магнитного потока, он прост и удобен в работе. Основным недостатком его является относительно низкая чувствительность.

На рис. 1.16 показано подключение плоской измерительной катушки к веберметру, а на рис. 1.17 — применение гальванометра для измерения магнитного потока в сердечнике (измерительная катушка в положении *a*) и магнитной индукции в воздушном зазоре сердечника (положение *б*).

Более высокую чувствительность имеет баллистический гальванометр. Присоединенный к контуру, охватывающему магнитный поток, он измерит количество электричества в импульсе тока, возникающего при изменении потока. Изменение потока  $\Phi$  можно осуществить удалением катушки из магнитного поля или изменением напряженности поля. При этом, аналогично измерению количества электричества, будет соблюдаться равенство

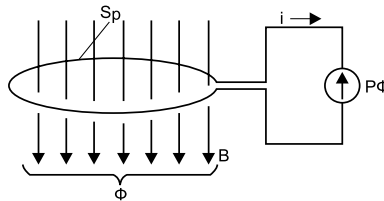


Рис. 1.16. К принципу измерения магнитного ( $\Phi$ ) потока веберметром ( $P\Phi$ )

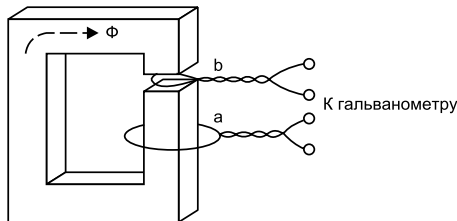


Рис. 1.17. Измерение магнитного потока (*a*) и магнитной индукции (*б*)

$$C_{\phi} \alpha_m = \Phi,$$

где  $C_{\phi}$  — баллистическая постоянная (в веберах на деление шкалы).

Но надо иметь в виду, что эта зависимость справедлива лишь при условии, что длительность импульса тока весьма мала по сравнению с периодом собственных колебаний подвижной части гальванометра. Основной недостаток способа состоит в том, что баллистическая постоянная зависит от сопротивления внешней цепи и ее приходится определять опытным путем.

### 1.3.8.2. Измерение переменного магнитного потока

Измерить переменный магнитный поток, например, в сердечнике трансформатора, значительно легче, чем постоянный, так как его не нужно принудительно изменять. Если ток в первичной обмотке имеет синусоидальную форму, то, как известно из электротехники, ЭДС вторичной обмотки также будет синусоидальна и пропорциональна потоку. Если же форма первичного тока резко отличается от синусоиды, напряжение вторичной обмотки снимают через фильтр. При этом активное сопротивление RC-фильтра должно быть значительно больше емкостного сопротивления конденсатора и выходного сопротивления трансформатора. В этом случае можно считать, что ток в конденсаторе пропорционален вторичной ЭДС, а напряжение на конденсаторе пропорционально потоку.

### 1.3.8.3. Применение преобразователя Холла

Преобразователь (датчик) Холла представляет собой специальную полупроводниковую пластинку в форме параллелепипеда. Если такую пластинку поместить в магнитное поле напряженностью  $H$ , проходящее через пару противоположных боковых граней, и через верхнюю и нижнюю (на рис. 1.18) грани пропустить постоянный ток  $I$ , то на другой паре боковых граней возникнет ЭДС  $E_x$ ,

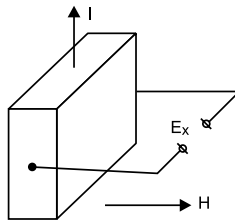


Рис. 1.18. К возникновению эффекта Холла

которая при неизменном значении возбуждающего тока будет пропорциональна индукции магнитного поля. К примеру, при токе  $I = 0,1$  А и индукции  $B = 1$  Т ЭДС Холла получается около  $E = 60$  мВ. Преимуществами датчика Холла являются его малые размеры (порядка нескольких миллиметров) и безынерционность.

Датчик Холла содержат, например, токовые клещи серий АТА и АТК (фирма «АКТАКОМ»). Первые дешевле, но требуют применения наружных измерительных приборов — вольтметра или мультиметра, вторые же имеют встроенный жидкокристаллический индикатор и позволяют измерять, кроме силы тока, также напряжение и активное сопротивление (АТК-2102), мощность (АТК-2200), сопротивление заземления (АТК-4001) и др.

### 1.4. Осциллографирование

В практике электрических измерений возникает необходимость фиксировать параметры не только стационарных, установившихся величин, но и переменных, изменяющихся во времени. С целью автоматической регистрации переменных параметров применяются самопишущие приборы (или просто *самописцы*), которые позволяют определять текущее значение измеряемой величины в любой момент времени и характер ее изменения, а также связь между несколькими параметрами (с помощью многоканальных приборов). У самописцев, предназначенных для регистрации медленно протекающих процессов, пишущий узел совмещен с показывающим. Применяют самопишущие приборы с записью чернилами, точечной, искровой, оптической (фотографической), термической, ультрафиолетовой, магнитной записью. Обычные самописцы позволяют вести запись процессов с частотным диапазоном до 1 Гц, приборы с повышенным быстродействием — до 150 Гц.

*Осциллограф* (от лат. «осциллум» — колебание и греч. «граф» — пишу) — прибор, предназначенный для наблюдения и регистрации быстро протекающих процессов, чаще всего — электрических величин, изменяющихся во времени периодически или по произвольному закону. Приборы, служащие только для наблюдения, иногда называют *осциллоскопами*. Осциллографы различаются по устройству, принципу действия и способу запоминания (регистрации).



### 1.4.1. Светолучевые осциллографы

Светолучевые (иначе — электромеханические, магнитоэлектрические или шлейфовые) осциллографы относятся к числу приборов с оптической записью. Основными узлами их являются: вибратор (шлейф), оптическая система и устройство для визуального наблюдения или фотографирования контролируемых процессов.

Обычный вибратор представляет собой магнитоэлектрический гальванометр специальной конструкции. На рис. 1.19 изображена упрощенная схема механической и оптической части светолучевого осциллографа.

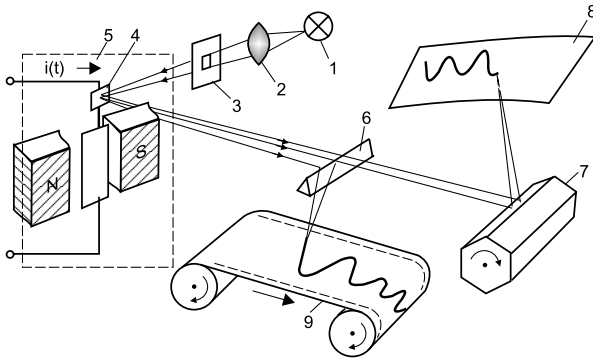


Рис. 1.19. Схема устройства светолучевого осциллографа

Луч света от лампы 1 проходит через конденсорную линзу 2, диафрагму 3 и попадает на зеркальце 4 гальванометра 5. Отраженный луч, пройдя через трехгранную призму 6, направляется частью к многогранному зеркальному барабану 7 и от него на матовый стеклянный экран 8, а частично — на фоточувствительную бумагу (или фотопленку) 9. Зеркальце приклеено к одновитковой петле из упругого металла, например, фосфористой бронзы. Петля подвешена на растяжках и расположена в узком межполюсном пространстве постоянного магнита, а ее нижний конец закреплен неподвижно. Когда по петле пропускают электрический ток, она поворачивается вокруг вертикальной оси на угол, пропорциональный мгновенному значению тока  $i(t)$ , т. е. совершает колебания в соответствии с законом изменения тока.

При неподвижном барабане 7 (фотопленке 9) на экране 8 будет видна световая полоса (на проявленной фотопленке — черная).

Если же барабан привести во вращение, на экране появится кривая колебательного процесса - *осциллограмма*. Перемещение светового пятна вдоль экрана, пропорциональное времени, называется *разверткой*. После подхода пятна к правому краю экрана 8 луч попадает на следующую грань вращающегося барабана 7, и пятно появляется вновь на левом краю экрана. Изображение на экране будет неподвижным, если произведение числа граней зеркального барабана на его частоту вращения будет равно или кратно частоте входного сигнала. Чтобы можно было наблюдать колебания различной частоты, частота вращения барабана должна изменяться в широких пределах. Это достигается обычно с помощью регулируемого электропривода постоянного тока. Если в составе электропривода барабана имеется синхронный серводвигатель, то при осциллографировании процессов сетевой частоты синхронизация осуществляется автоматически.

Вибраторы светолучевых осциллографов называют еще гальванометрами — вставками, т. к. они не имеют собственных магнитных систем, а вставляются в отверстия общей магнитной системы. В одном осциллографе может быть от 3 таких вставок до нескольких десятков, что позволяет одновременно наблюдать и регистрировать соответствующее количество процессов. Длина рамки гальванометра составляет примерно 10—15 мм, ширина 0,3—0,4 мм, площадь зеркала — около 0,5 мм<sup>2</sup>, толщина — десятые доли миллиметра, поэтому подвижная часть гальванометра менее инерционна, чем у электромеханических самописцев. Максимальная частота регистрируемых сигналов ограничивается инерционностью гальванометров и скоростью развертки и не превышает 30 кГц.

Вращающий момент, действующий на рамку и пропорциональный току в ней, уравнивается тормозящим и противодействующим моментами, первый из которых пропорционален угловой скорости перемещения рамки, второй — углу закручивания растяжек. Амплитуда колебаний подвижной части гальванометра зависит от степени успокоения  $\beta$  и отношения  $q$  частоты тока к частоте свободных (недемпфированных) колебаний подвижной части гальванометра. Амплитудная погрешность гальванометра стремится к нулю при значениях  $q \rightarrow 0$ . Наименьшую амплитудную погрешность в диапазоне от 0 до 0,5 $q$  имеют гальванометры со степенью успокоения  $\beta = 0,6 - 0,7$ , поэтому гальванометр выбирают с учетом значения  $q$  (как правило,  $q = 0,3 - 0,4$ ). Конструктивно успокоение обеспечивается либо магнитоиндукционным спосо-

бом, либо подвижная часть помещается в специальную вязкую жидкость. Для того чтобы гальванометр с жидкостным успокоением не попал в переуспокоенный режим, минимальное значение внешнего сопротивления ограничивается. Собственная частота гальванометра (при  $\beta = 0$ ) колеблется в пределах от 20 Гц до 30 кГц. В справочных данных приводятся также значения статической чувствительности гальванометра, мм/мА (обычно при определенной длине светового луча: 300 мм, 1м), максимального рабочего тока в мА и некоторые другие параметры.

Недостатками светолучевых осциллографов являются малая чувствительность, низкое входное сопротивление и сравнительно узкий частотный диапазон, а также необходимость обработки фотопленки при оптической записи.

### 1.4.2. Электронно-лучевые осциллографы (электронные, или катодные)

#### 1.4.2.1. Назначение и классификация

По назначению и принципу действия осциллографы могут быть общего назначения, универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные.

Моноблочные осциллографы *общего назначения* получили наиболее широкое распространение и применяются для регистрации низкочастотных и импульсных сигналов. Полоса пропускания — до 100 МГц, диапазон амплитуд входных сигналов — от единиц милливольт до сотен вольт.

*Универсальные* осциллографы — многофункциональные приборы, содержащие сменные блоки и предназначенные для регистрации гармонических и импульсных сигналов. Полоса пропускания — до сотен мегагерц, амплитуда сигналов — от десятков микровольт до сотен вольт.

*Скоростные* осциллографы предназначены для наблюдения и регистрации импульсных и периодических сигналов в полосе частот порядка гигагерц.

*Стробоскопические* осциллографы предназначены для регистрации повторяющихся сигналов частотой до нескольких мегагерц с амплитудой от единиц милливольт до нескольких вольт. Используются при проверке динамических параметров полупроводниковых приборов и импульсных схем в увеличенном масштабе време-

ни, позволяющем соответственно увеличить полосу пропускания частотного спектра.

*Запоминающие* осциллографы предназначены для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов. Полоса пропускания их - до нескольких гигагерц, скорость записи до 4000 км/с, значения сигналов десятки милливольт — сотни вольт, время сохранения записи от нескольких минут (при включенном осциллографе) до нескольких суток и более (при выключенном осциллографе).

*Специальные* осциллографы предназначены для исследования телевизионных сигналов.

Электронные осциллографы имеют ряд достоинств по сравнению со светолучевыми: высокое быстродействие, дающее возможность наблюдать высокочастотные (до  $10^3$  МГц) периодические сигналы и кратковременные (до  $10^{-10}$  с) однократные импульсы; малое потребление мощности от источника наблюдаемого сигнала (большое входное сопротивление); высокая чувствительность; широкая универсальность. Электронно — лучевые осциллографы получили свое наименование в связи с тем, что пишущим элементом здесь служит электронный луч — фокусированный пучок электронов, излучаемых особой электронно — оптической системой — «электронной пушкой» (ЭП). На рис. 1.20 представлена функциональная схема электронного осциллографа, выполненного на основе *электронно — лучевой трубки* (ЭЛТ).

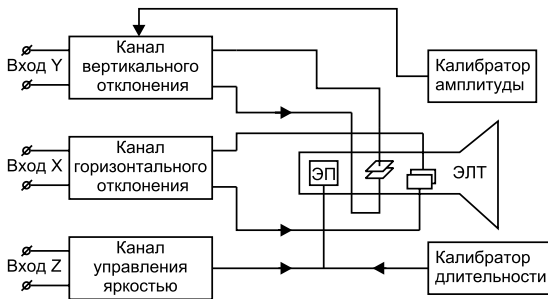


Рис. 1.20. Функциональная схема универсального электронного осциллографа

### 1.4.2.2. Основные узлы осциллографа

Электронно — лучевая трубка. Простейшая однолучевая ЭЛТ представляет собой стеклянный баллон, в котором расположены электронная пушка и отклоняющая система. Внутренняя торцевая поверхность расширенного конца баллона (экран) покрыта люминофором, который светится в тех местах, куда попадают излучаемые ЭП электроны. Яркость свечения зависит от световой отдачи люминофора и энергии пучка электронов. Для регистрации быстропротекающих процессов и коротких однократных импульсов требуется увеличивать интенсивность пучка (яркость). Однако надо иметь в виду, что при попадании электронного пучка на люминофор выделяется не только свет, но и тепло, из-за чего слишком большая интенсивность пучка в течение продолжительного времени может ухудшить световую отдачу люминофора и даже прожечь его. Каждый люминофор дает свечение определенного цвета. Человеческий глаз обладает максимальной чувствительностью к желто — зеленому излучению.

После прекращения электронной бомбардировки кристаллы люминофора возвращаются в исходное энергетическое состояние и свечение постепенно затухает; это явление называется *послесвечением*. Длительность послесвечения зависит от свойств люминофора. При наблюдении процессов с частотой менее 10 Гц используют экраны с послесвечением продолжительностью до 100 мс. Для фоторегистрации более предпочтителен люминофор с малым (0,01 с) послесвечением, а при осциллографировании медленно меняющихся и однократных процессов применяют трубки с длительным временем послесвечения экрана — от 0,1 с до нескольких секунд. Специальные запоминающие трубки позволяют сохранить изображение на время от нескольких минут до нескольких суток.

*Отклоняющая система* ЭЛТ состоит из двух пар пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и называемых пластинами (электродами) вертикального или горизонтального отклонения — «Y» или «X» соответственно. Сфокусированный электронный луч проходит между пластинами и отклоняется под действием электрического поля к пластине с положительным потенциалом. При отсутствии напряжения на отклоняющих пластинах пучок электронов образует на экране светящуюся точку, а если к какой — либо паре пластин приложить напряжение, то луч прочертит светящуюся прямую линию, длина которой будет пропорциональна значению напряжения. Обе пары пластин отклоня-

ют луч во взаимно перпендикулярных направлениях, которые можно рассматривать как координатные оси, причем горизонтальному направлению  $X$  соответствует ось времени, а вертикальному  $Y$  — ось мгновенных значений входного сигнала. Отклонение  $I_T$  луча на экране трубки, вызванное напряжением  $U_T$  на отклоняющих пластинах, характеризуется чувствительностью  $S_T = I_T / U_T$ ; обычно  $S_T = 0,5 - 5$  мм/В. Чувствительность максимальна на низких частотах напряжения  $U_T$  и с ростом частоты падает. Верхняя граница полосы пропускания трубки определяется снижением чувствительности на 30% и составляет  $10^8 - 10^9$  МГц. В паспортах и справочниках часто приводят значение величины, обратной чувствительности и называемой *коэффициентом отклонения*.

Развертка. Контролируемое напряжение  $u(t)$  подается на вход  $Y$  канала вертикального отклонения. Если при этом напряжение на другой паре пластин отсутствует, то электронный луч вычертит на экране вертикальную линию. Чтобы можно было наблюдать кривую изменения напряжения  $u(t)$  во времени, необходимо «растянуть» (развернуть) изображение вдоль оси времени  $t$ . С этой целью на вход  $X$  канала горизонтального отклонения подают напряжение, линейно изменяющееся во времени. Когда это напряжение имеет минимальное значение, электронный луч находится у левого края экрана ЭЛТ. При увеличении напряжения луч перемещается по экрану слева направо (прямой ход луча) с постоянной скоростью, поскольку синхронно нарастает отклоняющее его напряжение. Как только светящееся пятно достигает правого края экрана, напряжение снижается скачком до начального значения и пятно быстро возвращается в крайнее левое положение (обратный ход); далее процесс повторяется. Для того, чтобы в продолжение обратного хода луча изображение не вычерчивалось, на это время луч гасится. Напряжение, обеспечивающее перемещение электронного луча ЭЛТ по заданной траектории, называется развертывающим, а сам процесс — *разверткой*. Развертывающее напряжение  $u_p(t)$ , обеспечивающее непрерывное периодическое перемещение луча вдоль горизонтальной оси ЭЛТ с постоянной скоростью, имеет пилообразную форму (рис. 1.21).

Если продолжительность одного полного горизонтального перемещения луча (период развертывающего напряжения  $T_p$ ), будет равна периоду  $T$  входного напряжения  $u(t)$ , т. е.  $T_p = T$ , на экране получится неподвижное изображение одного периода входного сигнала. Если же период развертки увеличить в  $n$  раз ( $T_p = nT$ ), то

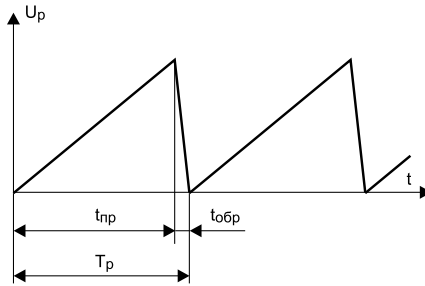


Рис. 1.21. Форма напряжения линейной временно́й развертки:  
 $t_{пр}$  — время прямого хода луча;  $t_{обр}$  — время обратного хода луча;  
 $T_p$  — период развертывающего напряжения  $u_p$

неподвижная кривая на экране будет содержать  $n$  периодов, где  $n$  — целое число:  $n = 1, 2, 3...$  Чтобы рационально использовать рабочую площадь экрана при наблюдении периодических процессов, можно ограничиться двумя — тремя периодами. Для получения полного периода входного напряжения время обратного хода луча  $t_{обр}$  должно быть намного меньше времени прямого хода  $t_{пр}$ , в идеализированном варианте принимается  $t_{обр} = 0$ . Получение осциллограмм посредством линейной развертки поясняется рис. 1.22.

Линейную автоколебательную (непрерывную) развертку применяют при осциллографировании непрерывных периодических процессов, а также импульсных с небольшой скважностью. Но с

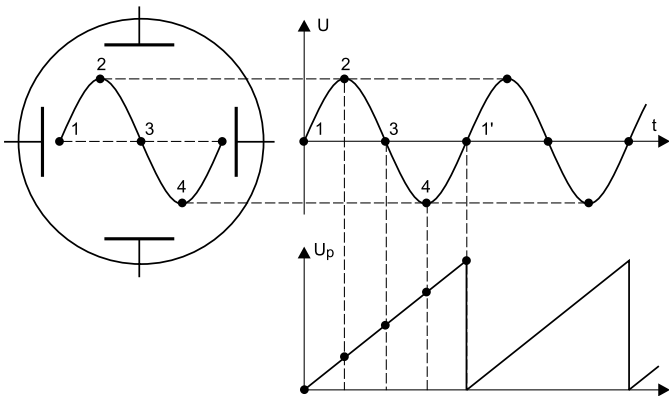


Рис. 1.22. Получение осциллограммы при линейной развертке

помощью такой развертки трудно наблюдать непериодические сигналы и особенно — короткие импульсы, так как при этом изображение занимает лишь малую часть экрана. В этом случае применяют так наз. *ждущую* развертку, позволяющую получить изображение почти во всю ширину экрана. Здесь пилообразный импульс подается только с поступлением входного импульса. Луч ЭЛТ, совершив один цикл прямого и обратного хода, ожидает разрешения на новый цикл развертки.

При точных измерениях временных интервалов, частоты сигналов, фазовых сдвигов и некоторых других, когда требуется возможно большая длина развертки, применяются *круговая* и *спиральная* развертки, названные так по форме траектории луча ЭЛТ. Длина круговой развертки  $l_p \approx 3d$ , спиральной  $l_p \approx 3md$ , где  $d$  — диаметр экрана,  $m$  — число витков спирали. Такие развертки получаются при подаче на обе пары пластин ЭЛТ синусоидальных напряжений одинаковой частоты. При произвольном сдвиге фаз между этими напряжениями получается эллиптическая развертка, при угле  $90^\circ$  — круговая; при разных частотах формируются фигуры Лиссажу. Развертывающее напряжение получают от встроенного генератора, внешнего источника или от контролируемого сигнала. Наиболее часто применяется линейная развертка, создаваемая пилообразным напряжением генератора.

Каналы осциллографа. *Канал вертикального отклонения луча* (канал Y) содержит аттенуатор (входной делитель напряжения) и широкополосный усилитель вертикального отклонения. Основное назначение канала заключается в следующем:

- обеспечение необходимого уровня усиления (ослабления) входного сигнала, при котором изображение на экране удобно для наблюдения и измерения;
- согласование входного сопротивления осциллографа (50 или 75 Ом) с волновым сопротивлением коаксиального кабеля на входе канала;
- задержка поступления контролируемого импульса на пластины вертикального отклонения по отношению к развертывающему напряжению.

Во всех осциллографах происходит запаздывание начала развертки вследствие инерционности блока синхронизации, усилителя и генератора развертки. Но если развертывающее напряжение поступит на пластины позже, чем контролируемый импульс, нача-



льная часть импульса не будет развернута на экране. Чтобы можно было наблюдать весь импульс, в канал вертикального отклонения вводят *линию задержки*, обеспечивающую поступление наблюдаемого сигнала позже начала развертки, например, на 0,2—0,3 мкс при запаздывании развертки на 0,1 мкс. В низкочастотных осциллографах, предназначенных для наблюдения непрерывных периодических процессов, линия задержки может отсутствовать.

Вход канала может быть *открытым* или *закрытым* (с разделительным конденсатором на входе): при открытом входе возможно прохождение как переменного, так и постоянного тока, при закрытом — только переменного. Обозначаются эти входы либо в виде узла схемы (с конденсатором или без него), либо посредством символов « $\cong$ » или « $\leftarrow$ » (открытый вход) и « $\sim$ » (закрытый вход), либо начальными буквами DC, AC/DC (открытый) и AC (закрытый) английских слов direct current (постоянный ток) и alternating current (переменный ток).

*Аттенюатором* (делителем напряжения) устанавливается допустимое значение входного напряжения и обеспечивается высокое входное сопротивление канала (порядка 1 МОм); входная емкость составляет десятки пикофард, для высокочастотных осциллографов — единицы пикофард. Деление входного напряжения осуществляется резистивно — емкостным делителем в отношениях 1 : 1; 1 : 2... 1 : 2000. Иногда осциллограф снабжается дополнительным выносным делителем с коэффициентом деления 1 : 10 или 1 : 100. Применение такого делителя позволяет увеличить коэффициент деления и входное сопротивление прибора и уменьшить входную емкость. Переключатель для выбора коэффициента деления размещается на передней панели прибора, а цифры на шкале делителя указывают значения коэффициента отклонения в см/В или см/дел.

Усилитель позволяет повысить чувствительность канала и наблюдать слабые сигналы. Коэффициент усиления усилителя падает с ростом частоты, на высоких частотах — на порядок (по напряжению) с изменением частоты на одну декаду. Это надо иметь в виду при выборе *полосы пропускания* частот.

Амплитудно — частотная характеристика показывает, как уменьшается коэффициент усиления канала с возрастанием частоты сигнала. Верхняя граница полосы пропускания представляет собой наибольшую частоту, при которой коэффициент усиления уменьшается до 70,7% от значения его на постоянном токе (или

при низкой частоте), т. е. падает на 3 дБ:  $20 \lg 0,707 = 20 (-0,15) = -3$  дБ. Ширина полосы пропускания обычно отсчитывается от нулевой частоты и, таким образом, определяется верхней граничной частотой. Осциллограф с широкой полосой пропускания принимает больше шумов, что вынуждает снижать чувствительность, и наоборот, у высокочувствительных приборов полосу пропускания приходится сужать.

На высоких частотах и особенно в импульсной технике приходится считаться также с быстродействием усилителя. Оно характеризуется откликом усилителя на ступенчатое входное воздействие, показывающим искажение идеального прямоугольного импульса при прохождении его через усилитель. Основным параметром оценки является *время нарастания* фронта импульса от 0,1 до 0,9 установившегося максимального значения. Время нарастания усилителя вертикального отклонения показывает, насколько точно будет воспроизводиться форма импульса. Искажениями можно пренебречь, если время нарастания для усилителя меньше  $1/5$  времени нарастания регистрируемого импульса. Установившееся значение может достигаться после нескольких затухающих колебаний около этого значения. В этом случае быстродействие характеризуется еще *временем установления* — интервалом изменения выходного сигнала от 0,1 установившегося значения до вхождения в область, где отклонение от установившегося значения не превышает заданного, например,  $\pm 5\%$ . У скоростных осциллографов усилитель в канале вертикального отклонения отсутствует.

*Канал горизонтального отклонения луча* служит для создания развертывающего напряжения или для передачи на вертикальные пластины сигнала, подводимого к входу X. Основным блоком канала является генератор развертки. Для получения неподвижного изображения начало развертки должно быть жестко связано с определенной точкой сигнала. Такую привязку называют *синхронизацией* в непрерывном режиме развертки и *запуском* — в ждущем режиме. Синхронизация достигается путем настройки генератора развертки таким образом, чтобы частота ее была равна или в целое число раз меньше частоты сигнала.

Синхронизация и запуск развертки производятся специальным синхроимпульсом. При *внутренней* синхронизации синхроимпульсы вырабатываются из усиленного входного сигнала, при *внешней* — подаются от внешнего источника на специальный вход X

осциллографа. Выбор того или иного режима синхронизации производится посредством переключателей.

Чувствительность и полоса пропускания данного канала примерно вдвое меньше, чем у канала вертикального отклонения.

*Канал управления яркостью* пятна на экране ЭЛТ предназначен для подсветки прямого хода луча. В ряде осциллографов имеется вход  $Z$ , соединенный с управляющим электродом ЭЛТ — модулятором  $M$ . На вход  $Z$  подается прямоугольный импульс, длительность которого совпадает с длительностью прямого хода луча развертки. Задавая уровень напряжения модулятора, можно изменять (модулировать) яркость изображения на экране. Это позволяет, в частности, отмечать характерные точки на изображении, подавая импульсы на вход  $Z$  в необходимые моменты времени (например, при переходе кривой через нулевое значение, достижении амплитуды и др.), что, в свою очередь, определяет удобство и целесообразность применения осциллографа для измерений частоты и фазы электрических величин.

*Калибратор амплитуды и длительности* — генератор периодического напряжения с известными амплитудой и частотой, позволяющий контролировать и устанавливать масштаб вертикальной (коэффициент отклонения) и горизонтальной (коэффициент развертки) осей экрана осциллографа. Калибратор выдает напряжение прямоугольной формы с фиксированными значениями размаха и частоты.

*Коэффициент отклонения* представляет собой отношение напряжения калиброванного сигнала к отклонению луча по вертикали, т. е. параметр, обратный чувствительности осциллографа к напряжению. У наиболее распространенных осциллографов его значение находится обычно в диапазоне от 50 мкВ/дел до 10 В/дел. Сравнивая амплитуды калиброванного и исследуемого сигналов, можно измерять напряжение последнего.

*Коэффициент развертки (длительность развертки)* — время, за которое электронный луч пробегает одно деление шкалы на экране ЭЛТ в горизонтальном направлении, т. е. параметр, обратный скорости перемещения луча по оси  $X$ . Среднее значение коэффициента развертки находится в пределах 0,01 мкс/дел — 0,05 с/дел.

По периоду калибровочного импульса можно проверить или установить нормированное значение коэффициента развертки. Модуляция яркости изображения вызывает проявление на экране ярких пятен через определенные промежутки времени. По чередо-

ванию светлых и темных участков (меток времени) можно определить длительность наблюдаемого сигнала.

*Многоканальные осциллографы.* В ряде случаев возникает необходимость одновременно наблюдать и регистрировать характеристики двух или нескольких электрических процессов, например, определять сдвиг фаз, сравнивать кривые входного и выходного напряжений усилителей, импульсных схем и т. п. С этой целью применяются многолучевые (преимущественно двухлучевые) и обычные однолучевые осциллографы, снабженные специальным электронным коммутатором.

*Двухлучевой осциллограф* отличается наличием особой ЭЛТ, которая имеет два отдельных вертикальных канала, две или одну общую системы разверток и представляет собой как бы две однолучевых трубки с общим экраном. Независимая система позволяет использовать разную скорость развертки для двух каналов, но при этом возрастают габариты осциллографа. Калибратор амплитуды и длительности обычно выполняется общим для обоих лучей. Двух- и тем более многолучевой осциллограф является достаточно сложным и дорогим прибором.

*Двухканальный осциллограф* имеет обычную однолучевую трубку и одноканальный усилитель вертикального отклонения. Два отдельных входных устройства поочередно подключаются к усилителю с помощью электронного коммутатора. Как правило, сами коммутаторы входные сигналы не усиливают.

В общем случае предусматриваются четыре режима работы каналов: одноканальный, чередования (попеременного доступа), прерывания и сложения каналов. В режиме попеременного доступа коммутатор меняет каналы через один цикл горизонтальной развертки. Если при этом длительность развертки значительно меньше времени послесвечения люминофора, а частота переключений больше 16—20 Гц, то благодаря инерции человеческого зрения на экране будет одновременно наблюдаться изображение двух процессов. Для трубок со средним послесвечением частота переключений не должна быть меньше 50—100 Гц, иначе становится заметным поочередное мелькание осциллограмм. Этот режим непригоден для наблюдения сигналов очень низкой частоты.

При алгебраическом сложении оба канала одновременно работают на общую нагрузку.

На аналогичных принципах строятся и осциллографы с большим числом каналов (до 8). Получают распространение трехкана-

льные приборы, дополнительный канал которых предназначен для наблюдения сигнала внешней синхронизации.

Двухканальные осциллографы имеют ряд преимуществ перед двухлучевыми. Сравнение амплитуд двух входных напряжений двухканальным осциллографом возможно со значительно большей точностью, чем двухлучевым, так как исключаются ошибки из-за неидентичности усилителей вертикального отклонения и лучевых каналов. При временно'м сравнении двух сигналов также достигается более высокая точность, так как обе осциллограммы имеют одинаковую базу времени.

Вместе с тем двухканальным осциллографам присущи и известные недостатки:

- яркость изображения сигнала вдвое ниже по сравнению с аналогичными двухлучевыми приборами;
- ограничена возможность регистрации однократных и нестационарных процессов;
- отсутствует возможность наблюдения сигналов в двух масштабах времени.

### 1.4.2.3. Измерение электрических величин и характеристик

**Измерение напряжений.** При измерении амплитуды и временных параметров сигнала удобно производить отсчет непосредственно по шкале на экране осциллографа. Шкалу предварительно калибруют по чувствительности и длительности развертки с помощью встроенного калибратора. Измерения производят по масштабной сетке, наложенной на экран. Расстояние между крайними сторонами обычно размечается линиями на сантиметры или делениями и рисками — на миллиметры, например, на 6 делений по вертикали и 10 по горизонтали.

С выхода делителя калибратора напряжение поступает на вход канала вертикального отклонения для калибровки его чувствительности. Коэффициенты деления напряжений этого канала и калибратора изменяются одновременно общим переключателем так, что в любом его положении общий коэффициент деления остается неизменным. Если, например, значение последнего равно 100, а размах прямоугольного напряжения калибратора 100 В, то на вход усилителя вертикального отклонения всегда будет подводиться менадр напряжения с размахом 1 В, что значительно упрощает и калибровку чувствительности, и собственно измерение.

Выбрав период развертки равным половине периода меандра, можно наблюдать на экране ЭЛТ две горизонтальные линии, соответствующие нулевому и максимальному значениям импульса. Изменяя коэффициент усиления и перемещая изображение по вертикали, совмещают эти линии с границами масштабной сетки, установив тем самым номинальное значение коэффициента отклонения канала. Так, например, при размахе калибровочного напряжения 1 В и расстоянии между горизонтальными границами 6 см номинальный коэффициент отклонения канала будет  $1/6 = 0,167$  В/см. Для измерения амплитуды добиваются с помощью входного делителя (аттенюатора), чтобы размер изображения был возможно ближе к границам масштабной сетки, сохраняя при этом положение регулятора усиления вертикального канала неизменным. Фактический, расчетный коэффициент отклонения определяется с учетом установленного коэффициента деления аттенюатора: если, например, последний оказался равным  $1/2$ , то при номинальном значении  $1/6$  расчетный коэффициент отклонения будет  $1/6 : 1/2 = 1/3 = 0,333$ . Когда деление масштабной сетки оказывается меньше 1 см, размерность коэффициента отклонения указывается в В/дел, например,  $1/6 = 0,167$  В/дел при 6-ти делениях по 0,6 см каждое (расстояние 3,6 см).

Перед измерением необходимо сбалансировать усилитель вертикального отклонения, а именно, установить такой режим работы усилителя, при котором достигается устойчивость изображения на экране ЭЛТ. Балансировка производится в следующем порядке:

- включают осциллограф в сеть и прогревают его;
- ручкой смещения луча по вертикали устанавливают линию развертки по горизонтали, проходящей через центр экрана;
- с помощью ручек регуляторов баланса и усиления добиваются, чтобы положение линии развертки не изменялось (не смещалось по вертикали) при изменении положения ручек переключателя чувствительности или плавной регулировки усиления. Балансировка усилителя должна периодически проверяться и в процессе эксплуатации.

Выполнив калибровку и балансировку усилителя вертикального отклонения, подают на вход контролируемый сигнал и измеряют его размах по вертикали. Амплитуда сигнала определяется как произведение измеренного значения на чувствительность, установленную по шкале «В/см», «В/дел» (или «В/дел», «В/дел») пере-

ключателя входного делителя. Пусть, например, измеренный размах изображения составляет 3,4 см, а переключатель чувствительности установлен на отметку 5 В/см, тогда амплитуда сигнала будет  $3,4 \times 5 = 19$  В.

Большое входное сопротивление электронного осциллографа позволяет измерять напряжение источников с высоким внутренним сопротивлением. Возможность осциллографирования быстропеременных процессов ограничивается, в основном, собственной емкостью отклоняющих пластин и подводящих проводов или входной емкостью усилителя. Погрешность измерения составляет обычно 5—10% из-за нестабильности коэффициента усиления входного усилителя и нелинейности его амплитудной характеристики, неточности калибровки чувствительности, влияния размеров пятна на экране ЭЛТ.

**Измерение времени.** Временные параметры электрических сигналов также измеряются методом непосредственного отсчета, который производится по оси времени с помощью калиброванной развертки. Градуировочная характеристика оси времени определяется коэффициентом развертки в единицах ВРЕМЯ/см или ВРЕМЯ/дел (мкс/см, мс/дел). Различные значения этого параметра задаются фиксированным положением переключателя длительности развертки. Длительность развертки регулируют так, чтобы как можно больше растянуть изображение в горизонтальном направлении. Для определения *длительности* сигнала измеряют по масштабной сетке длину наблюдаемого участка изображения и умножают ее на коэффициент развертки. Так, например, если на экране участок кривой занимает 2,4 деления по горизонтали, а переключатель установлен в положении 5 мс/дел, то длительность будет  $2,4 \times 5 = 12$  мс.

С помощью калиброванной развертки нетрудно измерить и *частоту* периодических колебаний. С этой целью измеряют период колебаний  $T$  и вычисляют затем частоту по формуле  $f = 1/T$ .

При любой длительности развертки число периодов сигнала на экране зависит от его частоты. Так, если длина шкалы на экране составляет 10 см, коэффициент развертки 0,1 мс, то длительность ее будет  $0,1 \times 10 = 1$  мс, частота 1 кГц и, следовательно, вдоль всей шкалы разместится 5 периодов сигнала частотой 5 кГц, 4 периода — 4 кГц и т. д. Чтобы в таких случаях рассмотреть отдельные участки осциллограммы более подробно, достаточно увеличить частоту развертки.

Пример. Получена осциллограмма с 5-ю периодами колебаний на длине 8,25 см при коэффициенте развертки 0,2 мс/см. Это расстояние луч проходит за время  $8,25 \times 0,2 = 1,65$  мс, а расстояние, соответствующее одному периоду, за время  $1,65 : 5 = 0,33$  мс и, следовательно, частота равна  $1/0,33 = 3$  кГц. Тот же результат получился бы для одинаковых цифровых данных приведенного примера при градуировке шкалы в делениях.

**Измерение фазы.** *Фазный сдвиг* между двумя сигналами измеряют как интервал времени  $t$  при скорости развертки, обеспечивающей удобство отсчета (рис. 1.23). Соответствующее значение фазного сдвига в градусах эл. рассчитывают как  $\varphi = 360 t/T$ .

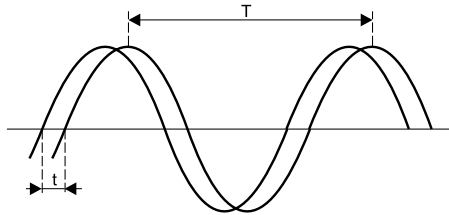


Рис. 1.23. Измерение фазного сдвига между периодическими сигналами

В более совершенных приборах вместо калибраторов применяются встроенные цифровые вольтметры, измерители интервалов времени и частоты. Результаты измерений высвечиваются либо на цифровом дисплее, либо на экране ЭЛТ в буквенно — цифровой форме. Для измерения длительности импульса, форма которого близка к прямоугольной, его подают на вход  $Y$  осциллографа, а линейно изменяющееся напряжение развертки  $u_p(t)$  с помощью компараторов сравнивается с заранее заданными напряжениями постоянного тока  $U_1$  и  $U_2$  (рис. 1.24,а). Выходные импульсы компараторов, возникающие в момент сравнения, поступают в формирователь импульса меток  $U_{\text{фм}}$  (рис. 1.24,б) и далее — на управляющий электрод ЭЛТ. В моменты поступления импульсов яркость свечения увеличивается и на изображении входного импульса возникают яркие метки, между которыми и измеряется интервал времени  $\Delta t$  (рис. 1.24,б,в). В данном примере значения напряжений  $U_1$  и  $U_2$  выбраны так, чтобы метки оказались на уровне 0,5 амплитуды импульса. При измерении длительности фронта импульса эти значения выбирают обычно соответствующими уровням 0,1 и 0,9 амплитуды. Аналогичным способом мож-



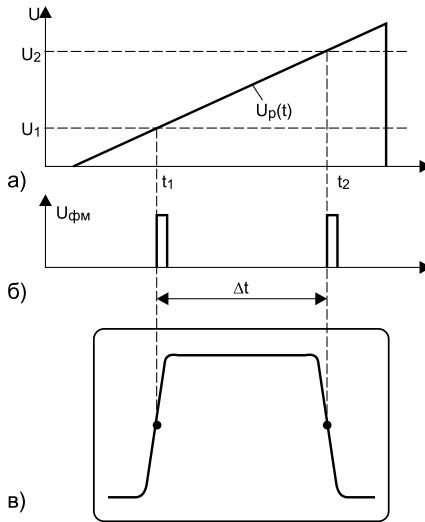


Рис. 1.24. Измерение длительности импульса с помощью яркостных меток

но измерить и амплитуду напряжения, если это напряжение запомнить и подать на один из компараторов, а на другом установить 0: тогда интервал времени  $\Delta t$  будет пропорционален значению амплитуды.

Частоту и фазу можно измерить также с помощью фигур Лиссажу, но это сложнее, менее наглядно и в практике наладочных работ применяется достаточно редко.

**Снятие нелинейных характеристик.** С помощью осциллографа удобно наблюдать и регистрировать вольт-амперные характеристики нелинейных элементов. В качестве примера на рис. 1.25 приведена схема измерения выходных коллекторных характеристик транзистора  $i_k(U_k)$ .

На эмиттер транзистора VT подается отрицательное напряжение  $U_э$ , на коллектор — периодическое пилообразное напряжение развертки осциллографа  $U_p$ . Подав напряжение  $U_p$  на вход X, а падение напряжения от коллекторного тока  $R I_k$  — с резистора R на вход Y, можно наблюдать на экране кривую вольт-амперной характеристики транзистора при данном значении напряжения  $U_э = \text{const}$ , а при изменении его значений — семейство коллек-

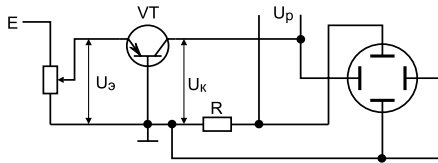


Рис. 1.25. Схема измерения вольт-амперных характеристик транзистора

торных характеристик прибора. По аналогичной схеме снимается вольт-амперная характеристика диода.

На рис. 1.26 показана принципиальная схема осциллографирования гистерезисных кривых ферромагнитного материала. На образец в форме тороида наложены две обмотки  $w_1$  и  $w_2$ . Через обмотку  $w_1$  пропускается ток  $I_1$ , обмотка  $w_2$  нагружена на интегрирующую цепь RC. Падение напряжения  $I_1 R_0$ , пропорциональное напряженности  $H$  магнитного поля образца, подается на вход X осциллографа, а на вход Y — напряжение с выхода интегрирующей цепи. Как известно, ЭДС трансформатора пропорциональна производной магнитной индукции и, следовательно, с некоторыми допущениями можно принять, что напряжение на выходе интегрирующей цепи будет пропорционально значению магнитной индукции  $B$ . Таким образом, электронный луч будет периодически вычерчивать на экране ЭЛТ изображение зависимости  $B(H)$  в виде петли гистерезиса.

Электронно-лучевой осциллограф можно также использовать для определения составляющих комплексного сопротивления, как анализатор спектра частот и др., но при наладке прибегают к этим способам крайне редко.

**Погрешности измерений. Статическая погрешность.** В конечном счете измерение как амплитудных, так и временных параметров сводится к измерению длин отрезков прямых. А поскольку иска-

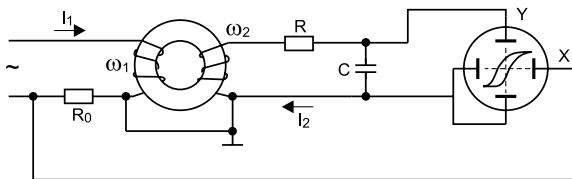


Рис. 1.26. Схема осциллографирования петли гистерезиса

жения линейных параметров изображения на экране ЭЛТ линейно зависят от значения входной величины, от этого последнего зависит также и абсолютная погрешность измерения. Пределы допустимых относительных погрешностей каналов Y и X, называемые погрешностями коэффициентов отклонения, характеризуют статическую (или низкочастотную) точность воспроизведения сигналов, например,  $\delta_y = \pm 3\%$  и  $\delta_x = \pm 2\%$ .

*Динамическая погрешность.* Динамическая погрешность возникает при осциллографировании быстро изменяющихся или высокочастотных сигналов. К основным характеристикам осциллографа, определяющим динамическую погрешность, относятся: амплитудно—частотная характеристика и значение верхней границы полосы пропускания частот по каналам X и Y; время нарастания и время установления.

*Погрешность взаимодействия.* Погрешность взаимодействия осциллографа с источником сигнала определяется соотношением выходного сопротивления источника и входного сопротивления измерительной цепи, в которую входят собственно прибор и соединительный кабель. Погрешность тем меньше, чем больше входное сопротивление этой цепи.

Соединительные кабели делятся на активные и пассивные. Активные кабели содержат усилитель, который позволяет резко повысить их сопротивление. Пассивные кабели могут быть без деления (уменьшения) сигнала и с делением (1: 10, 1: 100).

Пассивный кабель без деления сигнала представляет собой отрезок экранированного коаксиального кабеля с разъемом для подключения к осциллографу на одном конце и щупами — на другом. Сопротивление такого кабеля обусловлено распределенной электрической емкостью, составляющей примерно 50—100 пФ/м. Следовательно, общая входная емкость измерительной цепи  $C_{вх}$  складывается из емкостей кабеля  $C_k$  и усилителя  $C_y$  прибора, а общее входное сопротивление  $Z_{вх1}$  обусловлено параллельным соединением емкости  $C_{вх}$  (точнее, соответствующего емкостного сопротивления) и активного сопротивления входного усилителя  $R_y$ . Чем меньше будет емкость  $C_{вх}$  и больше сопротивление  $R_y$ , тем больше будет значение  $Z_{вх1}$ , меньше погрешность взаимодействия и шире полоса пропускания частот.

Пассивные кабели с делением сигнала содержат дополнительную внутреннюю активно — емкостную цепь (резистор и конденсатор) с комплексным сопротивлением  $Z_{вн}$ , которое включается

последовательно с сопротивлением  $Z_{\text{вх}1}$ . Оба эти сопротивления образуют плечи делителя с общим сопротивлением  $Z_{\text{вх}2} > Z_{\text{вх}1}$ . Такое соединение обеспечивает увеличение входного сопротивления, уменьшение входной емкости и расширение полосы частот. В итоге улучшаются динамические характеристики, но снижается чувствительность измерения. Погрешность взаимодействия на постоянном токе (при низкой частоте) пропорциональна отношению сопротивления  $R_{\text{и}}$  источника сигнала к входному сопротивлению  $R_{\text{вх}}$  измерительной цепи, на переменном — добавляется составляющая, пропорциональная произведению  $R_{\text{и}}^2 C_{\text{вх}}^2$ .

*Погрешность отсчета (субъективная)* обусловлена интерполяцией и параллаксом. Каждую из составляющих можно оценить в зависимости от цены деления  $\alpha$  шкалы или сетки осциллографа как  $0,1\alpha$ . Если сетка нанесена и на внешней, и на внутренней поверхностях защитного стекла, погрешностью от параллакса можно пренебречь. В режиме цифрового отсчета погрешность считывания отсутствует. При расчете предельной общей статической погрешности инструментальную и субъективную составляющие суммируют.

### 1.4.3. Цифровые осциллографы

#### 1.4.3.1. Общие сведения

В современной практике осциллографирования предпочтение отдается цифровым регистраторам. По конструкции они имеют много общего с цифровыми измерительными приборами, но, предназначенные для регистрации переменных параметров, отличаются более высокими показателями быстродействия и памяти, а также большей точностью измерения параметров сигнала. Последнее объясняется тем, что измерение производится непосредственно на входе цифрового осциллографа, тогда как при прохождении сигнала через канал вертикального отклонения электронного осциллографа вносится существенная ошибка. Информация, хранящаяся в памяти осциллографа, может быть выведена на печать. Сочетание цифрового осциллографа с микропроцессором позволяет определять действующее или среднее значение сигнала и даже отображать на экране преобразование Фурье (представление несинусоидального периодического сигнала в виде суммы гармонических составляющих, или гармоник, — синусоидальных сигналов основной частоты и кратных ей; выполняется при помощи

специального алгоритма цифровой обработки сигнала, называемого «быстрым преобразованием Фурье»).

Поступающий на вход аналоговый сигнал обрабатывается (усиливается или ослабляется, фильтруется и т. п.), затем производится его квантование и дискретизация. Под термином *дискретизация* обыкновенно понимают замену текущего времени отдельными его значениями, а под *квантованием* — замену бесконечного числа значений непрерывного сигнала конечным числом его мгновенных значений (цифровых кодов), соответствующих выбранным при дискретизации моментам времени. Такая замена называется *аналого — цифровым преобразованием* (АЦП). Результаты АЦП хранятся в запоминающем устройстве.

Наиболее часто применяется равномерная дискретизация, при которой интервал времени между соседними отсчетами (*шаг дискретизации*) остается постоянным в продолжение *интервала регистрации*. Значение шага  $T_d$ , или частоты дискретизации  $F_d = 1/T_d$ , может задаваться пользователем. Если, например, задан шаг дискретизации  $T_d = 50$  мкс, то частота должна быть  $F_d = 20$  кГц. Чем меньше шаг, т. е. чем больше частота дискретизации, тем точнее будет воспроизводиться непрерывный сигнал посредством АЦП, но при этом быстрее будет заполняться память.

Чтобы не повышать чрезмерно частоту, прибегают к способу так наз. *эквивалентной дискретизации*, сущность которого заключается в следующем. Если, не изменяя частоты, сместить точки дискретизации (или *выборки*) на некоторый промежуток времени, например, на полшага, то число таких точек удвоится, а если выполнить три прохода развертки, то это число увеличится в три раза и т. д. Обычно выполняется от 10 до 40 проходов. Для восстановления непрерывного сигнала в графическом виде часто применяется точечный способ, дающий удовлетворительное изображение при разрешающей способности экрана 2 точки/мм и выше.

Интервал регистрации начинается с *запуска*. Внутренний запуск может производиться по заданному моменту времени, по определенным параметрам входного сигнала или скорости их изменения, а также по сочетанию этих признаков, например: время 08:00, амплитуда не ниже 150 В, скорость изменения более 0,1 В/с. Окончание интервала также может быть задано по времени (или/и другим условиям), но в этом случае необходимо убедиться, что память не будет переполнена. Максимальная длительность интервала регистрации определяется соотношением  $T_p =$

$T_d V_M$ , где  $V_M$  — максимальный объем памяти. Если, к примеру, выбран шаг дискретизации  $T_d = 1$  мс при объеме памяти  $V_M = 1000$  слов, то интервал регистрации не должен быть больше 1 с, иначе дальнейшая информация (свыше 1000 слов) не будет зарегистрирована.

Специфической особенностью цифровых осциллографов, в отличие от аналоговых, является возможность предзапуска и послезапуска. Режим *предзапуска* позволяет записать входной сигнал в период, непосредственно предшествующий моменту запуска, и выявить, например, причины возникновения аварийной ситуации. Полученные цифровые данные о сигнале хранятся в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Глубина (длительность) предзапуска задается либо в единицах времени, либо в процентах объема ОЗУ. В режиме *послезапуска* интересующая наблюдателя часть сигнала записывается спустя некоторое время после момента запуска, что позволяет избежать загрузки памяти излишними данными.

Помимо графического изображения, можно вызвать на экран числовые характеристики сигнала, измерить период периодического сигнала, амплитуду и длительность фронта импульса и др. Точность таких измерений, определяемая работой канала АЦП, довольно высока: предельные относительные погрешности составляют обычно (0,1...1,0)%. Обеспечивается также возможность растяжки изображения сигнала по одной или обоим осям, что позволяет рассмотреть интересующий оператора участок осциллограммы в увеличенном масштабе.

В ряде случаев требуется получать данные обработки осциллограмм одновременно с их получением — в так называемом режиме *реального времени* (on-line, онлайн), например в случае управления реальными процессами. В практике осциллографирования чаще всего отсутствует необходимость срочной обработки входных данных, и тогда она проводится в режиме *нереального, относительного времени*.

Среди разного рода цифровых регистраторов следует отметить еще так называемые мини-логгеры — миниатюрные, сравнительно простые и дешевые, но тем не менее в большинстве случаев пригодные для целей электрических измерений. Накопленные в них цифровые данные по окончании измерений передаются в компьютер для наблюдения и обработки.

1.4.3.2. Быстродействующий самописец НИОКИ (Япония)

**Краткое описание.** Самописец выполняет четыре функции измерения и в зависимости от модели предусматривает два вида входа — аналоговый и логический. Функции осциллографа с памятью и высокоскоростного самописца позволяют точно измерять параметры различных быстропеременных процессов, в частности, переходных процессов. Функции записи в режиме реального времени и непрерывной записи в координатных осях XY (с запоминанием) позволяют вести регистрацию в режиме реального времени.

Для каждого канала можно выбрать один из трех способов запуска: внутренний, внешний или ручной. Предусмотрена также задержка по времени — всего четыре варианта запуска. С помощью фильтра логического входного сигнала можно устанавливать условия запуска для каждого канала. Аналоговые входы изолированы и защищены, так что каждый входной сигнал может быть привязан к независимому нулевому потенциалу. Функция FFT («быстрое преобразование Фурье») позволяет получить частотный спектр сигнала.

Блок-схема самописца показана на рис. 1.27. Входной сигнал поступает с одного из каналов CH1...CH3 на измерительное устройство 1 и аналоговый запуск 2. Всей работой системы управ-

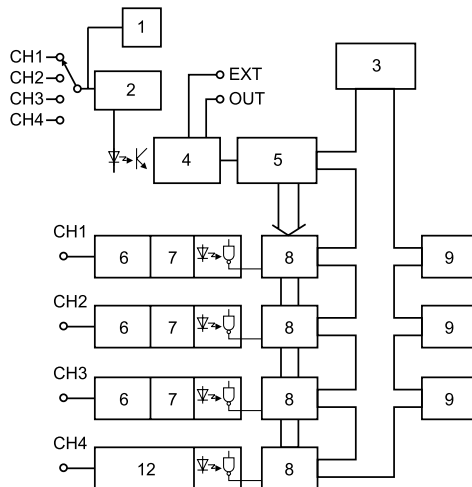


Рис. 1.27. Блок-схема самописца НИОКИ

ляет микропроцессор 3. Пусковой сигнал через оптронную пару поступает на схему запуска цифровых цепей 4 и далее в блок управления памятью 5. Каждый канал содержит входной усилитель 6 и высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь 7. Дискретная информация через оптронную пару передается в оперативную память 8; для каждого канала используется отдельный источник питания, и потому вход самописца электрически изолирован от запоминающего устройства. Данные, хранимые в памяти, могут быть выданы на устройства печати 9 или индикации 10 по командам с операционной панели 11. Когда используется внутренний запуск, входной сигнал сравнивается с опорным напряжением с помощью компаратора 12.

При осуществлении аналого-цифрового преобразования важно правильно выбрать шаг дискретизации, иначе при восстановлении непрерывного сигнала может быть допущена существенная ошибка. Так, если сигнал имеет синусоидальную форму, шаг дискретизации должен быть значительно меньше, чем период сигнала. На рис. 1.28 показан случай, когда шаг дискретизации  $T_d$  превышает период изменения реального сигнала 1, в результате чего после цифро-аналогового преобразования («восстановления») получается синусоидальный сигнал 2 с периодом в пять (!) раз больше реального.

Чтобы при воспроизведении синусоидального сигнала не допустить его искажения и не пропустить амплитудное значение, выполняется 25 шагов за период. Возможные варианты запуска и записи с задержкой показаны на рис. 1.29.

Предусматривается и самодиагностика прибора. Память ПЗУ и ОЗУ проверяется включением питания при нажатой кнопке Стоп. Результат проверки индицируется светодиодами. Имеется отдельная кнопка проверки светодиодов и памяти: если она нажата, то при включении питания все индикаторы загораются один за другим, после чего проверяются ПЗУ и ОЗУ.

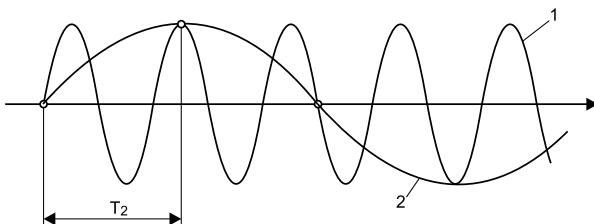


Рис. 1.28. Пример ошибочного представления непрерывного сигнала



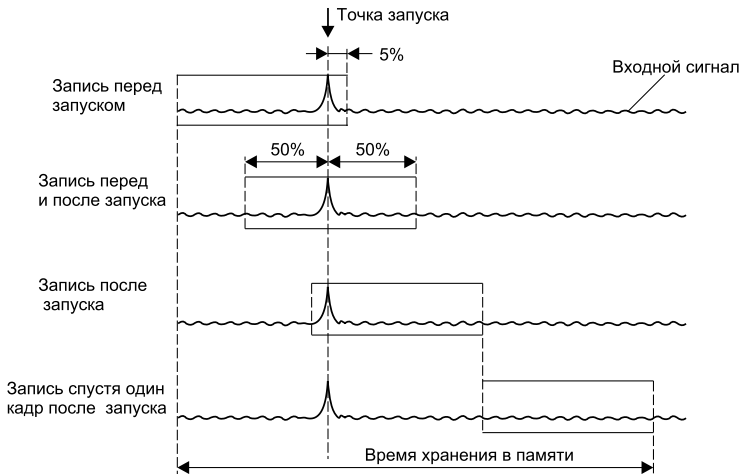


Рис. 1.29. Задержка по времени при запуске и записи сигнала

Когда ни одна кнопка не нажата, то при подаче питания проверяется сохранение установленных параметров. В случае неисправности диоды несколько раз мигнут, а затем самописец перейдет в режим ожидания.

Для проверки печати печатается тест изображения.

Прилагается перечень возможных неисправностей, их причин и способов устранения.

Основные технические данные.

- Функции: запись в реальном времени; высокоскоростная запись с памятью; запись в осях XY (фигуры Лиссажу) для быстропеременных процессов и высокоскоростная запись длительно протекающих процессов; анализатор FFT.
- Число каналов ..... до 4 аналоговых и до 16 логических;
- Емкость памяти ..... 8 бит x 8к слов/канал;
- Цена деления ..... ок. 9 мм (25 точек);
- Потребляемая мощность от сети ..... 30 Вт (в нормальном режиме).

Аналоговый вход.

- Пределы измерений ..... от 10 мВ/дел до 5В/дел;
- Частота ..... от 0 до 100 кГц;
- Входное сопротивление ..... 1 МОм;

— Входное напряжение .....  $\cong 100$  В.

Запись

— Масштаб оси времени ..... от 1 до 50 с/дел и от 1 до 50 мин/дел;

— Разрешающая способность по оси времени ..... 1/50 дел.;

— Частота дискретизации ..... от 2,5 до 10 кГц.

Запись с памятью

— Масштаб оси времени ..... от 100 мкс/дел до 5 с/дел;

— Разрешающая способность по оси времени ..... от 10 мкс до 500 мкс;

— Частота дискретизации ..... от 250 кГц до 1 Гц (устанавливается автоматически в зависимости от предела шкалы времени).

Высокоскоростная запись в координатах XY

— Время записи ..... от 2 мс до 800 с (от 20 до 160 дел).

Данные сохраняются в памяти даже после исчезновения питания, но ввести их вновь можно только после восстановления питания. Содержание памяти может быть утрачено, если прибор длительное время не использовался.

Пример работы самописца с памятью. Измерение напряжения срабатывания реле и времени замыкания контактов.

Время/дел — 0,5 мс/дел;

Кадр — 40 дел;

Источник запуска — внутренний;

Задержка записи — до и после запуска;

Фронт запуска — по спадающему фронту;

Уровень запуска — порядка 50%;

Масштаб измерений — 2 В/дел;

Пуск — нажать «старт» и ожидать сигнала запуска; когда реле обесточится и контакты сработают, запускается запись;

Останов — нажать «стоп» для остановки записи.

При выполнении этих операций могут быть измерены напряжение, приложенное к реле, и время срабатывания контактов. При измерении времени отключения подсчитывается число делений между точками изменения двух сигналов (отключение напряжения и размыкание контактов) и определяется интервал времени из соотношения:

Число делений  $\times$  время/дел = время срабатывания.

### 1.4.3.3. Промышленный осциллограф Fluke 123/124

Этот портативный цифровой осциллограф (рис. 1.30) лишь незначительно превышает по габаритам и массе обычный цифровой мультиметр и особенно удобен для оперативных целей при производстве наладочных работ, не уступая при этом по своим возможностям стационарным регистрирующим приборам. Его габариты  $232 \times 115 \times 50$  мм, масса 1,2 кг (с блоком аккумуляторов); сравнительно небольшие размеры экрана ( $72 \times 72$  мм) компенсируются тем, что изображение можно «растягивать», выбирая наиболее интересные для пользователя фрагменты осциллограммы. Питание — от сети переменного тока (через адаптер) или от внутреннего источника — блока аккумуляторов; потребляемая мощность — около 5 Вт.

Основные технические данные. Осциллограф с двумя входами.

Вертикальная ось

Частота .....от 0 (постоянный ток) до 40 МГц

Входное сопротивление, без датчиков.... 1 МОм

Чувствительность ..... от 5 мВ/дел до 500 В/дел

Погрешность изображения .....  $\pm(1\% + 0,05 \text{ цены дел.})$

Горизонтальная ось

Режимы работы: обычный, однократная регистрация,  
медленная развертка

Масштаб: Однократная регистрация ... от 1 мкс до 5 с на дел.

Медленная развертка ..... от 1 с до 60 с на дел.

Частота дискретизации:

эквивалентная..... до 1,25 ГГц/с

в реальном масштабе времени... до 25 МГц/с

Запуск

Режим развертки ..... автоколебательный, ждущий

Чувствительность,

при частоте: до 5 МГц .....0,5 дел. или 0,5/5 мВ

(Fluke 123/124) 25 МГц ..... 1,5 дел.

40 МГц ..... 4/1,5 дел.

Измеритель с двумя входами

На экране должно отображаться больше одного периода осциллограммы.

Вход А, В

Напряжение постоянного тока

Пределы измерений .....от 0,5 до 1250 В

Показание на полную шкалу ..... 5000 ед. счета

Частота ..... от 1 Гц до 50(70) МГц

Вход А

Сопrotивление постоянному току

Пределы измерений ..... от 0,5 Ом до 30 МОм

Проверка диодов

Измерение емкости

Пределы измерений ..... от 50 нФ до 500 мкФ

Основные особенности прибора

Экран состоит из трех областей: верхняя — показания, средняя — осциллограммы, нижняя — меню. Перемещение по пунктам меню осуществляется с помощью клавиш.

В верхней части прибора расположены *измерительные разъемы* с тремя входными гнездами А, В и СОМ. Гнездо А можно использовать для измерений одиночного входного сигнала. Гнездо В используется совместно с гнездом А для измерений двух разных сигналов. Общее гнездо СОМ используется для заземления, при измерении сопротивления или емкости и др.

При *измерении* сопротивления, емкости, тестировании диодов используются экранированный провод от входа А и неэкранированный заземляющий провод от общего входа СОМ. Чтобы измерить частоту сигнала на входе А, следует выделить пункт Hz. После подтверждения выбора частота сигнала становится главным показанием и отображается крупным шрифтом, а предыдущее показание смещается ниже и отображается более мелкими цифрами. При измерении пиковых значений сигнала включается вход В и в меню этого входа выделяется пункт PEAK. В любой момент изображение на экране (все показания и осциллограммы) можно зафиксировать нажатием клавиши, а повторным ее нажатием возобновить измерения. Отклонение измеряемой величины от заданного значения удобно отслеживать с использованием функции относительных измерений в меню входа А.



Рис. 1.30. Общий вид цифрового осциллографа Fluke 123/124

*Настройка изображения* (положение осциллограммы, масштаб по осям напряжения и времени, параметры запуска развертки) может производиться вручную или автоматически. При нажатии клавиши (AUTO) включается автоматический режим, при повторном нажатии осуществляется возврат к ручному режиму работы. В нижней строке экрана отображается масштаб по осям напряжения и времени для обоих входов, а также информация о параметрах запуска развертки. При работе в автоматическом режиме можно изменить масштаб вручную.

Форма кривой входного сигнала часто подвергается искажению под действием помех, шумов. Для подавления шумов без уменьшения полосы пропускания служит режим *сглаживания осциллограммы*. С этой целью во входном меню открывается подменю опций экрана и выделяется пункт SMOOTH (сглаживание). Если выделить пункт ENVELOPE, на экране можно будет увидеть *оглабляющие* осциллограммы. Эти кривые дают представление об истинной форме сигнала и позволяют отслеживать изменение его параметров в течение длительных промежутков времени.

В режиме построения *графика* численных значений может отображаться минимальное, максимальное и усредненное показание. При отображении усредненного показания отметка даты и времени непрерывно обновляется.

**Регистрация осциллограммы.** *Однократная регистрация* осциллограммы позволяет получить информацию об отдельных событиях. При этом содержимое экрана обновляется один раз. Запуск развертки и завершение однократной регистрации сопровождается появлением соответствующих надписей в нижней части экрана.

Режим *медленной регистрации* обеспечивает запись низкочастотных сигналов в течение длительного периода времени. После запуска развертки осциллограмма будет перемещаться по экрану справа налево, как на обычном диаграммном самописце. Во время записи измерения не производятся.

В режиме *сопряжения по переменному току* отслеживают слабый сигнал переменного тока, наложенный на сигнал постоянного тока.

**Запуск регистрации.** Устанавливаются *уровень и фронт* запуска развертки. Для ускорения работы используется клавиша ускоренной настройки. При этом параметры запуска развертки задаются автоматически. Оптимальные значения этих параметров можно установить вручную.

Для запуска развертки от внешнего источника и изоляции прибора от входного сигнала используется измеритель с оптической развязкой (*изолированный запуск*). Строка, изображение которой требуется детально просмотреть, определяется по ее номеру.

**Сохранение и вызов настройки и экрана.** Содержимое экрана, а также параметры настройки прибора можно сохранить или вызвать из памяти. В каждой ячейке памяти можно *сохранить* текущее содержимое одного экрана и соответствующую настройку. После выполнения необходимых команд прибор возвращается в обычный режим регистрации сигналов. При *вызове* из памяти на экране появится сохраненная в ячейке осциллограмма с настройкой. С этого момента можно анализировать осциллограмму или распечатывать содержимое экрана. Можно *удалить* из памяти содержимое всех сохраненных экранов или только одного экрана с соответствующей настройкой.

**Проведение измерений с помощью курсоров.** В модификации 124 имеются курсоры, позволяющие снимать точные численные показания как с текущей, так и с сохраненной осциллограмм. С целью измерения амплитуды, максимального и минимального значений, а также выбросов сигнала на экран вызываются два курсора в виде *горизонтальных линий*. Выделяют верхний курсор и перемещают его в требуемое положение, затем так же устанавливают нижний курсор в другое положение. Тогда на экране появятся цифры, отображающие напряжение на уровне каждого курсора по отношению к нулевой отметке, например, +3 В и -1 В, и разность этих напряжений, т. е. 4 В.

Для измерения временных интервалов на экран вызывают два *вертикальных* курсора, выделяют их и перемещают в требуемые положения. На экране точки пересечения курсоров с осциллограммой отмечаются маркерами и высвечиваются цифры, отражающие разницу во времени между курсорами и разность напряжений между маркерами. Если между курсорами заключен ровно один период сигнала, то отображается также частота сигнала.

При измерениях *времени нарастания* сигнала используются два горизонтальных курсора, жестко связанных с маркерами. Когда верхний курсор находится на уровне 100% высоты осциллограммы, маркер будет находиться на высоте 90%. Нижний курсор перемещают на нулевой уровень сигнала, и тогда маркер будет находиться на высоте 10%. Теперь на экране будет отображено время нарастания сигнала от уровня 10% до 90% высоты осциллограм-

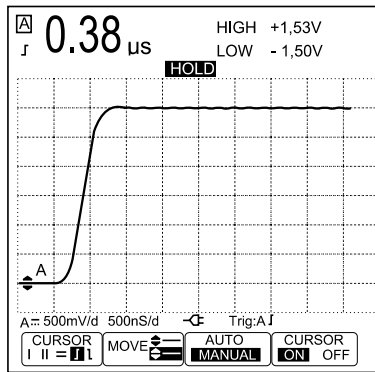


Рис. 1.31. Вид экрана осциллографа Fluke при измерении времени нарастания и напряжения сигнала

мы, а также напряжение на уровне каждого курсора по отношению к нулевой отметке. В примере на рис. 1.31 показаны результаты измерения этих параметров: время нарастания 0,38 мкс, верхний уровень напряжения (HIGH) +1,53 В, нижний (LOW) –1,5 В при масштабах времени 500 нс/дел и напряжения 500 мВ/дел.

Для измерений в цепях с высоким внутренним сопротивлением в комплект Fluke 124 введен датчик с ослаблением сигналов 10:1, создающий значительно меньшую нагрузку на цепь, чем экранированный измерительный провод.

Чтобы получить печатную копию текущего изображения на экране, следует использовать кабели с адаптером для подключения последовательного или параллельного принтера к оптическому порту прибора.

## 1.5. Организация измерений

### 1.5.1. Подготовка работ

Каждый вид измерений требует надлежащей подготовки как инструментальной базы, так и наладочного персонала. Проведение измерений персоналом, не имеющим достаточной подготовки и опыта работы с измерительными приборами, может привести к выходу их из строя или неправильным результатам.

Приступая к работе, необходимо знать рабочие значения измеряемой величины и возможный диапазон их изменения, а также вы-

брать наиболее рациональный способ и схему измерения. При этом нередко возникает противоречие между техническими требованиями и трудоемкостью их выполнения, требующее компромиссного решения. Так, например, сложность измерения высокого напряжения испытательной установки вынуждает в большинстве случаев производить измерение на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора, что связано с получением известной погрешности. После выбора определенного способа измерения следует составить схему включения приборов, вспомогательных устройств и произвести приблизительный расчет их параметров, например, сопротивления и мощности резисторов делителей напряжения.

Перед измерением следует четко установить, какие требования предъявляются к точности результатов. Так, измерение сопротивления таких элементов, как шунты, секции обмоток электрических машин и трансформаторов должно производиться с высокой точностью, тогда как к точности измерения сопротивления изоляции особых требований не предъявляется. Общее правило: измерять возможно точнее, но не более, чем это необходимо. Например, из имеющихся вольтметров классов 0,2; 2,5 и 4 для измерения напряжения сети в большинстве случаев можно выбрать прибор класса 2,5. Если допускается погрешность 5 или 10%, нет необходимости выбирать прибор класса 0,5.

При выборе измерительных приборов по классу точности полезно иметь в виду следующее:

а) класс точности прибора должен быть по крайней мере на ступень выше, чем допускаемая погрешность: если, например, допускается погрешность 2,5%, то выбирают прибор не хуже класса 1,5;

б) класс точности обозначает только основную погрешность и потому не является непосредственным или единственным показателем точности измерений: она зависит и от ряда других условий, которые вносят дополнительную погрешность и которые надо учитывать;

в) поскольку класс точности определяется отношением абсолютной погрешности к верхнему пределу измерений, меньшая относительная погрешность обеспечивается при измерении тех значений, которые ближе к этому пределу. Так, для аналогового вольтметра со шкалой 0—100 В, класса точности 1,5 предельная абсолютная погрешность равна 1,5 В и, следовательно, основная относительная погрешность может достигать при измерении, например, напряжения 25 или 75 В соответственно 6 или 2%.



Разрешается использовать только поверенные средства измерения с действующим сроком поверки. Поверка производится специализированными лабораториями, подконтрольными Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии.

### 1.5.2. Выполнение измерений

Непосредственно перед началом работ следует проверить схему включения измерительных приборов. Если предельные значения измеряемых величин заранее не известны, приборы устанавливаются на наименьшую чувствительность (на высший предел).

В случае разброса показаний, в частности, при наличии трения в опорах подвижной части стрелочного прибора, фиксируют среднее из двух показаний: при увеличении и при уменьшении измеряемой величины. Аналогично, при уравнивании измерительных мостов, особенно когда минимум показаний индикатора слабо выражен, рекомендуется подходить к состоянию равновесия с обеих сторон.

Когда снимается функциональная зависимость (например, вольт-амперная характеристика трансформатора тока), целесообразно сначала нанести полученные значения на график. Это дает возможность сразу обнаружить и исключить грубые ошибки и погрешности, не пропустить характерные участки кривой (где расположены, например, экстремумы, точки перегиба) и при необходимости увеличить число контрольных точек в них. Затем могут быть выбраны нужные точки для занесения в таблицу протокола или для последующих расчетов. Если кривая имеет монотонный характер, бывает достаточно зафиксировать 5—7 точек, для прямой — еще меньше. Масштаб графика принимают с пересчетными коэффициентами 2 или 5 или кратными 10. При очень широком диапазоне изменения величины применяют также логарифмический или полулогарифмический масштаб, т. е. по обеим осям координат или по одной из них откладывают логарифмы значений данной величины в принятом диапазоне.

### 1.5.3. Эксплуатация средств измерения

Измерительные приборы, особенно стрелочные, чрезвычайно подвержены опасности повреждения при ударах и сотрясениях, и тем больше, чем выше их чувствительность и точность. Если вредные механические воздействия возможны на рабочем месте, то приборы должны быть установлены на амортизирующей проклад-

ке. Рабочая поверхность должна быть чистой, без следов влаги, масла, эмульсии и т. п.; должна быть устранена возможность скольжения или падения приборов.

При транспортировании подвижная часть измерительного прибора должна быть зафиксирована с помощью специального механического устройства, если оно предусмотрено конструкцией прибора, и освобождена только при вводе его в эксплуатацию. Для демпфирования подвижной системы чувствительных магнитоэлектрических приборов зажимы их замыкаются накоротко. Прибор с несколькими пределами измерения сначала включают на самый высокий предел. Меньший предел можно ввести сразу лишь в том случае, если значение измеряемой величины заведомо не может его превысить (например, предел 500 В при измерении напряжения в сети 380/220 В).

Универсальные приборы при хранении следует переключить на самый высокий предел измерения постоянного напряжения, а при транспортировке — на наибольший предел измерения постоянного тока. При длительном хранении приборов с автономным источником питания следует удалить батарейки, чтобы избежать повреждения схемы вытекающим из них электролитом.

Перед использованием новых приборов необходимо внимательно ознакомиться с инструкцией по их применению и указаниями мер безопасности, которые следует безусловно соблюдать.

Рекомендуется критически оценивать результаты измерения, сравнивая их с расчетными или проектными, паспортными или каталожными данными, с результатами аналогичных измерений. Значительное расхождение полученного результата с ожидаемым может свидетельствовать о наличии неисправностей, дефектов проверяемого объекта или погрешностей в методике и технике измерений.

Меры безопасности при проведении измерений указываются в инструкциях предприятия по выполнению соответствующих видов работ и в документах фирм — изготовителей средств измерения.

Как правило, все виды измерений, выполняемых в процессе наладки, не оказывают влияния на окружающую среду. Необходимо помнить, однако, что некоторые из них могут создавать опасность для посторонних лиц, как то: измерение сопротивления изоляции или коэффициента абсорбции мегаомметром, проверка полярности или измерение сопротивления обмоток на стороне низшего напряжения силового трансформатора (пусть даже с применением сверхнизкого напряжения), измерения на вращающихся машинах и др.

## 2. Регулирование и контроль электрических величин при испытаниях. Элементы аппаратуры управления и их проверка

### 2.1. Регулирование электрических величин

#### 2.1.1. Регулирование тока

Устройства для регулирования тока должны обеспечивать:

- непрерывное изменение тока в заданных пределах;
- поддержание неизменным установленного значения тока независимо от изменения температурных условий или параметров нагрузки в ходе испытаний, например, от изменения индуктивности обмотки электромагнита при перемещении сердечника;
- выполнение особых требований, например, плавность регулирования, синусоидальная форма кривой тока и др.

Наиболее универсальными свойствами обладают резисторные схемы регулирования, их применение ограничивается только трудностью подбора резисторов на большие токи. Простейшая схема рис. 2.1,а пригодна лишь для токов до 5—10 А, посредством комбинированной схемы рис. 2.1,б можно регулировать токи порядка 50 А. В обеих схемах плавное регулирование производится реостатом  $R$ , а резистор  $R_0$  исключает возможность короткого замыкания при переводе движка потенциометра  $R$  в одно из крайних положений (левое по схеме рис. 2.1).

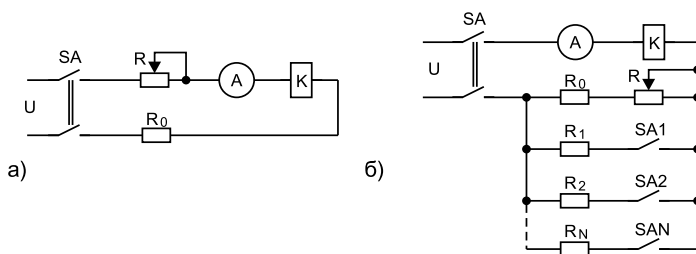


Рис. 2.1. Схемы регулирования тока посредством переменных резисторов: а — простая; б — комбинированная

Сопротивление резисторов  $R_1, R_2 \dots R_N$  подбирается так, чтобы максимальное значение тока на каждой ступени регулирования по крайней мере в 1,2—1,3 раза превышало то минимальное его значение, которое может быть получено на следующей ступени регулирования. Отношение минимального значения тока к максимальному на первых ступенях регулирования должно быть не более 0,7 с тем, чтобы можно было проверить коэффициент возврата реле, пользуясь только реостатом  $R$ . Для определения тока возврата при больших значениях тока сначала отключают резисторы  $R_1, R_2 \dots R_N$ .

Во время проверки электромагнитных элементов значение тока в обмотке может изменяться в зависимости от положения сердечника (якоря). Это связано с тем, что при отпущенном якоре индуктивное сопротивление обмотки невелико по сравнению с активным, но возрастает в несколько раз при подтянутом якоре. Соответствующее увеличение полного сопротивления обмотки приводит к уменьшению тока в ней и, как следствие, ослаблению притягивания якоря к магнитопроводу, нечеткой работе контактной системы и пр. Обычно задаются уменьшением тока на 3...5% и до 10% при больших токах. Соблюдение этих условий требует, чтобы сопротивление регулировочного резистора существенно превышало полное сопротивление обмотки, а это, в свою очередь, предполагает, что напряжение источника питания должно быть достаточным для создания необходимого тока. Если напряжение имеющихся понижающих трансформаторов меньше, чем требуется для обеспечения стабильности тока, можно рекомендовать включение двух трансформаторов с последовательным соединением их вторичных обмоток. Реостаты следует выбирать так, чтобы плотность тока была небольшой и сопротивление незначительно изменялось с нагревом.

Характеристики ряда элементов электрических цепей зависят от формы кривой тока. Так, питание несинусоидальным током вызывает изменение токов срабатывания и выдержек времени реле, вибрацию якоря и пр. Отклонение формы тока или напряжения от синусоидальной объясняется наличием высших гармонических, т. е. составляющих, частота которых выше основной, первой гармонической составляющей. Причинами появления высших гармоник могут быть:

а) искажение фазных напряжений (с преобладанием третьей гармоники), в связи с чем рекомендуется в необходимых случаях использовать линейное напряжение;

- б) насыщение стальных магнитопроводов;
- в) нелинейность внутреннего сопротивления источника питания;
- г) наводки и помехи в цепях управления.

Для того, чтобы приблизить форму тока к синусоиду, в цепь вводят активное сопротивление в виде добавочных резисторов.

Для регулировки тока часто применяются автотрансформаторы, нагрузочные трансформаторы (рис. 2.2). Схема рис. 2.2,а проста и удобна, но ее нагрузочные возможности ограничиваются сравнительно небольшой мощностью широко применяемых реостатов с сопротивлением 50—100 Ом на ток 3—5 А. Схемы с автотрансформатором на ток 9—10 А позволяют получить на вторичной стороне достаточно распространенных трансформаторов типа ОСО-0,25 (250 Вт) напряжением 220/12 В ток порядка 100 А (рис. 2.2,б,в). С точки зрения качества регулирования и гармонического состава тока безразлично, в какую цепь трансформатора — первичную или вторичную — включать добавочный резистор R. Нужно только учитывать, что сопротивление его при включении в первичную цепь трансформатора с коэффициентом трансформации  $n$  должно быть в  $n^2$  раз больше, чем при включении во вторичную цепь. Так, например, сопротивление резистора на стороне 220 В должно быть в  $(220/12)^2 = 336$  раз больше, чем на стороне 12 В.

Для получения больших токов требуются понижающие трансформаторы специального изготовления. Они являются составной частью нагрузочных комплексов, выпускаемых отдельными фирмами, или их изготавливают собственными силами пусконаладочные и энергоэксплуатационные предприятия.

Обычно в качестве магнитопровода используются ленточные или тороидальные сердечники сечением 30—50 см<sup>2</sup>. Первичная (сетевая, на 220 или 380 В) состоит из 100—300 витков, вторичная выполняется в виде одного или нескольких витков кабеля или

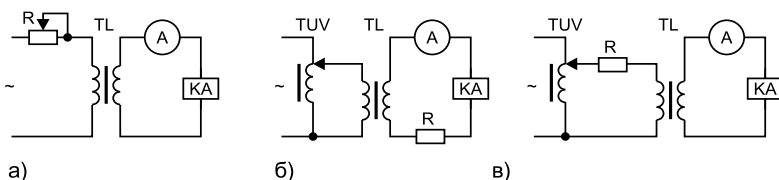


Рис. 2.2. Схемы регулирования тока нагрузки понижающих трансформаторов

шины. Вторичная ЭДС трансформатора составляет 2—4 В, масса — до 30 кг.

Нагрузочный трансформатор работает практически в режиме короткого замыкания, как трансформатор тока. Но есть существенное отличие в использовании трансформаторов малой или большой мощности: если в первом случае максимальное значение тока ограничивается внутренним сопротивлением трансформатора, то во втором преобладающее значение может иметь сопротивление внешних соединений. Здесь важно иметь в виду еще и то, что индуктивное сопротивление медных проводников большого сечения (200 мм<sup>2</sup> и выше) оказывается больше, чем активное. Так, например, активное сопротивление 1 м прямого и обратного проводников из меди сечением 200 мм<sup>2</sup> будет 0,17 мОм, индуктивное же сопротивление этих проводников, расположенных на расстоянии 0,3 м друг от друга, составит 0,45 мОм (рис. 2.3), а полное 0,49 мОм. В этих условиях нельзя получить ток больше 4 кА от трансформатора с вторичным напряжением 2 В, даже если не считаться с его внутренним сопротивлением, и основной возможностью повышения тока остается сокращение длины соединительных проводов и расстояния между ними.

Действительно, увеличение сечения проводов не даст ощутимого эффекта, так как уменьшится только активная составляющая сопротивления, а повышение напряжения путем увеличения количества витков вторичной обмотки трансформатора приведет к возрастанию его внутреннего сопротивления (активное сопротивление обмотки прямо пропорционально числу витков, индуктивное — квадрату числа витков). Но если сократить расстояние между соединительными проводами до 0,1 м, а длину их до 0,5 м, то индуктивное сопротивление проводов уменьшится до 0,16, активное до 0,09, а полное до 0,18 Ом, и тогда на той же отпайке трансформатора можно получить ток до 10 кА. Таким образом, для получения возможно больших значений тока от данной нагрузочной установки необходимо выполнить следующие рекомендации:

- 1) приблизить, насколько возможно, нагрузочный трансформатор к нагрузке, а соединительные провода друг к другу;
- 2) сечение проводников вторичной обмотки трансформатора и соединительного кабеля должно быть возможно большим;
- 3) обеспечить надежные контактные соединения в цепи нагрузки (с помощью зажимов, струбцин и т. п.)

## 2. Регулирование и контроль электрических величин

Ток в первичной обмотке нагрузочных трансформаторов может достигать достаточно больших значений, намного превышающих допустимый ток ЛАТРа.

Так, например, при вторичном токе 10000 А и коэффициенте трансформации 100 нагрузочного трансформатора первичный ток последнего превысит 100 А. Силу тока такого порядка можно регулировать с помощью:

- а) автотрансформаторов;
- б) жидкостных реостатов;
- в) полупроводниковых регуляторов.

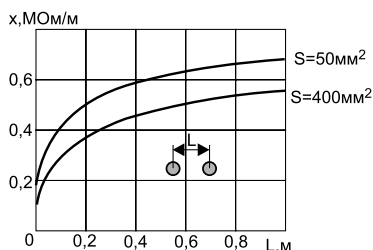


Рис. 2.3. Индуктивное сопротивление двух проводов

С технической точки зрения применение автотрансформаторов является наилучшим способом, но ограничивается тем, что они тяжелы и громоздки. Так, масса автотрансформатора типа АОМН-40-220 на ток 40 А составляет 70 кг. Полезно иметь в виду (особенно при настройке токовой отсечки), что в кратковременном режиме автотрансформаторы могут быть значительно перегружены: например, регулятор РНО-250-10 с номинальным током 40 А допускает ток 180 А в течение 1 мин; при этом подвижный контакт должен быть надежно зафиксирован и перемещать его под нагрузкой нельзя.

Жидкостные реостаты в одно- или трехфазном исполнении состоят из сосуда с подсоленной или подкисленной водой, в котором расположены электроды из меди, латуни, оцинкованной стали и пр. Нагрузка регулируется изменением площади электродов, погружаемых в электролит, или расстоянием между ними. При всей простоте их конструкции жидкостные реостаты не находят широкого применения в связи с тем, что они требуют отдельного изготовления, а также имеют нестабильное сопротивление.

В ряде случаев оптимальным решением является применение регуляторов на основе полупроводниковых вентиляей, сравнительно легких и малогабаритных, которые к тому же могут быть изготовлены практически на любую силу тока. В однофазном исполнении такой регулятор содержит два управляемых полупроводниковых вентиляей, включенных встречно-параллельно (обычно — тиристоры), или симистор. Единственным серьезным препятствием к их широкому использованию является искажение формы кривой тока. Действительно, в процессе регулирования вентиляей открываются (отпираются) не в начале полупериода напряжения, а с запаздыванием, отсекая таким образом начальную часть полупериода (рис. 2.4).

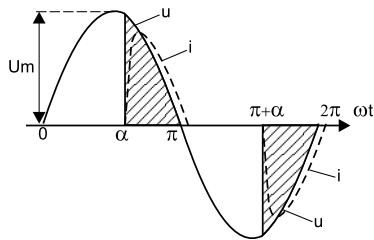


Рис. 2.4. Форма напряжения и тока при регулировании посредством управляемых вентиляей (нагрузка активная)

Чем больше угол отсечки  $\alpha$  (угол запаздывания отпираия, угол регулирования), тем меньше будет ток нагрузки и тем больше форма его будет отличаться от синусоиды. Это отличие численно оценивается коэффициентом формы, который представляет собой отношение действующего значения периодической величины к ее среднему значению, и для синусоидального напряжения, в частности, равен  $k_f = U/U_{cp} = 1,11$ . Зависимость действующего и среднего значений напряжения и коэффициента формы от угла регулирования  $\alpha$  приведена на рис. 2.5.

Опытным и расчетным путем установлено (Ленинградское пусконаладочное управление треста Севзапэлектромонтаж), что тиристорные регуляторы можно использовать для испытания электромагнитных реле при условии, если угол регулирования не превышает  $90^\circ$ , а измерения производятся либо аналоговыми приборами, непосредственно реагирующими на среднеквадратичное (действующее) значение тока (приборы электромагнитной или



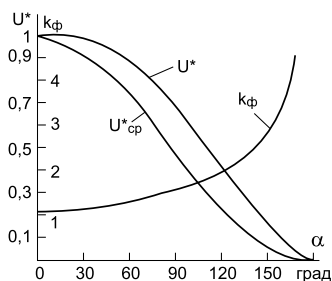


Рис. 2.5. Зависимость действующего ( $U$ ), среднего ( $U_{cp}$ ) значений напряжения и коэффициента формы  $k_{ф}$  от угла регулирования  $\alpha$

электродинамической системы), либо цифровыми приборами, вычисляющими среднееквадратичное значение тока при любой форме сигнала. Токи срабатывания расцепителей автоматов типа АП-50, АЗ100 и др. практически (с точностью 2—3%) не зависят от угла регулирования в широком диапазоне его изменения (до 150°). Вместе с тем тиристорные регуляторы принципиально неприменимы для проверки тех цепей и аппаратов, для которых форма тока имеет существенное значение.

Простейшую схему фазового управления вентилями можно осуществить с помощью RC-цепи. Более совершенные схемы строятся на цифровых или аналоговых микросхемных элементах. В ряде конструкций предусматривается запоминание и автоматическое отключение тока при срабатывании защиты, а также стабилизация тока уставки.

Различные варианты нагрузочных комплектов для испытания максимальных токовых защит выпускаются как российскими, так и зарубежными фирмами (см. 3.1). Нагрузочные установки, предлагаемые рынком зарубежной электротехнической промышленности, имеют достаточно высокие технические характеристики, однако возможность их приобретения и использования ограничивается ценой, иногда на порядок выше, чем отечественных устройств аналогичного назначения. Так, система испытания первичным током ODEN AT (компания «Пергам») обеспечивает получение нагрузочного тока до 22 кА, но стоимость комплекта составляет 26000 долл.

Регулируемое напряжение постоянного тока можно получить с помощью устройств переменного тока с выпрямителями на выходе. В большинстве случаев (особенно при индуктивной нагрузке,

зарядке аккумуляторов и пр.) пульсация выходного напряжения существенного значения не имеет. Надо только иметь в виду, что из-за падения напряжения на вентилях вторичное напряжение нагрузочного трансформатора должно быть на 1—2 В выше, чем для получения того же значения переменного тока.

### 2.1.2. Регулирование напряжения

Требования к регуляторам тока и напряжения аналогичны. Для регулирования переменного напряжения широко применяются лабораторные автотрансформаторы (рис. 2.6). Простейшая схема включения (рис. 2.6,а) позволяет с помощью автотрансформатора TUV изменять напряжение на нагрузке (реле напряжения KV) в диапазоне от 0 до 250 В. Минимальное изменение напряжения получается при перемещении ползунка на один виток обмотки. Автотрансформатор ЛАТР-1 имеет 250 витков и, следовательно, дискретность напряжения составляет 1 В/виток, у ЛАТР-2 дискретность 0,45 В/виток, так как число витков его обмотки — 550. Если такая точность регулируемого напряжения представляется недостаточной, то его подают на другой ЛАТР или потенциометр. Для обычных промежуточных реле и электромагнитов достаточна точность регулирования 0,5—1% номинального напряжения.

С помощью двух автотрансформаторов можно получить регулируемое напряжение от 0 до 430 В по схеме рис. 2.6,б или по аналогичной схеме, подав напряжение 380 В на выводы 220 В.

Последний вариант обеспечивает синусоидальность выходного напряжения, так как линейное напряжение не содержит высших гармонических. Посредством трех автотрансформаторов можно регулировать трехфазное напряжение 430/250 В.

Для регулирования напряжения переменного и постоянного тока применяют переменные резисторы, реостаты, включаемые по

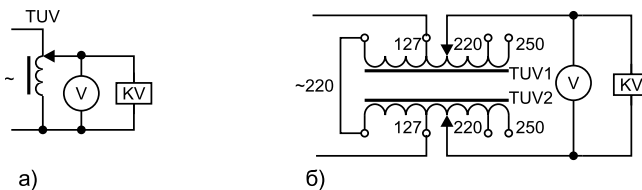
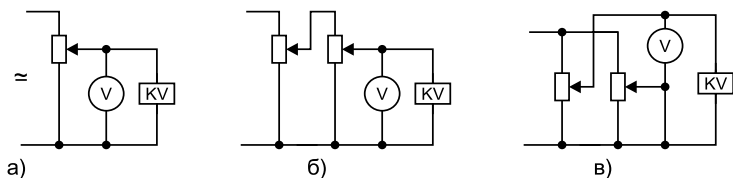


Рис. 2.6. Схемы регулирования напряжения с помощью автотрансформаторов: а — с одним автотрансформатором; б — с двумя автотрансформаторами



*Рис. 2.7. Схемы регулирования напряжения с помощью потенциометров: а — с одним потенциометром; б — с двумя потенциометрами; в — с реверсированием напряжения*

схеме потенциометра (рис. 2.7). Схема включения потенциометра на рис. 2.7,а — самая простая. По схеме рис. 2.6,б одним потенциометром осуществляют «грубое», другим — «тонкое» регулирование напряжения. Схема на рис. 2.7,в обеспечивает изменение полярности (реверсирование) выходного напряжения без разрыва цепи.

Выбирая резисторы для схемы с потенциометром, надо учитывать ее характерные особенности. Во-первых, потенциометр, как и автотрансформатор, дает дискретную, мелкоступенчатую регулировку. Точность ее определяется числом витков обмотки потенциометра, по которой движется щетка или ролик. Так как обычно ширина щетки значительно больше диаметра проволоки обмотки, часть витков щеткой шунтируется и напряжение на виток несколько увеличивается. Кроме того, токосъемник часто не доходит до конца обмотки и часть витков ее не используется. По этим причинам расчетное число витков потенциометра следует увеличить на 10—20% против полученного из условий обеспечения требуемой точности регулирования. Точность регулирования можно повысить посредством второго потенциометра по схеме рис. 2.7,б или включив последовательно с потенциометром постоянные добавочные резисторы с обеих его сторон. Включая или отключая эти резисторы, можно сдвигать область регулирования в сторону больших или меньших значений напряжения.

Во-вторых, та часть  $R_2$  делителя (рис. 2.8), к которой не подключена нагрузка  $Z_H$ , обтекается общим током  $I_2$ , равным сумме токов собственного потребления резистора  $R$  и тока нагрузки  $I_H$ . Если нагрузка такова, что при одном и том же положении движка потенциометра сопротивление ее может изменяться (например, при срабатывании реле или электромагнита), то с током  $I_H$  изменится и падение напряжения  $I_2 R_2$  и, следовательно, напряжение на нагрузке  $U_H$ . Чтобы снизить влияние нагрузки на испытатель-

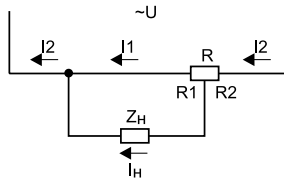


Рис. 2.8. К схеме регулирования напряжения потенциометром

ное напряжение, сопротивление делителя  $R$  выбирают на порядок (в 5—10 раз) меньше сопротивления нагрузки  $Z_H$ .

В-третьих, при указанных условиях ток  $I_2$  получается больше, чем ток  $I_H$ , и выбирать реостат по току следует именно по значению тока  $I_2$ . Полезно иметь в виду, что силовые резисторы, и ползунковые реостаты в частности, имеют большую тепловую инерцию, в связи с чем в кратковременном режиме выдерживают определенную перегрузку и могут быть выбраны на номинальный ток, меньший  $I_2$ . В любом случае изменение сопротивления резисторов от нагрева не должно искажать результатов проверки.

### 2.1.3. Регулирование угла сдвига фаз.

При наладке требуется обычно изменять угол между векторами тока и напряжения в трех основных случаях:

- 1) установка и поддержание неизменным заданного значения угла;
- 2) изменение угла степенями;
- 3) точная установка и плавное регулирование угла в небольших пределах.

Универсальным аппаратным средством для выполнения этих функций является так называемый индукционный регулятор (потенциал-регулятор) — заторможенный асинхронный двигатель с фазным ротором. Особенность его состоит в том, что при изменении угла поворота ротора относительно статора от  $0$  до  $360^\circ$  в тех же пределах изменяется угол между напряжениями статора и ротора. Однако некоторые модификации обеспечивают изменение угла лишь в пределах  $\pm 90^\circ$ . Кроме того, эти электрические машины даже небольшой мощности тяжелы и громоздки. Могут использоваться также поворотные трансформаторы и автотрансформаторы, сельсины (рис. 2.9).

Когда допустимо изменение угла степенями, удобно использовать трехфазное напряжение. Подавая различные линейные на-

## 2. Регулирование и контроль электрических величин

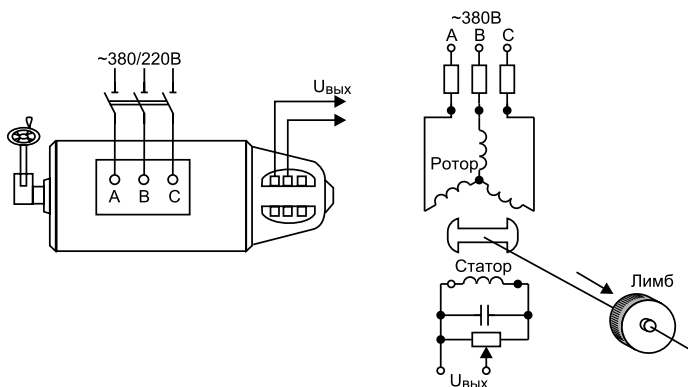


Рис. 2.9. Электромашинные фазорегуляторы: а — индукционный фазорегулятор; б — сельсинный фазорегулятор

пряжения на цепи тока и напряжения, можно получить 6 разных значений угла между соответствующими векторами от 0 до 360° через 60°, а используя дополнительно и фазные напряжения — через 30°. Ниже указан вариант подключения фаз сети к одной из цепей тока или напряжения при условии, что другая цепь подключена на напряжение АО.

Угол, град. эл	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Фаза	АО	АВ	ОВ	СВ	СО	СА	ОА	ВА	ВО	ВС	ОС	АС

Необходимую коммутацию напряжений нетрудно осуществить с помощью двух однополюсных переключателей на четыре направления (рис. 10) или одного сдвоенного переключателя. При необходимости такой фазорегулятор дополняется потенциометром (или автотрансформатором), с помощью которого можно плавно изменять значение угла от 0 до 60° в пределах одной ступени (рис. 11,а). Но из векторной диаграммы рис. 10,б видно, что при регулировании выходное напряжение изменяется не только по фазе, но и по значению: в крайних положениях движка потенциометра оно равно линейному, в среднем положении — в 1,15 раз меньше.

Для исключения этого недостатка можно применить схему с двумя потенциометрами (рис. 11,б); здесь одним потенциометром

## 2.1. Регулирование электрических величин

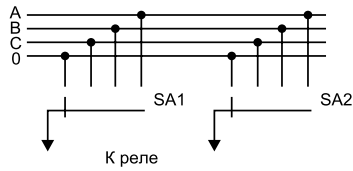


Рис. 2.10. Ступенчатое изменение угла с помощью двух переключателей

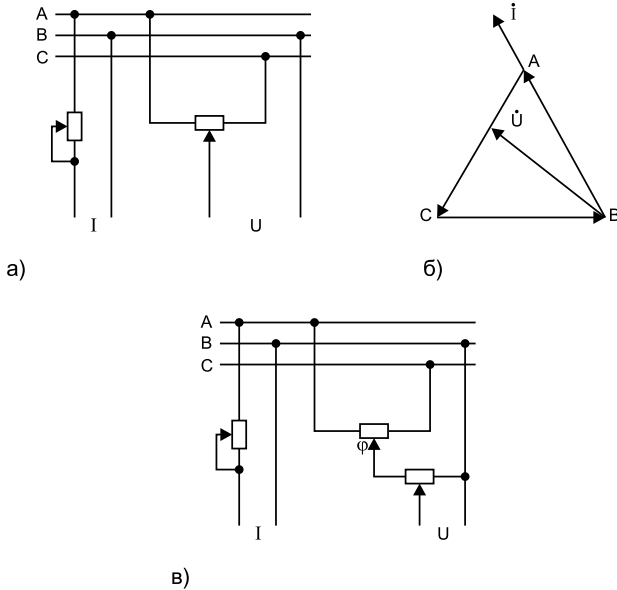


Рис. 2.11. Плавное изменение угла между током ( $I$ ) и напряжением ( $U$ ) в пределах  $0-60^\circ$  с помощью потенциометров: а — схема с одним потенциометром; б — векторная диаграмма к схеме с одним потенциометром; в — схема с двумя потенциометрами

устанавливают угол, другим корректируют значение напряжения. Во всех схемах вместо потенциометра можно использовать автотрансформатор.

### 2.2. Контроль электрических величин

#### 2.2.1. Индикация

В процессе массовых проверок электрических цепей и оборудования часто требуется не измерить точное значение того или иного параметра, а лишь установить, отличается ли его значение от нуля. Такие приборы получили общее название индикаторов. Самым употребительным из них является устройство с обиходным названием «пробник», служащее для проверки наличия электрической цепи, целостности проводников, и состоящее, в простейшем варианте, из батарейки и светового индикатора — лампочки карманного фонарика или светодиода. Первоначально в качестве индикатора применяли электрический звонок, а потому и сама операция получила бытующее до сих пор название «прозвонка».

Несмотря на крайнюю простоту, пробник с электрической лампочкой удобен тем, что позволяет надежно установить наличие короткозамкнутой электрической цепи, так как уже при сопротивлении 20—30 Ом лампочка не горит. Кроме того, по искрению при размыкании цепи можно судить по наличию в ней индуктивности. В одной из конструкций такого пробника (Тайвань) один конец пластмассового корпуса цилиндрической формы снабжен металлическим щупом, а с другого конца, выполненного из прозрачного материала, выведен гибкий проводник с зажимом «крокодил». При переноске острый щуп закрывается наконечником, что предотвращает разряд батареи при случайном соприкосновении щупа и «крокодила», да и повреждение одежды оператора тоже. В ярко освещенных помещениях предпочитают вместо световых индикаторов использовать звуковые, например, миниатюрные динамики.

«Слабым местом» простейшего пробника является то, что при попадании на его выводы напряжения внешней цепи он выходит из строя. В ряде конструкций этот недостаток так или иначе преодолевается. Например, схема пробника ПУ-82М (разработка Лен-ПЭО ГПИ «Тяжпромэлектропроект») построена так, что благодаря высокоомному входу выдерживает приложенное напряжение 220 В в течение 30 с. С помощью этого прибора можно определить и диапазон сопротивления контролируемой цепи: при значениях от 0 до 10 Ом индикация непрерывная, от 10 до 8000 — прерывистая, более 8000 Ом и при обрыве цепи — сигнал отсутствует. Же-

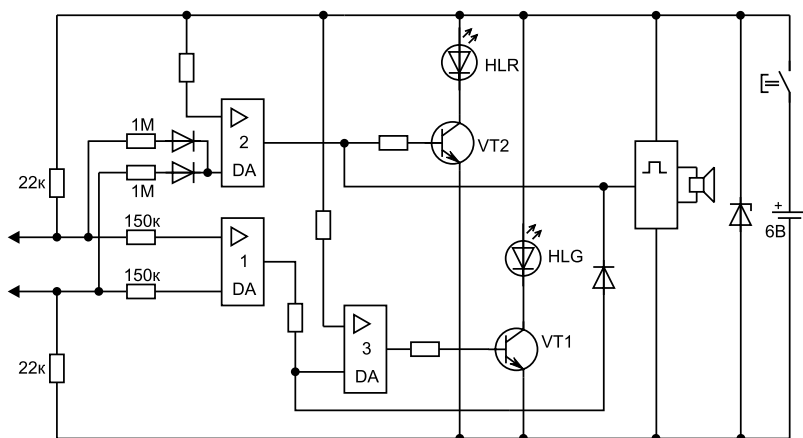


Рис. 2.12. Принципиальная схема пробника с защитой от напряжения 220 В

сткий щуп прибора — выдвигной с пружинным фиксатором. Принципиальная схема этого прибора (в несколько упрощенном виде) показана на рис. 2.12.

Если выводы пробника замыкаются на исправную замкнутую цепь, сопротивление которой не превышает нескольких десятков ом, выходным сигналом интегральной микросхемы DA1 открывается транзистор VT1 и загорается зеленый сигнал (светодиод HLG). При случайном прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением постоянного или переменного тока, независимо от полярности напряжения на вход микросхемы DA2 будет поступать «+», ее выходной сигнал откроет транзистор VT2 и загорится красный сигнал (светодиод HLR); одновременно будет подан звуковой сигнал тревоги. Напряжение 220 В схема выдерживает без повреждения до 30 с.

При прозвонке длинных кабелей, концы которых расположены в разных помещениях, часто используют телефонные трубки, с которыми работают два наладчика. Широко применяются портативные коротковолновые радиостанции и мобильные телефоны. При большом объеме работ, особенно при прозвонке многожильных кабелей, целесообразно воспользоваться автоматизированным пультом — пробником, с помощью которого проверку может выполнить один оператор. Вариант такого пульта (разработка ЛенПНУ треста



## 2. Регулирование и контроль электрических величин

«Севзапэлектромонтаж») конструктивно состоит из двух частей: передающей и приемной. Передающая часть снабжена генератором, приемная — счетчиком импульсов и цифровым табло. Один конец кабеля подключается всеми жилами на маркированные зажимы передатчика, у другого конца помещается приемник. Для каждой жилы генератор вырабатывает серию импульсов, количество которых равно номеру жилы. Этот номер высвечивается на цифровом табло, когда наладчик касается жилы щупом приемника. При обнаружении замыкания между жилами или «земли» табло гаснет.

Индикаторные приборы последних лет способны выполнять целый ряд различных функций. Простой и дешевый (около 2 долл.) многофункциональный прибор ИМ-1 выпускает Арзамасский завод радиодеталей (рис. 2.13). Светодиодная индикация позволяет определить наличие напряжения от 4 до 380 В с указанием фазного и нулевого провода переменного напряжения и полярности постоянного напряжения, исправность конденсаторов, диодов и транзисторов. Надо, однако, иметь в виду, что из-за малого потребления светодиоды в схеме гаснут только при сопротивлении больше 0,5 МОм, что существенно ограничивает возможности применения прибора для прозвонки.

Несколько более сложный пробник ИМ-2 позволяет приблизительно определить порядок значения напряжения, обеспечивает световую и звуковую индикацию.

Традиционно выпускаются и однофункциональные индикаторы напряжения. Индикатор-отвертка ИН-91 предназначен для проверки наличия переменного напряжения от 110 до 380 В. У индикатора ПИН-90 верхний порог напряжения постоянного и переменного тока повышен до 750 В. Индикатор состоит из двух ди-

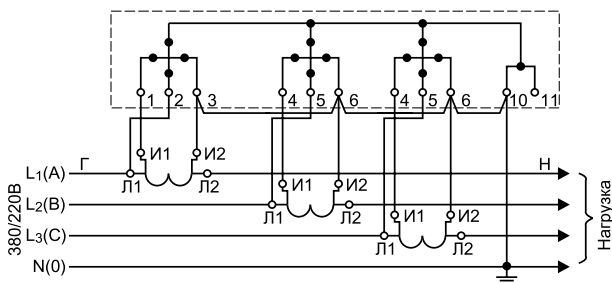


Рис. 2.13. Многофункциональный индикатор ИМ-1

электрических рукояток с металлическими наконечниками, в одну из которых вмонтирована неоновая лампа, в другую — ограничительный резистор. Индикатор переменного напряжения УН-1 дает возможность судить не только о наличии напряжения, но и о его соответствии значениям 127, 220 и 380 В — по длине светящегося столба линейного аналогового индикатора.

### 2.2.2. Фазировка

*Фазировка* — это проверка соответствия фаз электроустановки потребителя и питающей сети. С этой целью проверяют порядок чередования (следования) фаз и совпадение по фазе одноименных напряжений, а также обозначение и окраску фазных проводников. Обозначаются они латинскими буквами А, В и С, а шины окрашиваются соответственно в желтый, зеленый и красный цвета.

В пяти- и четырехпроводных цепях расположение шин должно быть следующим:

- при горизонтальном расположении:
- одна под другой: сверху вниз А-В-С-N-РЕ (PEN);
- одна за другой: наиболее удаленная шина А, затем фазы В-С-N, ближайшая к коридору обслуживания — РЕ (PEN);
- при вертикальном расположении: слева направо А-В-С-РЕ (PEN) или наиболее удаленная шина А, затем фазы В-С-N, ближайшая к коридору обслуживания — РЕ (PEN);
- ответвления от сборных шин, если смотреть на шины из коридора обслуживания:
- при горизонтальном расположении: слева направо А-В-С-N-РЕ (PEN);
- при вертикальном расположении А-В-С-N-РЕ (PEN) сверху вниз (1.1.31).

У трансформаторов выводы низшего напряжения располагаются слева направо (если смотреть со стороны высшего напряжения) в следующем порядке:  $\theta - a - b - c$  у трехфазных или  $a - x$  у однофазных трансформаторов.

Изменение синусоидальной величины во времени графически изображается либо в виде синусоиды, либо с помощью вращающегося вектора, длина которого пропорциональна амплитуде этой величины, а проекция на вертикальную ось — ее значению в данный момент (рис. 2.14). Полный оборот вектора на  $360^\circ$  соответствует периоду синусоиды  $T = 1/\omega$ , где  $\omega$  — частота вращения век-

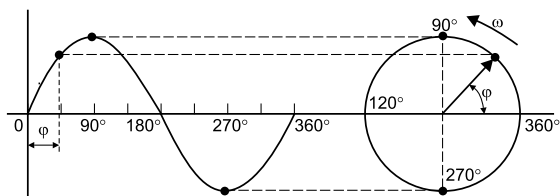


Рис. 2.14. Графическое представление синусоидальной величины

тора;  $\omega t$  — угол поворота вектора за время  $t$ , например,  $\omega t = \varphi$ , как это показано на рис. 2.14.

Векторные величины обозначаются соответствующими прописными буквами с точкой или черточкой сверху, либо эти буквы выделяются жирным шрифтом. Совокупность векторов, отображающих синусоидальные функции времени, называется *векторной диаграммой*.

Напряжения в трехфазных сетях также могут быть представлены посредством синусоид и векторной диаграммы. При этом предполагается, что векторы фазных напряжений вращаются с одинаковой частотой и следуют друг за другом с отставанием на угол, равный  $2\pi/3 = 120^\circ$ , если система симметрична, т. е. нагрузка всех трех фаз одинакова и значения фазных напряжений равны.

Такой порядок следования (чередования) фаз, когда за фазой А следует фаза В, а затем фаза С или при *циклической* их перестановке, называется *прямым* и обозначается символами АВС (или ВСА, САВ), а при перестановке любых двух фаз — *обратным* (ВАС, АСВ, СВА). На рис. 2.15 представлены векторная диаграмма симметричной системы фазных напряжений и синусоидальные кривые зависимости их от времени; порядок чередования фаз — прямой. В момент, отраженный на рис. 15, мгновенные значения напряжений фаз А, В и С составляют:  $U_A = U_\phi$ ,  $U_B = U_C = U_\phi \sin 30^\circ = U_\phi/2$  (отрезок MN), где  $U_\phi$  — действующее значение фазного напряжения, например, 220 В.

Порядок чередования фаз легко определить с помощью простых малогабаритных приборов — фазоуказателей. Фазы сети подключают к зажимам А, В и С прибора (рис. 2.16). Индукционный фазоуказатель представляет собой миниатюрный асинхронный двигатель с ротором в виде легкого алюминиевого диска. При нажатии кнопки и прямом порядке чередования фаз диск индукционного фазоуказателя (рис. 2.16,а) будет вращаться по часовой

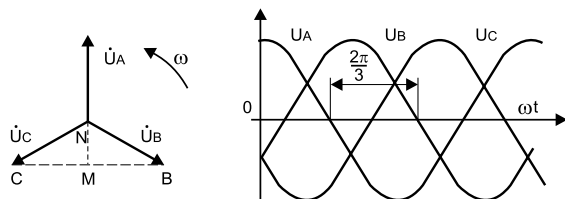


Рис. 2.15. Векторная диаграмма и зависимость напряжения от времени в трехфазной системе

стрелке, при обратном — в противоположную сторону. Индукционный фазоуказатель типа И 517М, например, рассчитан на напряжение от 50 до 500 В, частоту от 40 до 500 Гц, его масса 0,2 кг.

Простой статический фазоуказатель со световым индикатором можно собрать по схеме рис. 2.16,б. Сопротивления резисторов и емкость конденсаторов подбираются так, чтобы ток в плече АВ опережал напряжение на  $30^\circ$ , а в плече ВС — на  $60^\circ$ . При прямом порядке чередования фаз напряжение на выходе схемы равно нулю, при обратном — в 1,5 раза больше линейного; индикатором НЛ может служить неоновая лампочка.

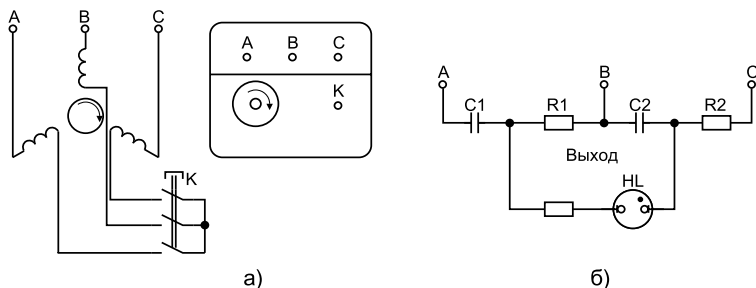


Рис. 2.16. Фазоуказатели: а) индукционный; б) статический

Но важно помнить, что установление правильного чередования фаз еще не гарантирует от ошибок при фазировке. Действительно, из рис. 2.17 видно, что включение на параллельную работу (рубильник QS) двух систем шин с одинаковым чередованием фаз при их круговой (циклической) перестановке привело бы к трехфазному короткому замыканию (если, конечно, обе системы имеют общую точку, например, заземление нейтрали трансформаторов). Совпадение фаз проверяется вольтметром.

## 2. Регулирование и контроль электрических величин



Рис. 2.17. Неправильная фазировка шин при круговой перестановке фаз

Перед включением на параллельную работу трансформаторов проверяют симметрию линейных напряжений, значения которых должны быть близки к номинальным. Включение на параллельную работу возможно лишь при условии, что группы соединений обмоток трансформаторов одинаковы. Группа соединений указывается в паспортных данных трансформатора и проверяется при наладке. В отдельных случаях одна группа соединений может быть приведена к другой путем простых пересоединений: так, группы, различающиеся на 4 часа, могут быть согласованы путем круговой перестановки фаз.

После того, как будет зафиксирован прямой порядок следования фаз у обоих трансформаторов, следует с помощью вольтметра убедиться, что напряжение между одноименными выводами трансформаторов близко к нулю (рис. 2.18). Для получения замкнутой измерительной цепи обмотки должны иметь общую точку. У трансформаторов с заземленными нейтральными они соединены через землю (рис. 2.18,а), в других случаях соединяют любые два вывода обеих обмоток, как показано, например, на рис. 2.18,б. В первом случае вольтметр должен быть рассчитан на двойное фазное, в других — на двойное линейное напряжение. Соединение выполняют накоротко или через сопротивление 3–5 кОм. Если разность одноименных напряжений оказывается достаточно большой, следует предположить, что трансформаторы относятся к разным группам соединений или имеет место круговая перестановка фаз. Сравнительно небольшое расхождение (порядка 10%) можно уменьшить переключением ответвлений обмоток.

При фазировке силового кабеля требуется отыскать в конце его жилы, соответствующие определенным фазам в начале кабеля. Проверка производится обычно с помощью пробника или мегаомметра. В качестве одного из проводов можно использовать металлическую оболочку кабеля. При таком способе «прозвонки» оператору приходится трижды устанавливать переключку жила — земля в конце кабеля и возвращаться к его началу. Избежать этих непроизводительных затрат времени можно, если в конце кабеля

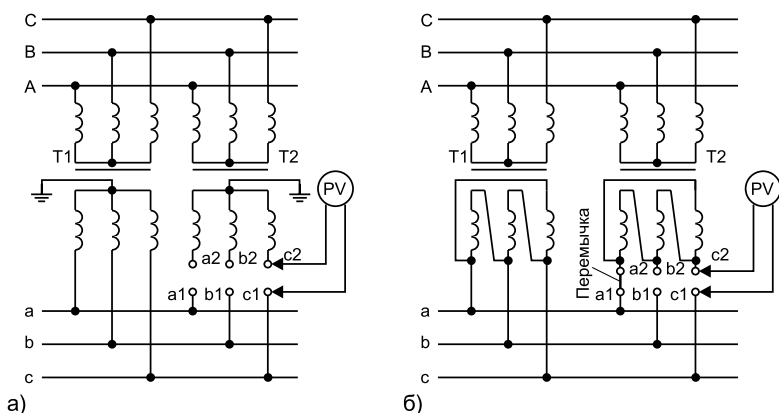


Рис. 2.18. Фазировка силовых трансформаторов на стороне 0,4 кВ:  
 а) нейтрали обмоток заземлены; б) обмотки соединены перемычкой

одну из жил заземлить наглухо, другую — через сопротивление порядка 1 МОм, третью же оставить свободной. Тогда жилы легко идентифицировать по показаниям мегаомметра, измерив в начале кабеля сопротивление каждой жилы относительно земли: нуль, включенное сопротивление и сопротивление изоляции. После окончания измерений мегаомметром жилы кабеля следует разрядить, замыкая их поочередно на землю на 1—2 мин.

Фазировка требуется также и при параллельном соединении кабелей между собой: необходимо убедиться, что соединяются друг с другом одноименные, то есть подключенные к одной и той же фазе, жилы кабеля, в противном случае возникает короткое замыкание. На кабелях, не подключенных к нагрузке, это нетрудно осуществить прозвонкой (пробником, мегаомметром), если на них не подано напряжение, или с помощью вольтметра — под напряжением питания. Сложнее обстоит дело, если два или даже три силовых кабеля соединены параллельно и подключены к нагрузке, например, когда не представляется возможным подобрать один кабель достаточно большого сечения для питания мощных асинхронных двигателей. В этом случае, из-за малого активного сопротивления обмоток машины, при прозвонке смонтированного кабеля часто не удастся различить, замкнуты жилы кабеля на обмотку или между собой, а отключение кабеля для проверки трудоемко и может нарушить эстетику монтажа.

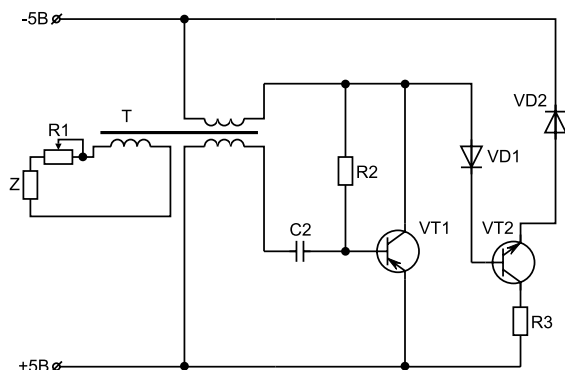


Рис. 2.19. Принципиальная электрическая схема прибора для проверки подключения параллельных кабелей

Фазировку таких кабелей удобно осуществить с помощью специального прибора. Принцип действия его основан на том, что на переменном токе проявляется индуктивная составляющая сопротивления нагрузки, и она тем больше, чем выше частота тока. А так как активная составляющая сопротивления обмотки двигателя и жил кабеля почти не изменяется с частотой, то при частоте в несколько килогерц индуктивное сопротивление обмотки мощной электрической машины может на несколько порядков превысить сопротивление жил. Схема прибора (рис. 2.19) содержит мультивибратор на транзисторах  $VT_1, VT_2$  и малогабаритный импульсный трансформатор  $T$ , с выходной обмотки которого импульсы повышенной частоты подаются на пару жил кабеля со стороны источника питания. Если эта цепь содержит высокое сопротивление  $Z$  обмотки (или разомкнута), излучение светодиода  $VD_2$  свидетельствует о правильном подключении кабеля. Если же кабель подключен неправильно, то есть жилы разных фаз замкнуты между собой накоротко, индикатор светиться не будет. Прибор малогабаритный, масса его 0,2 кг.

### 2.2.3. Построение векторных диаграмм

#### 2.2.3.1. Суммирование векторов

При построении векторных диаграмм часто приходится складывать или вычитать вектора. *Векторное*, или *геометрическое*, суммирование производится с учетом не только абсолютного значе-

ния величины, но и ее фазы, то есть углового положения вектора на диаграмме. Пусть, например, требуется сложить два вектора  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  (рис. 2.20). С этой целью следует вектор  $\mathbf{B}$  перенести параллельно самому себе так, чтобы совместить его начало с концом вектора  $\mathbf{A}$  (рис. 2.20,а). Вектором  $\mathbf{A} + \mathbf{B}$  будет диагональ параллелограмма, построенного на сторонах  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ . Чтобы вычесть вектор  $\mathbf{B}$  из вектора  $\mathbf{A}$ , следует такое же построение произвести с вектором  $-\mathbf{B}$ . Полученная разность может быть представлена второй диагональю параллелограмма. Обычно полный параллелограмм не строят, ограничиваясь треугольником векторов (не показывая стороны, изображенные на рис. 2.20,а пунктиром).

На рис. 2.20,б представлена симметричная система трех одинаковых векторов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$ , расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу, как это имеет место в трехфазной системе. Здесь в качестве примеров показано вычитание ( $\mathbf{A} - \mathbf{B}$  и  $\mathbf{B} - \mathbf{A}$ ) и сложение векторов ( $\mathbf{A} + \mathbf{C}$ ). Нетрудно заметить следующее:

- не прибегая к построению параллелограмма, можно получить разность  $\mathbf{A} - \mathbf{B}$  как вектор, начало которого совмещено с

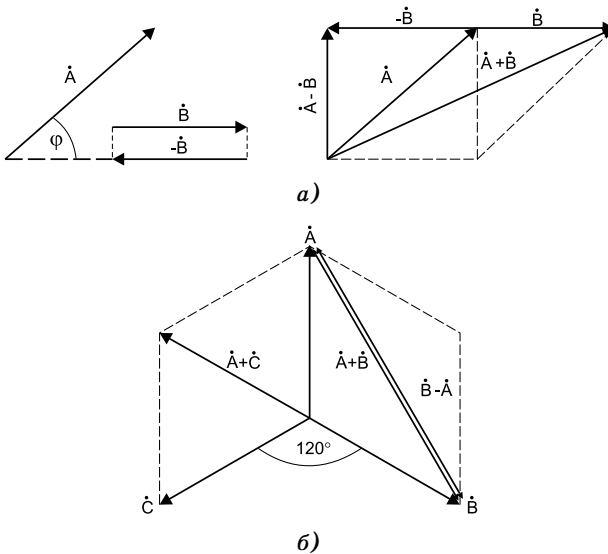


Рис. 2.20. Сложение и вычитание векторов; а — векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ ; б — векторов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$



концом вектора **B**, а конец — с концом вектора **A**, и обратно — для разности **B** — **A**;

- чтобы сложить два вектора, например **A** + **C**, достаточно перенести вектор **C** параллельно самому себе так, чтобы совместить начало его с концом вектора **A**; третья сторона треугольника образует результирующий вектор **A** + **C**, начало которого совпадает с началом векторов — слагаемых; тот же результат получится при переносе вектора **A** к вектору **C**;
- сумма векторов симметричной трехфазной системы равна нулю (**A** + **C** = **-B**).

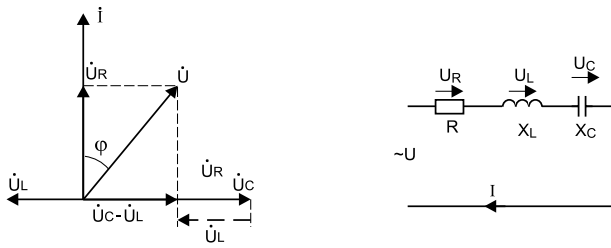
### 2.2.3.2. Векторные диаграммы цепей со смешанной нагрузкой

Выше были рассмотрены векторные диаграммы фазных напряжений трехфазной сети, сдвинутых относительно друг друга (при симметричной нагрузке или на холостом ходу) на  $120^\circ$ . Но фазный сдвиг может образовываться и в однофазной цепи переменного тока за счет наличия в ней реактивных элементов — индуктивности и емкости (рис. 2.21). Индуктивные  $X_L$ , емкостные  $X_C$  и активные  $R$  сопротивления могут быть соединены в ней последовательно (рис. 2.21,а) или параллельно (рис. 2.21,б). В первом случае общим для всех элементов цепи является ток, во втором — напряжение, и при построении векторных диаграмм удобно поэтому принимать за ось отсчета соответственно вектор тока **I** (рис. 2.21,а) или вектор напряжения **U** (рис. 2.21,б). Напряжение на индуктивности  $U_L$  опережает ток на  $90^\circ$ , а напряжение на емкости отстает от тока  $I_C$  на  $90^\circ$ .

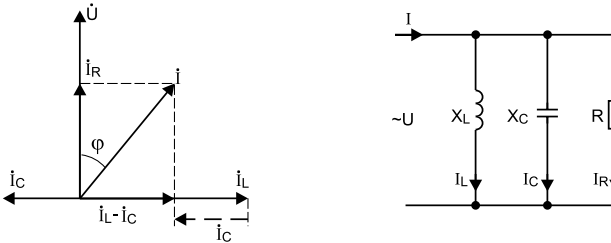
Из рис. 2.21,а видно, что векторы напряжений на индуктивности и емкости направлены в противоположные стороны, результирующее реактивное напряжение равно их разности и в зависимости от преобладания индуктивности или емкости может отставать от тока или опережать его: если  $X_L > X_C$ , ток отстает от напряжения (индуктивная реакция цепи), а если  $X_C > X_L$ , то ток опережает напряжение (емкостная реакция). Угол  $\varphi$  можно определить из соотношения

$$\cos\varphi = U_R/U = R/Z \text{ или } \operatorname{tg}\varphi = (U_L - U_C)/U_R = (X_L - X_C)/R.$$

Режим, при котором  $X_L = X_C$ , называется *резонансом*. При этом реактивное сопротивление цепи на рис. 2.21,а будет равно нулю, и поскольку реактивная составляющая напряжения также равна нулю, такой режим называется *резонансом напряжений*, или *послед-*



а)



б)

Рис. 2.21. Схемы и векторные диаграммы цепей с индуктивным  $X_L$ , емкостным  $X_C$  и активным  $R$  сопротивлениями: а — последовательное соединение; б — параллельное соединение

довательным резонансом. Входное сопротивление цепи будет чисто активным, равным  $R$ , а напряжение на нем равно напряжению на зажимах цепи, хотя напряжения на индуктивности и емкости могут значительно превзойти по значению входное напряжение. Ток  $I = U/R$  совпадает по фазе с напряжением:  $\varphi = 0$ ,  $\cos\varphi = 1$ .

В схеме рис. 2.21,б с параллельным соединением сопротивлений результирующий реактивный ток равен разности токов в ветвях с емкостью и индуктивностью. Когда  $X_L > X_C$ , ток опережает напряжение, когда  $X_C > X_L$  — ток отстает от напряжения. Угол  $\varphi$  определится из соотношения

$$\cos\varphi = I_R/I = Z/R \text{ или } \operatorname{tg}\varphi = (I_L - I_C)/I_R = R(X_C - X_L)/X_L X_C.$$

При резонансе общий ток в цепи будет определяться только активным сопротивлением, хотя токи в цепях с индуктивностью и емкостью могут намного превосходить общий ток. Такой режим называется *резонансом токов*, или *параллельным резонансом*.

### 2.2.3.3. Векторная диаграмма напряжений трехфазного трансформатора

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются, как правило, по схеме «звезда» (У) или «треугольник» (Д). Наиболее часто встречаются соединения первичной и вторичной обмоток по схеме звезда — звезда (У/У) и звезда — треугольник (У/Д). Начальные выводы обмотки высшего напряжения (ВН) обозначаются заглавными буквами латинского алфавита А, В и С, конечные — Х, У и Z. Обмотки низшего напряжения (НН) обозначаются соответственно строчными буквами а, b, с и х, у, z.

Полное условное обозначение соединений обмоток содержит еще номер группы соединений — одну из двенадцати цифр на циферблате часов. Эти цифры на круговом циферблате наносятся через  $30^\circ$ , поскольку угол полного оборота часовой стрелки составляет  $360^\circ$ . Вместе с тем, соединяя в том или ином порядке фазные обмотки трехфазного трансформатора, можно получить всего 12 вариантов, в которых векторы одноименных линейных напряжений будут смещены по фазе на угол, кратный  $30^\circ$ . Такое сопоставление и дало основание принять за единицу угла, характеризующего группу соединений, не электрический градус, а в 30 раз более крупную — час. Мнемоническое правило таково: следует вообразить, что вектор линейного напряжения на стороне ВН представлен на циферблате часов минутной стрелкой, установленной на цифру 12, а вектор одноименного линейного напряжения на стороне НН — часовой стрелкой; тогда час, на который она указывает, определит группу соединения обмоток. Отсчет угла при этом ведется по направлению движения часовой стрелки, начиная с цифры 12; это ее положение означает, что угол фазного сдвига равен нулю. Наиболее распространены группы У/У — 12 и У/Д — 11.

Векторы вторичных и первичных фазных напряжений всегда параллельны друг другу, так как ЭДС данной фазы индуцируются одним и тем же магнитным потоком. Они могут либо совпадать по фазе, если обмотки намотаны в одну и ту же сторону (согласно), либо находиться в противофазе (со сдвигом на  $180^\circ$ ), если обмотки намотаны в разные стороны (встречно). Поэтому при соединении У/У векторы одноименных линейных напряжений также либо совпадают, либо направлены встречно, что соответствует в первом случае группе соединений У/У-12, во втором — группе У/У-6.

Несколько сложнее обстоит дело для группы У/Д (рис. 2.22). На схеме рис. 2.22,а показана схема соединения обмоток транс-

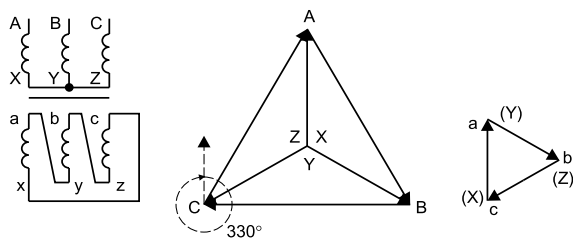


Рис. 2.22. Соединение обмоток трансформатора по схеме У/Д и векторные диаграммы напряжений

форматора, на рис. 2.22,б и 2.22,в — векторные диаграммы первичных и вторичных напряжений при данной схеме соединений и в предположении, что обмотки намотаны согласно. Для большей наглядности начала векторов  $AC$  и  $ac$  совмещены на рис. 2.22,б, где видно, что угол между ними равен  $330^\circ$ . То же, разумеется, относится и к двум другим парам линейных напряжений, и потому соединение рис. 2.22 следует отнести к группе У/Д-11. При встречной намотке обмоток и той же схеме соединений была бы получена группа У/Д-5.

#### 2.2.3.4. Проверка группы соединений трехфазных трансформаторов

Схема и группа соединений указываются на паспортном щитке трансформатора. При сомнении в достоверности или отсутствии этих данных производится их проверка на месте монтажа, чаще всего при помощи фазометра (прямой метод) или импульсов постоянного тока (метод поляромера).

*Метод фазометра* (прямой метод). Последовательную обмотку однофазного фазометра подключают через реостат к зажимам одной из обмоток, а параллельную — к одноименным зажимам другой обмотки испытуемого трансформатора. К этим зажимам подводится напряжение, достаточное для нормальной работы фазометра, силу тока в последовательной обмотке ограничивают до номинального значения посредством реостата. Группу соединения определяют по измеренному углу сдвига  $\varphi$  между векторами напряжений обмоток ( $\varphi/30$ ). У трехфазных трансформаторов производят не менее двух измерений (для двух пар линейных зажимов). Схема измерения угла показана на рис. 2.23.

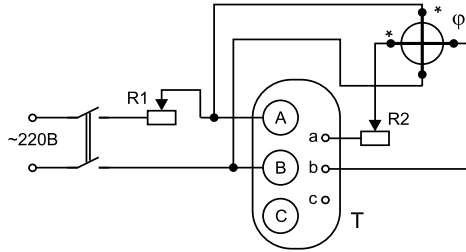


Рис. 2.23. Проверка группы соединения обмоток трехфазного трансформатора с помощью фазометра

Метод *импульсов* постоянного тока (метод поляромера). Используется для трансформаторов с выведенной нулевой точкой или при соединении обмоток Д/Д. К обмотке ВН подводится напряжение 2—12 В постоянного тока, к обмотке НН подключается стрелочный вольтметр магнитоэлектрической системы; при нуле в начале шкалы стрелку прибора следует сдвинуть вправо с помощью корректора. Батарею и прибор подключают к одноименным выводам обмоток зажимами одинаковой полярности (рис. 2.24) и отмечают отклонения стрелки прибора при включении батареи: отклонения вправо обозначаются знаком «+», влево «-». Полученные результаты сравнивают с данными табл. 2.1.

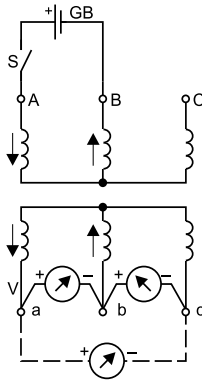


Рис. 2.24. Проверка группы соединения импульсным методом: GB — батарея; S — ключ; PV — вольтметр постоянного тока

Таблица 2.1

*Отклонение стрелки вольтметра при определении группы соединений трансформатора импульсным методом*

Питание подведено к выводам	Прибор присоединен к выводам					
	ab	bc	ca	ab	bc	ca
	Группа 0 (12)			Группа 11		
AB	+	–	–	+	0	–
BC	–	+	–	–	+	0
CA	–	–	+	0	–	+

### 2.2.4. Снятие векторных диаграмм

Снятие векторных диаграмм позволяет определить значения и угловые характеристики векторных величин. Это бывает необходимо, например, для проверки правильности включения щитовых ваттметров, счетчиков электроэнергии, автоматических регуляторов напряжения и пр. Положение векторов напряжений и токов определяется относительно известных «опорных векторов», в качестве которых обычно используется симметричная трехфазная система линейных или фазных напряжений. Соответствующие измерения производятся с помощью фазометров, ваттметров, вольтметров, вольтамперфазометров.

#### 2.2.4.1. Векторная диаграмма токов

Измеряют значение тока, которое должно быть не менее 20—30% номинального. При измерении однофазным *фазометром* «начало» обмотки напряжения (вывод, обозначенный звездочкой), подключают к фазе А, «конец» — к нулевому проводу. Токовую обмотку включают последовательно с нагрузкой, звездочкой — со стороны источника питания. Считывают измеренное значение угла и под этим углом к вектору напряжения  $U_A$  откладывают в принятом масштабе вектор тока  $I_A$ : в сторону отставания по фазе (вправо), если угол положительный, в сторону опережения (влево) — если он отрицательный. Аналогично строят векторы токов  $I_B$  и  $I_C$ .

При измерении *вольтамперфазометром* в качестве опорного принимают вектор линейного напряжения  $U_{AB}$ , от которого и отсчитывают угол: по часовой стрелке при индуктивной нагрузке (отставание), против — при емкостной. Значение угла считывают по лимбу, ток измеряют с помощью клещевой приставки.

При измерении однофазным *ваттметром* токовую обмотку включают последовательно с нагрузкой в цепь фазы А. Начало обмотки напряжения подключается поочередно на фазные напряжения, конец ее — к нулевому проводу. Далее на векторах фазных напряжений откладывают в выбранном масштабе отрезки, пропорциональные измеренным значениям мощностей с учетом их знаков, например  $P_{AA}$  и  $-P_{AC}$  на рис. 2.25,а. Если теперь из концов этих отрезков восставить перпендикуляры, то точка пересечения последних обозначит конец вектора тока  $I_A$  (отрезок  $P_{AB}$  на вектор  $U_B$  не нанесен, чтобы не усложнять чертеж). Аналогичным построением находят векторы токов  $I_B$  и  $I_C$  в цепях фаз В и С.

Фазовый сдвиг между током и напряжением можно, разумеется, определить и с помощью *осциллографа*.

#### 2.2.4.2. Векторная диаграмма напряжений

Векторную диаграмму неизвестной системы напряжений проще всего снять с помощью вольтметра, если только неизвестная система имеет опорную точку с системой опорных напряжений. На рис. 2.25,б показан пример построения вектора неизвестного напряжения  $U_X$ . С этой целью поочередно измеряются напряжения  $U_{XA}$ ,  $U_{XB}$  и  $U_{XC}$  между выводом X источника неизвестного напряжения и выводами опорной системы напряжений фаз А, В и С. Далее из концов векторов напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  опорной системы проводятся дуги окружностей радиусами, численно равными в принятом масштабе измеренным напряжениям (на рис. 2.25,б показаны два из них). Точка пересечения этих дуг будет концом

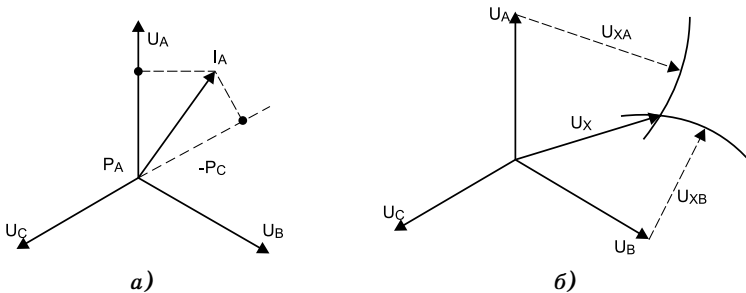


Рис. 2.25. Снятие векторных диаграмм тока и напряжения:  
 а — построение вектора тока фазы А; б — определение неизвестного вектора напряжения

вектора напряжения  $U_X$ , началом которого является общая точка обеих систем. При необходимости аналогичным образом могут быть построены другие вектора неизвестной системы.

Параметры найденного вектора можно определить непосредственно из диаграммы. Пусть, например, на рис. 2.25,б опорные напряжения будут  $U_A = U_B = U_C = 220$  В, показания вольтметра  $U_{XA} = 264$  В,  $U_{XB} = 176$  В. В масштабе, принятом для опорных напряжений, выбирается длина соответствующих радиусов, которыми проводятся дуги окружностей. Параметры вектора напряжения  $U_X$ , измеренные на диаграмме рис. 2.25,б, получаются следующими: значение напряжение  $U_X = 230$  В, угол фазного сдвига между опорным вектором  $U_A$  и найденным  $U_X$  составляет  $70^\circ$  в сторону отставания.

## 2.3. Проверка электромеханических аппаратов

Магнитные пускатели, контакторы постоянного и переменного тока, реле различного назначения выполняют функции включения — отключения, управления и защиты электроустановок. До недавнего времени эти функции осуществлялись контакторно — релейными аппаратами, коммутирующими цепи электрического тока механической контактной системой с помощью электромагнитов. В настоящее время проектируют и выпускают преимущественно бесконтактные реле, оставив за электромеханическими аппаратами функции выходных устройств, служащих для гальванического разделения цепей. Правда, и эта специфическая функция иногда осуществляется бесконтактным способом, например, оптическим путем. Тем не менее электромеханические аппараты все еще применяются в устройствах электроснабжения достаточно широко.

При наладке производятся следующие операции:

- проверка изоляции катушек и контактов;
- измерение сопротивления катушек постоянному току;
- регулировка механической части;
- проверка и настройка под напряжением.

*Сопротивление изоляции* целесообразно проверять совместно со схемой в целом, мегаомметром на 1000 В, а в цепях, рассчитанных на рабочее напряжение 60 В и ниже, мегаомметром на 500 В. Наименьшее допустимое значение сопротивление изоляции составля-



ет 1 МОм, для цепей 60 В и ниже — 0,5 МОм (ПУЭ 1.8.37.1). Пониженное сопротивление изоляции катушек может быть следствием увлажнения или обугливания, ухудшение изоляции контактов происходит из-за подгорания, влияния агрессивной среды или скопления токопроводящей пыли. Подсушить катушку можно теплым воздухом при температуре 60—70° или включением ее на пониженное напряжение.

*Сопротивление катушки* постоянному току измеряют с целью ориентировочной проверки обмоточных данных. При этом точность до 2—3% можно считать достаточной. Катушку считают пригодной, если измеренное сопротивление не выходит за пределы 90—115% значения, указанного в документах изготовителя, при той же температуре. Полученное значение сопротивления следует привести к контрольной температуре с помощью формулы

$$R_2 = R_1 \frac{T_2 + 235}{T_1 + 235},$$

где  $R_1$  — значение сопротивления, измеренное при температуре  $T_1$  (у изготовителя);  $R_2$  — значение сопротивления, измеренное при температуре  $T_2$  (на месте монтажа);  $235 = 1/\alpha$ ;  $\alpha = 0,0042$  — температурный коэффициент сопротивления для меди.

При отсутствии паспортных данных сравнивают результаты измерений сопротивления катушек одинаковых аппаратов. Измерения производят выборочно или в сомнительных случаях.

*Регулировка механической части.* Состояние механической части в целом оценивается внешним осмотром и путем сравнения с другими аппаратами данного типа. Отсутствие затирания подвижной системы проверяется подтягиванием и отпуском якоря, после чего система должна свободно и четко возвращаться в исходное положение. Если люфт в осях отсутствует или превышает 0,15—0,20 мм, контактный мостик следует заменить. Зазор между полкой втянутого якоря и магнитопроводом не должен превышать 0,6—0,7 мм. Упоры должны быть надежно зафиксированы: положение одного из них определяет ток срабатывания реле, другого — коэффициент возврата. Работа контактов проверяется по следующим факторам.

Контакты должны касаться *линейно* по всей ширине, без просветов. Перекатывание и взаимное скольжение силовых контактов, разрыв дуги вне зоны их длительного касания способствуют очистке контактных поверхностей от окислов и снижению пере-

ходного сопротивления контактов. На мощных и ответственных контакторах производится проверка растворов, провалов и нажатий главных и вспомогательных контактов.

*Раствор* контактов — кратчайшее расстояние между разомкнутыми контактами. Измеряется с помощью щупов. У контакторов с искрогашением раствор главных контактов измеряется в момент касания искрогасительных, для чего якорь вручную медленно подводится к сердечнику. Регулирующим элементом является пара винт — гайка 1 (рис. 2.26,а). При изменении положения гайки на винте изменяется и расстояние А, то есть раствор контактов.

*Провал* контакта — это расстояние, на которое может сместиться место касания контактов, если неподвижный контакт удалить. У изношенных контактов пережат практически отсутствует, провал становится ниже допустимых значений; контакты сильно нагреваются и окисляются. Для дальнейшей эксплуатации контактной системы провал необходимо восстановить.

Провал контакта В (рис. 2.26,б) регулируется ходом якоря, а следовательно, и траверсы 2, на которой закреплен подвижный контакт. Поскольку непосредственно измерить провал практически невозможно, контролируют какой-либо другой размер, жестко связанный с провалом. Считается, что контакт следует заменить, если этот размер уменьшился вдвое против первоначального.

*Начальное сжатие* — это усилие, создаваемое контактной пружиной в точке первоначального касания контактов и характеризующее упругость пружины в свободном состоянии. Для оценки этого усилия помещают между контактами полоску папиросной бумаги и с помощью динамометра оттягивают подвижный контакт

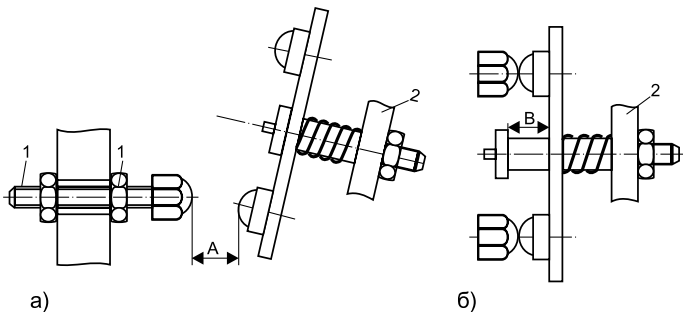


Рис. 2.26. Регулировка раствора (А) и провала (В) контактора

## 2. Регулирование и контроль электрических величин

до освобождения полоски. Аналогично проверяют и конечное нажатие.

*Конечное нажатие* характеризует давление контактов при полностью включенном аппарате. При слабом нажатии контакты подгорают, при повышенном — работают нечетко.

Значения указанных параметров регламентируются изготовителем.

Контакты с *дефектами* поверхности (царапины, пригар, окислы, капли металла) зачищают бархатным напильником и полируют воронилом (гладкой стальной пластиной). Загрязненные контакты достаточно почистить дощечкой из дерева нехвойных пород. Нельзя протирать контакты керосином, бензином и т. п. жидкостями, от которых остается плохо проводящий налет.

*Ход* контактов до замыкания должен быть ограничен во избежание их отбрасывания при срабатывании и увеличения времени срабатывания. Подвижный контакт должен коснуться неподвижного, пройдя от его переднего края примерно  $1/3$  длины контакта, и далее еще  $1/3$  так, чтобы исключить возможность заскакивания в торец неподвижных контактов. Мостики подвижных контактов должны свободно поворачиваться на своих осях. Контактная пружина неподвижного контакта должна касаться переднего упора без давления.

Качество контактных соединений коммутационных аппаратов можно ориентировочно оценить путем сравнения их сопротивления с усредненными данными рис. 2.27 или аналогичных аппаратов.

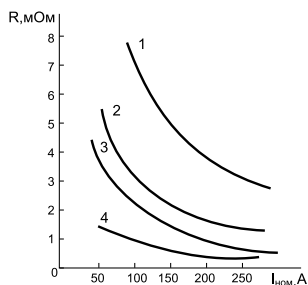


Рис. 2.27. Ориентировочные значения сопротивления исправных контактных соединений коммутационных аппаратов:  
1 — магнитные пускатели; 2 — автоматы и контакторы;  
3 — предохранители

*Электрические характеристики.* При проверке реле и контакторов переменного тока следует обеспечить синусоидальную форму испытательного напряжения (тока). Регулируют напряжение с помощью потенциометров или автотрансформаторов, для получения постоянного тока в схему испытания вводят выпрямитель (мост). Начинают проверку с измерения напряжения (тока) втягивания и возврата, затем определяют коэффициент возврата ( $k_B$ ) — отношение значения величины возврата к значению величины срабатывания:  $k_B < 1$  у контакторов, промежуточных и максимальных реле,  $k_B > 1$  у минимальных реле. Напряжение следует изменять плавно, замыкание и размыкание контактов должно быть четким. Повышенное напряжение втягивания якоря может быть вызвано повышением числа витков катушки, увеличением воздушного зазора, затиранием контактной системы и др. Знание напряжения отпадения позволяет оценить надежность удерживания контактора или промежуточного реле во включенном положении при снижении напряжения питающей сети.

При изменении напряжения плавно и толчком убеждаются в отсутствии гудения и вибрации подвижной системы аппарата. Причинами гудения могут быть: неплотное прилегание якоря к ярму, повышенная жесткость контактных пружин, несоответствие обмоточных данных каталожным, нарушение шихтовки магнитопровода. У максимальных реле напряжение (ток) поднимают до 120% номинального напряжения или до максимально возможного значения тока. У минимальных реле проверка производится в обратном порядке — от максимума до уставки. Затем вновь измеряют параметры срабатывания и возврата и, если они не изменились, считают реле пригодным к эксплуатации. Для уменьшения вибрации контактов реле минимального напряжения вводят якорь глубже под полюса, а у максимального токового реле увеличивают совместный ход контактов.

Особенностью контакторов переменного тока является значительное увеличение индуктивности катушки по мере уменьшения воздушного зазора при срабатывании. В момент включения индуктивное составляющая сопротивления катушки мала, при подтянутом якоре становится преобладающей. Поэтому ток включения на порядок превышает установившееся значение, а нагрев обмотки мало влияет на напряжение втягивания. Эту особенность надо учитывать при проверке напряжения втягивания, чтобы не перегреть обмотку и регулировочные устройства током включения.

## 2. Регулирование и контроль электрических величин

Напротив, сопротивление катушек аппаратов постоянного тока существенно зависит от температуры, которая таким образом влияет на параметры срабатывания. Требуемые нормативными документами значения напряжения включения относятся к максимальной температуре катушки, которая принимается обычно равной 70°C, во время наладки же измерения проводятся при более низкой температуре и поэтому нормируемые значения должны быть снижены. В соответствии с температурной зависимостью сопротивления значения напряжения срабатывания аппарата связаны соотношением

$$U_x = U_r \frac{235 + T_x}{305},$$

где  $U_x$  — напряжение втягивания в холодном состоянии при температуре  $T_x$ ;  $U_r$  — напряжение втягивания в горячем состоянии при температуре 70 °С. Для удобства пользования эта зависимость представлена в графическом виде на рис. 2.28. Если, например, нормируется предельное значение напряжения втягивания контактора 90% номинального, то при 20 °С отношение  $U_x/U_r = 0,84$  и требуемое значение напряжения должно быть не выше  $0,84 \cdot 90\% = 76\%$  номинального. Так, при напряжении сети оперативного тока 220 В напряжение втягивания должно быть не выше 167 В, а с учетом необходимого запаса (колебания напряжения и пр.) в 3...5% можно принять 160 В.

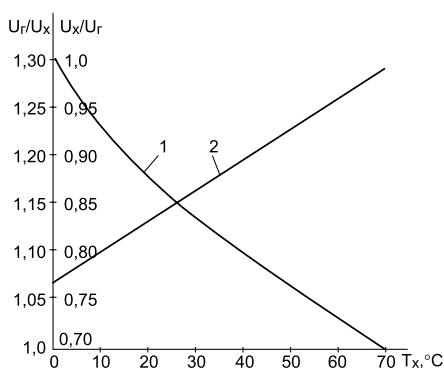


Рис. 2.28. Зависимость значений напряжения срабатывания от температуры окружающей среды

Значение  $T_x$  принимается равным температуре окружающей среды, измеренной на расстоянии 1...2 м от аппарата. Напряжение (ток) срабатывания измеряют дважды — при различной полярности напряжения на катушке, если не предусмотрена работа только при одной полярности.

Контакты и автоматические выключатели испытываются по пять раз на включение при 90% и на отключение при 80% напряжения оперативного тока. Нормальное функционирование полностью собранных релейно-контакторных схем должно обеспечиваться при 90 и 100% напряжения оперативного тока. Для простых схем кнопка — магнитный пускатель проверка работы на пониженном напряжении не производится (1.8.37).

## 2.4. Полупроводниковая элементная база

### 2.4.1. Основные понятия

Рассмотренные выше электромеханические коммутационные аппараты позволяют реализовать все функции релейной защиты, однако имеют ряд недостатков:

- большая мощность, потребляемая от измерительных трансформаторов;
- наличие подвижных частей и контактов, ограничивающих срок службы и снижающих надежность реле;
- относительно низкая вибростойкость;
- значительные масса и габариты.

Существенной особенностью и преимуществом полупроводниковых элементов является отсутствие подвижных частей и контактов. Поэтому построенные на полупроводниковой базе реле и аппараты в целом называют бесконтактными или *статическими* (хотя иногда в качестве выходных органов и применяются контактные реле). Такие устройства имеют более высокие чувствительность и быстродействие, меньшие собственное потребление, габариты и массу, отличаются стабильностью параметров, большим сроком службы, нечувствительностью к ударам и вибрациям, просты в обслуживании и практически не требуют ремонта. В качестве базовых элементов служат диоды и транзисторы, логические элементы, интегральные микросхемы (аналоговые и цифровые) и микропроцессоры.

Для создания полупроводниковых приборов в чистые полупроводники (германий, кремний и др.) вводят специальные примеси, позволяющие резко увеличить собственную проводимость за счет появления дополнительного количества свободных носителей зарядов — отрицательных (электронов) или положительных («дырок»). В зависимости от преобладания тех или иных носителей различают полупроводники электронного, или n-типа, и дырочного, или p-типа (от латинского *negativus* — отрицательный; *positivus* — положительный). Промежуточный слой между двумя областями разного типа носит название p-n перехода и обладает вентильными свойствами. Если источник напряжения подключить «плюсом» к p-области, сопротивление перехода буде невелико, и через него пройдет ток, называемый *прямым*. При обратной полярности сопротивление перехода оказывается во много раз большим, и ток через него, называемый *обратным*, будет весьма мал.

### 2.4.2. Диоды

Простейшие полупроводниковые приборы — *диоды* содержат один p-n переход и, соответственно, два электрода — анод и катод. Наиболее распространены выпрямительные, импульсные и опорные диоды. Одним из основных параметров выпрямительных диодов является номинальный ток. Это максимально допустимое по нагреву при длительной работе значение постоянного или среднего за период прямого тока. Другим классификационным параметром является номинальное обратное напряжение, или просто номинальное напряжение, которое для большинства диодов составляет до 80% пробивного напряжения. Дифференциальное сопротивление диода — это отношение приращений напряжения и прямого тока, которое можно определить из их вольт-амперной характеристики или из соотношения  $R_d = 26/I_{пр}$ , Ом, где  $I_{пр}$  — прямой ток, mA (при 20°C).

Обратное сопротивление диода находят как отношение обратного напряжения и обратного тока, причем следует учитывать, что это сопротивление увеличивается в 2—3 раза на каждые 10°C повышения температуры.

*Импульсные* диоды используются в качестве переключающих элементов. Длительность переходных процессов в импульсных диодах намного меньше, чем в выпрямительных. Классификационными параметрами являются максимальные значения обратного тока и напряжения.

Опорные диоды, или *стабилитроны*, служат для поддержания или ограничения напряжения на определенном уровне. Падение напряжения на стабилитроне лишь незначительно изменяется при изменении в широких пределах проходящего через него тока (область электрического пробоя). Напряжение стабилизации  $U_{ст}$  является основным классификационным параметром стабилитрона. Важным параметром является также температурный коэффициент напряжения стабилизации  $TKН = (\Delta U_{ст}/\Delta T)100\%$ , который показывает, на сколько процентов изменится напряжение стабилизации прибора при изменении его температуры на  $1^\circ\text{C}$ . К основным параметрам относят и дифференциальное сопротивление  $R_d = \Delta U_{ст}/\Delta I_{ст}$ , где  $U_{ст}$  и  $I_{ст}$  — приращения напряжения и тока на рабочем участке характеристики стабилитрона.

*Переключающие диоды* изготавливаются на основе четырехслойной полупроводниковой структуры p-n-p-n типа с тремя p-n-переходами. В рабочем режиме такого прибора плюс напряжения подается на крайнюю p-область (анод), минус — на крайнюю n-область. Если у прибора сделаны только эти два вывода, то он называется *динистором*. При определенном значении напряжения между анодом и катодом (напряжение включения) падение напряжения на динисторе резко снижается.

У управляемых переключающих диодов — *тиристоров* (тринисторов) ко второй p-области подключается управляющий электрод. Тиристор открывается в прямом направлении только при условии, когда на управляющий электрод подан положительный (по отношению к катоду) потенциал. После снятия отпирающего сигнала постоянный ток в цепи анод-катод не прекратится, и в большинстве случаев тиристор может быть заперт только подачей обратного напряжения или прерыванием тока с помощью коммутационного аппарата. Исключение составляет ограниченная номенклатура тиристоров, которые могут запираются по цепи управления. На переменном токе прибор будет запирается каждый раз при прохождении тока через нулевое значение, и для его повторного отпираания следует подавать отпирающий сигнал. Если этот сигнал подается в момент появления положительного напряжения на аноде, то в нагрузке выделится полное выпрямленное напряжение, если же отпирающий сигнал сдвигать по фазе от этого момента в сторону отставания, выходное напряжение будет уменьшаться. Таким способом регулируется выходное напряжение тиристорных источников питания переменного или выпрямленного



тока. Тиристоры применяются также в качестве выходных каскадов силовых ключей.

*Симистор* (симметричный тиристор) представляет собой эквивалент встречно-параллельного соединения двух тиристоров и способен поэтому пропускать ток в обоих направлениях.

*Оптронный* тиристор управляется с помощью светового сигнала.

Основными классификационными параметрами тиристоров являются средний ток в открытом состоянии и максимальное значение допустимого обратного напряжения, число сотен вольт которого условились называть классом прибора (1-й класс — 100 В, 8-й класс — 800 В и т. д.) Диапазон номинальных значений параметров тиристоров весьма широк: ток от 1 А до нескольких тысяч ампер, напряжение от 50 В до нескольких тысяч вольт.

### 2.4.3. Транзисторы

*Транзисторы* (биполярные) имеют три области разных типов проводимости и два р-п перехода между ними. В зависимости от проводимости крайних областей различают транзисторы р-п-р и п-р-п типа (рис. 2.29). Крайние области биполярного транзистора носят названия эмиттер (Э) и коллектор (К), средняя — база (Б). Эквивалентную схему такого транзистора можно представить в виде двух диодов, одноименные электроды которых соединены друг с другом и представляют базу, а другие два вывода — анод и катод (рис. 2.29,а). На одноименные выводы транзисторов разных типов проводимости подаются напряжения противоположной полярности (рис. 2.29,б). Управляются биполярные транзисторы током базы.

Различают три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК) — в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей. Чаще других применяется схема ОЭ.

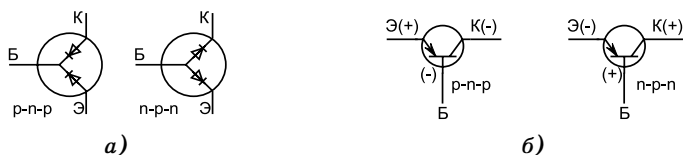


Рис. 2.29. Эквивалентная диодная схема (а) и полярность электродов (б) биполярного транзистора при включении его в схему (открыт)

В рабочем режиме транзисторов большая часть тока эмиттера  $I_э$  проходит к коллектору, ток которого  $I_к = \alpha I_э$ , где  $\alpha = 0,90 - 0,997$  — коэффициент передачи эмиттерного тока, иначе — коэффициент усиления по току в схеме ОБ. Остающаяся часть тока эмиттера образует ток базы  $I_б$ , так что  $I_к = I_э - I_б = \beta I_б$ . Здесь  $\beta = 10 - 350$  — коэффициент усиления по току в схеме ОЭ.

Возможны два предельных режима работы транзистора: режим отсечки и режим насыщения. В режиме *отсечки* прибор заперт и эмиттерный ток, а также ток коллектора близки к нулю. Режим *насыщения* наступает тогда, когда при увеличении тока базы прибор полностью открывается и ток коллектора перестает возрастать, достигнув максимального значения. В первом случае сопротивление транзистора чрезвычайно велико, во втором — близко к нулю.

Когда эти режимы чередуются, говорят, что прибор работает в режиме ключа, или переключателя, аналогично контактам электро-механического реле. Параметрами предельных режимов являются:

- максимальная мощность, рассеиваемая прибором;
- максимальный ток коллектора;
- максимальное обратное напряжение между электродами.

Если требуется повысить выходную мощность, используют составные транзисторы или каскадное соединение приборов. Параллельное включение биполярных транзисторов путем непосредственного соединения электродов недопустимо, так как ток может распределиться между ними неравномерно: следует ввести в эмиттерные цепи небольшие сопротивления, выравнивающие токи.

На основе транзисторов строятся типовые схемные узлы, усилители и переключатели, а также источники питания, стабилизаторы, релейные элементы. Транзисторные устройства релейного действия выполняются обычно на основе усилителей постоянного тока с положительной обратной связью. К таким устройствам принадлежат, в частности, триггеры и нуль-индикаторы.

*Симметричный триггер* срабатывает при подаче короткого управляющего сигнала и остается в этом состоянии до подачи сигнала на возврат, т. е. имеет два устойчивых состояния. *Одновибратор* может сколь угодно долго находиться только в одном устойчивом состоянии, из другого же через некоторое время возвращается в исходное состояние. *Нуль-индикатор* срабатывает в случае

изменения знака управляющего сигнала. В *реле времени* используют заряд конденсатора через резистор с большим сопротивлением.

Наряду с биполярными транзисторами, управляемыми электрическим током, большое распространение получили *полевые* (*униполярные, канальные*) транзисторы, управляемые электрическим полем (напряжением). Основное их преимущество — очень высокое входное сопротивление, достигающее  $10^{15}$  Ом, и большое усиление по току и мощности. Полевой транзистор состоит из полупроводникового стержня (канала), на поверхности которого с противоположных сторон формируются р-п переходы. Вывод с торца канала, от которого носители заряда начинают свой путь, называется *истоком*, другой, к которому они приходят, — *стоком*, а вывод от р-п перехода — *затвором*. Поперечное сечение канала проводимости, а следовательно, его сопротивление, можно изменить посредством электрического поля, создаваемого затвором. Проводящий канал при этом можно уподобить регулируемому резистору. Управление и усиление тока в полевом транзисторе осуществляется носителями заряда одного знака, откуда и одно из его названий — униполярный.

Лучшие качества полевого транзистора обеспечиваются в случае, когда затвор отделен от канала тонким изолирующим слоем, не препятствующим проникновению поля в канал. Такие структуры называют полевыми транзисторами с изолированным затвором. В отличие от полевых транзисторов с р-п переходом, эти приборы могут работать при любой полярности напряжения на затворе. Приборы с использованием слоев металла в качестве затвора, окисла (двуокись кремния) как изолятора и полупроводника (кремния) для создания канала тока получили название *МОП-транзисторов* (металл — окисел — полупроводник). Так же как и биполярные, полевые транзисторы могут работать в режимах отсечки и насыщения, включаться по схеме с общим истоком, с общим стоком или общим затвором (по аналогии с ОЭ, ОК, или ОБ), использоваться в схемах усилителей, переключателей и др., в схемах логики. Сочетание полевого и биполярного транзисторов позволяет получить приборы с высоким коэффициентом усиления и малым выходным сопротивлением. Полевые приборы одного типа можно соединять параллельно.

К числу недостатков полевых транзисторов относится значительное активное сопротивление в открытом состоянии, которое с повышением допустимого напряжения сток-исток более

250—300 В достигает нескольких ом. Кроме того, этим приборам свойственно наличие паразитных эффектов, наиболее существенный из которых проявляется как включение диода параллельно силовым электродам транзистора и особенно влияет на протекание переходных процессов в схеме.

*Однопереходный транзистор* имеет один p-n переход и три электрода — эмиттерный и два базовых. Отличительная особенность этого прибора — наличие области отрицательного сопротивления на его вольт-амперной характеристике (падающий участок N-образной характеристики). Его часто применяют в схемах задания временных интервалов, в триггерах, мультивибраторах, стабилизаторах, а также для запуска силовых ключей. От обычных транзисторов прибор отличается более высокой надежностью, стабильностью напряжения включения и возможностью передачи мощных импульсов.

Комбинированный транзистор *типа IGBT*, состоящий из управляющего полевого и выходного биполярного каскадов, удачно сочетает преимущества того и другого типа транзисторов при работе их в режиме ключа. Сокращенное название этого типа приборов происходит от английского Insulated Gate Bipolar Transistor — *биполярный транзистор с изолированным затвором*. Условное обозначение транзистора IGBT, отражающее наличие в его составе полевой и биполярной частей, показано на рис. 2.30.

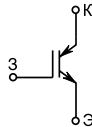


Рис. 2.30. Условное обозначение транзистора IGBT: З — затвор, К — коллектор, Э — эмиттер

Быстродействие IGBT ниже, чем полевых транзисторов, но выше, чем биполярных. При переключении нельзя превышать допустимую скорость изменения напряжения на коллекторе во избежание так называемого «зашелкивания» биполярной части транзистора, когда она переходит в режим открытого тиристора. В этом случае закрыть прибор сигналом управления невозможно, и он может сгореть. Фирмы-производители выпускают IGBT приборы, рассчитанные на разные частотные режимы работы. В технических условиях на конкретный прибор приводятся кривые, отража-

## 2. Регулирование и контроль электрических величин

ющие соответствие допустимых значений рабочей частоты и максимального тока при различной форме коллекторного тока, как показано, например, на рис. 2.31. Превышать нормированные значения напряжения нельзя, по току же транзисторы IGBT выдерживают кратковременные перегрузки вплоть до 10-кратных. Допустимое значение длительного (постоянного) тока коллектора нормируется для температуры корпуса 25 и 100°C и в этом диапазоне изменяется примерно вдвое. Транзисторы одного типоминнала можно соединять параллельно без выравнивающих резисторов в цепи эмиттера.

IGBT транзисторы выпускаются на номинальные значения напряжения и тока того же порядка, как и мощные силовые тиристоры, что в большинстве случаев делает эти приборы вполне конкурентоспособными, а часто и предпочтительными ввиду того, что для их записания на постоянном токе не требуется специальных устройств и схемы в целом реализуются значительно проще, чем с тиристорами; правда, IGBT несколько дороже.

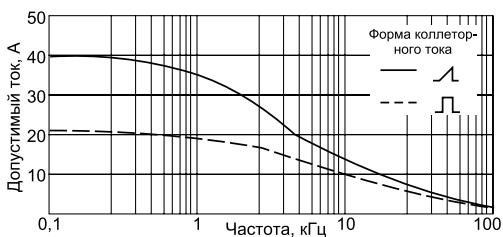


Рис. 2.31. Зависимость максимально допустимого тока коллектора от частоты переключения для транзистора IRG4DC30F

### 2.4.4. Логические элементы

Известное распространение получили схемы, выполненные на стандартных логических элементах. Эти элементы имеют один или несколько входов (до 8) и один выход и только два уровня входных и выходных сигналов, которые условно называют «1» (единица) и «0» (нуль). Элементы с одним входом или не изменяют состояния входного сигнала (*буфер*), или осуществляют дополнение логического состояния (изменение его на обратное), т. е. логическая 1 на входе вызывает логический 0 на выходе, и наоборот (*инвертор*). Состояние выходного сигнала логических элементов с не-

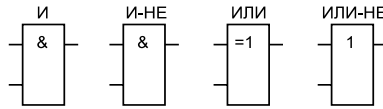


Рис. 2.32. Основные логические функции и графическое обозначение соответствующих логических элементов

сколькими входами зависит от сочетания входных сигналов. Инвертирование обозначается кружочком на выходе при графическом отображении элемента (рис. 2.32) и чертой над буквенным символом.

На выходе элемента **И** логическая единица появляется, если все входы одновременно находятся в том же состоянии 1, а все прочие комбинации входных сигналов приводят к логическому 0 на выходе. *Элемент И-НЕ* — это элемент **И** с инвертируемым выходом (кружок на выходе); когда все входы одновременно находятся в состоянии логической 1, на выходе образуется логический 0. На выходе *элемента ИЛИ* появляется логическая 1, если хотя бы один из входов находится в состоянии логической 1. Сигнал 0 на выходе может появиться лишь при условии наличия 0 на всех входах. *Элемент ИЛИ-НЕ* представляет собой элемент **ИЛИ** с инвертированным выходом. Все возможные состояния входов и выходов логических элементов в отдельности или их комбинаций описываются *таблицей истинности*

Серия диодно-транзисторных элементов типа «Логика-Т» была построена на транзисторных переключателях. Однако диодно-транзисторные и транзисторные логические схемы широкого распространения не получили, так как не удовлетворяли возросшим требованиям в части собственного потребления, габаритов, надежности и стоимости. Существенные преимущества обеспечило внедрение микроэлектронных элементов и комплектных устройств на базе интегральных микросхем (ИМС).

### 2.4.5. Интегральные микросхемы

*Интегральные микросхемы* и защиты на базе ИМС отличаются от аналогичных по назначению устройств на электромеханических реле или диодно-транзисторных элементах значительно меньшим потреблением мощности, меньшими габаритами и общей стоимостью, большей стабильностью параметров и точностью, надежностью, расширенным диапазоном уставок и др., проще в на-

ладке и эксплуатации. ИМС — это помещенная в единый герметизированный корпус электрическая цепь, в которой функции отдельных элементов (диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов) или их совокупностей выполняют области из проводящих, полупроводниковых и диэлектрических материалов. В зависимости от выполняемых функций ИМС подразделяют на *логические (цифровые)* и *аналоговые*. Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам дискретных функций. Логические ИМС являются одним из видов цифровых микросхем и характеризуются двумя уровнями выходного напряжения, соответствующими «0» и «1» двоичной системы. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам непрерывных функций, и характеризуются непрерывностью входных и выходных сигналов.

Основным элементом *аналоговой* микроэлектроники являются *усилители*. Усилитель — это активный четырехполюсник, характеризующийся коэффициентом усиления и входным и выходным сопротивлениями. Изображается в виде прямоугольника или треугольника (рис. 2.33). Наиболее часто применяются *дифференциальные* усилители (рис. 2.33,а). Основная задача — получить на выходе напряжение, пропорциональное разности потенциалов на входах:  $U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}) K_u$ , где  $K_u$  — коэффициент усиления по напряжению. Выходное напряжение снимается либо с одного из выходов (несимметричное включение нагрузки), либо между ними подключается нагрузка (симметричное включение). Поскольку оба входа находятся в одинаковых условиях, коэффициент усиления почти не зависит как от абсолютных значений потенциалов на входах, так и от изменения внешних условий. Но в силу того, что параметры входных цепей полностью идентичными быть не могут, потенциалы коллекторов будут несколько различаться. Для их выравнивания на вход усилителя подают регулируемое напряжение смещения. При небольших значениях входного напряжения передаточные характеристики усилителя близки к линейным, при достаточно больших входных сигналах он переходит в режим насыщения и может быть использован в схемах ограничителя, триггера Шмитта, мультивибраторов.

*Операционный усилитель* (рис. 2.33,б) — это высококачественный усилитель напряжения с очень большим коэффициентом усиления, высоким входным и низким выходным сопротивлением. С помо-

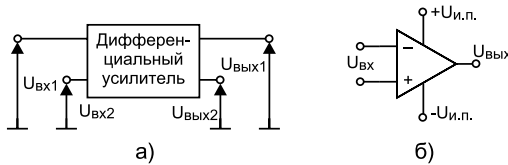


Рис. 2.33. Условные обозначения дифференциального (а) и операционного (б) усилителей

стью обратных связей можно реализовать самые разнообразные функции. Операционный усилитель, охваченный соответствующей обратной связью, может не только выполнять основные математические операции (откуда и его название), но и служить в качестве усилителя постоянного или переменного тока, активного фильтра, компаратора, генератора и др. При этом передаточная характеристика такого устройства определяется конфигурацией и параметрами цепей обратной связи и почти не зависит от самого усилителя. Усилитель имеет два входа и один выход. Один из входов усилителя называется неинвертирующим и обозначается знаком (+), другой — инвертирующим и обозначается знаком (-). При подаче сигнала на вход (+) выходной сигнал совпадает по фазе (полярности) с входным, а если усиливаемый сигнал подается на вход (-), то выходной сигнал оказывается в противофазе с ним. Коэффициент усиления по напряжению зависит от схемы включения (рис. 2.34).

При расчете коэффициента усиления полагают, что входное сопротивление и коэффициент усиления собственно операционного усилителя (при разомкнутой цепи обратной связи) бесконечно велики, потенциал входа (-) равен нулю, входное сопротивление равно  $Z_1$  и весь входной ток протекает в цепи обратной связи:  $I_1 = I_{oc}$ .

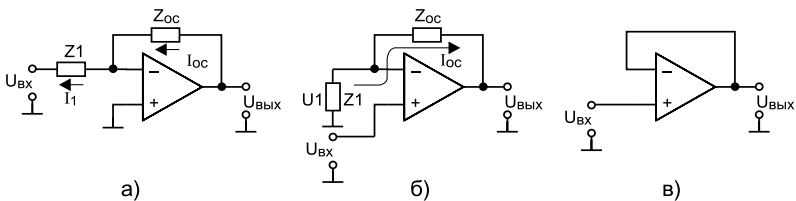


Рис. 2.34. Характерные схемы включения операционных усилителей с обратной связью: а — инвертирующий усилитель; б — неинвертирующий усилитель; в — повторитель напряжения



## 2. Регулирование и контроль электрических величин

---

Тогда для схемы инвертирующего усилителя (рис. 2.34,а) получим

$$\frac{U_{\text{вх}}}{Z_1} = -\frac{U_{\text{вх}}}{Z_{o.c}}$$

и коэффициент усиления

$$K_u = -\frac{Z_{o.c}}{Z_1}.$$

Для неинвертирующего усилителя (рис. 2.34,б)

$$\frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_{\text{вых}} - U_1}{Z_{o.c}}$$

и коэффициент усиления

$$K_u = \frac{Z_{o.c}}{Z_1}.$$

Очевидно, что повторитель напряжения (рис. 2.34,в) имеет коэффициент  $K_u = 1$ . Этот тип схемы называется буфером. Напряжение на его выходе совпадает по фазе с напряжением на входе.

Сопrotивление  $Z$  имеет в общем случае комплексный характер, т. е. может содержать как активную, так и реактивную (обычно емкостную) составляющую (рис. 2.35). Эти компоненты определяют не только значение коэффициента усиления (точнее, коэффициента передачи), но и изменение выходного напряжения по времени. Если сопротивления в цепи обратной связи и на входе чисто активные, то усилитель называется *пропорциональным*, или *масштабным*; его выходное напряжение изменяется пропорционально входному и одновременно с ним. На скачкообразный входной сигнал такой усилитель реагирует скачком напряжения на выходе (рис. 2.35,а). Если в цепи обратной связи заменить резистор  $R_{oc}$  конденсатором  $C_{oc}$ , то получим *интегрирующий* усилитель, или *интегратор* (рис. 2.35,б); вследствие постепенного заряда емкости выходное напряжение будет непрерывно изменяться, пока напряжение на входе отличается от нуля. Если входной сигнал подавать длительно, напряжение на выходе усилителя может достигнуть максимального значения и сохраняться до тех пор, пока входной сигнал не изменит свой знак. Введением конденсатора во входную цепь получают *дифференцирующий* усилитель, или *дифференциатор*; выходное напряжение идеального дифференциатора пропорциона-

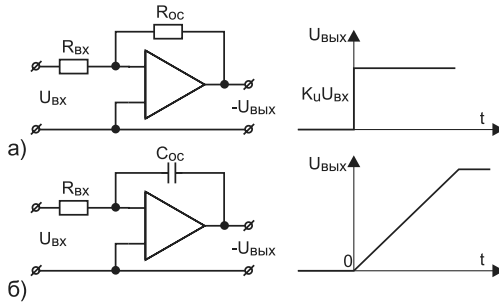


Рис. 2.35. Принципиальные схемы и реакция на скачкообразное изменение входного напряжения пропорционального (а) и интегрирующего (б) усилителей

льно производной (скорости изменения) входного сигнала. В цепь обратной связи и на вход могут быть введены и нелинейные (например, диоды) и даже активные (например, транзисторы) элементы, обеспечивая построение компараторов, нуль-органов и т. п.

*Цифровая* электроника выполняет более сложные операции с дискретными сигналами. Одним из базовых элементов цифровой схемотехники является *триггер*. Это устройство может неопределенно долго находиться в одном из двух устойчивых состояний (с 0 или 1 на выходе). Таким образом, триггер может служить элементом *памяти*, хранящем 1 бит информации, а  $n$  триггеров могут хранить  $n$ -разрядное двоичное *число (слово)*. Главная выходная линия  $Q$  имеет высокий уровень в состоянии 1 и низкий в состоянии 0 (положительная логика). На вторую выходную линию выводится, как правило, дополнение  $Q$ . Существуют два типа триггеров: синхронизируемые (синхронные) и несинхронизируемые (асинхронные). У синхронного триггера по одной из входных линий поступают синхроимпульсы, позволяющие изменять состояние триггера только в определенные моменты времени. На рис. 2.35.1 показаны *асинхронные RS-* триггеры, выполненные на логических схемах, а также таблицы истинности для них. Символ  $R$  обозначает сброс (от англ. reset), т. е. переход линии  $Q$  к состоянию 0, а символ  $S$  (от англ. set) — установку, т. е. переход линии  $Q$  к уровню 1; символ  $Q$  означает дополнение  $Q$ .

Как видно из таблицы истинности на рис. 2.35.1, в (последняя строка), такой триггер имеет существенный недостаток: невозможно предсказать состояние, в котором он останется после пода-

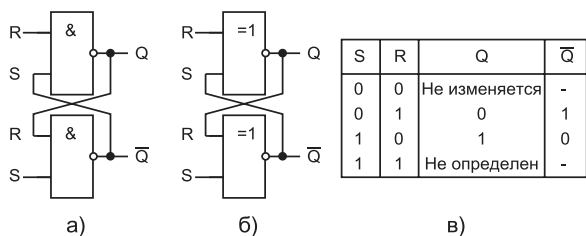


Рис. 2.35.1. RS-триггеры на двух логических элементах И-НЕ (а), ИЛИ-НЕ (б) и таблица истинности (в)

чи логической 1 на оба входа одновременно. Этого недостатка лишены синхронные триггеры, из которых наиболее часто встречаются JK-триггер. Триггер имеет два синхронизируемых входа J и K, два прямых входа PR- (пред)установка и CLR — очистка (сброс), вход синхронизации CLOCK (иногда обозначается русской аббревиатурой СИ — синхроимпульс) и два дополняющих выхода. Входы J и K действуют аналогично входам S и R асинхронного RS-триггера, но только по разрешению синхроимпульса. D-триггер имеет два основных входа: D (от delay — задержка или data — данные) и CLOCK. Выходное состояние триггера может изменяться только в те моменты, когда меняется состояние сигнала синхронизации. Предусматриваются также вспомогательные входы для прямой установки PR или сброса CLR триггера (рис. 2.36). Этот триггер используется преимущественно как однобитная защелка данных. В ней состояние входа D передается на выход Q по нарастающему фронту сигнала синхронизации, а его спадающий фронт на выход воздействия не оказывает. Обычные D-триггеры синхронизируются нарастающим фронтом CLOK, а JK-триггеры — спадающим фронтом.

Несколько триггеров, соединенных так, что цифровые данные можно сдвигать из данного разряда в соседний, называются *сдвиговым регистром*.

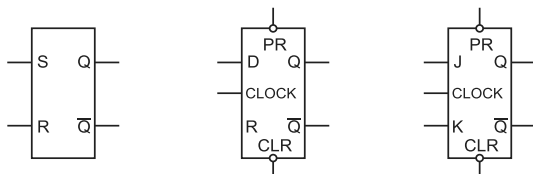


Рис. 2.36. Условные графические обозначения RS-, D- и JK-триггеров

Наиболее широко применяется регистр на JK-триггерах (рис. 2.37). Данные сдвигаются вправо по спадающему фронту каждого синхронизирующего сигнала, так что за три полных такта логический сигнал  $W$  передается со входа первого разряда на выход  $C$  последнего, в данном случае третьего, разряда. Аналогично тому, как в десятичной системе счисления можно умножать и делить числа на степень 10, сдвигая запятую, двоичные числа можно умножать и делить на степень 2 путем сдвига вправо или влево в регистре. Регистр позволяет преднамеренно задерживать информацию в зависимости от числа разрядов и частоты синхроимпульсов. Соединив выход сдвигового регистра со входом, получают устройство памяти с циркуляцией данных.

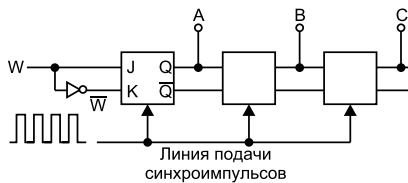


Рис. 2.37. Сдвиговый регистр и форма синхросигнала

Триггеры, соединенные так, как показано на рис. 2.38, образуют двоичный *счетчик*. Если первоначально все триггеры были обнулены, то после подачи первого сигнала на выходе  $A$  первого справа триггера появится 1 и таким образом в устройство будет записано число  $CBA = 001$ , после второго 1 сдвинется на разряд влево и запишется число  $010$ , после третьего  $011$  и т. д., а после восьмого  $CBA = 000$ . Такую схему называют счетчиком по модулю 8. В общем случае двоичный счетчик по модулю  $N$  сбрасывается на 0 после  $N$ -го импульса и имеет  $n$  разрядов и триггеров, так что  $N = 2^n$ . Например, счетчик из трех триггеров считает до  $7 = 2^0 + 2^1 + 2^2$  (в двоичной системе 111) и сбрасывается 8-м импульсом, из четырех триггеров — считает до 15 и сбрасывается 16-м импульсом и т. д. Каждый из триггеров делит частоту входного сигнала пополам, и потому частота выходного сигнала будет равна  $1/N$  частоты входного. Асинхронный (рис. 38,а) счетчик (со сквозным переносом) осуществляет счет в том случае, когда изменение состояния на выходах триггеров происходят под действием заднего фронта синхроимпульсов и каждый триггер перебрасывается при переходе от 1 к 0. У синхронного счетчика (рис. 38,б) все

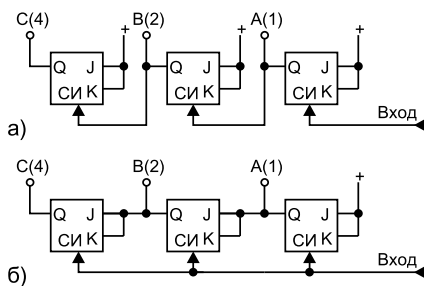


Рис. 2.38. Схема асинхронного (а) и синхронного (б) счетчиков

линии синхрои импульсов СИ соединены между собой, благодаря чему триггеры могут изменять свои состояния синхронно.

*Таймер* представляет собой источник импульсов с точно определенной длительностью и обеспечивает получение заданной выдержки времени. Микросхема таймера может вырабатывать как одиночный импульс заданной длительности (так называемая моностабильная схема, или схема с одним устойчивым состоянием), так и непрерывную последовательность импульсов. Типовые схемы таймеров (например, 555 серия) обычно сочетают в себе аналоговые и цифровые компоненты и времязадающие конденсаторы.

Цифровые данные можно перерабатывать в аналоговую форму и наоборот. В *цифроаналоговых преобразователях* (ЦАП) входным сигналом является двоичный код, выходным — напряжение или ток. Цифроаналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных напряжений, соответствующих разрядам входного кода, и притом только тех, для которых в соответствующих разрядах стоит единица. Основными узлами преобразователя являются резистивная матрица, с помощью которой формируются эталонные токи, и токовые ключи (рис. 2.39). Сопротивления резисторов матрицы удваиваются при переходе от старшего разряда к младшему. Один из вариантов такой матрицы (со взвешенными резисторами) показан на рис. 2.39,а. Здесь каждому разряду двоичного кода соответствует свое значение тока  $I_1, I_2 \dots I_n$ , определяемое сопротивлением резисторов  $R, 2R \dots 2^{n-1}R$ . В варианте с резистивной сеткой  $R - 2R$  (рис. 2.39,б) используются сопротивления только двух номиналов. Формирование токов происходит за счет как последовательных, так и параллельных цепей резисторов. Ключи строятся обычно на транзисторах.

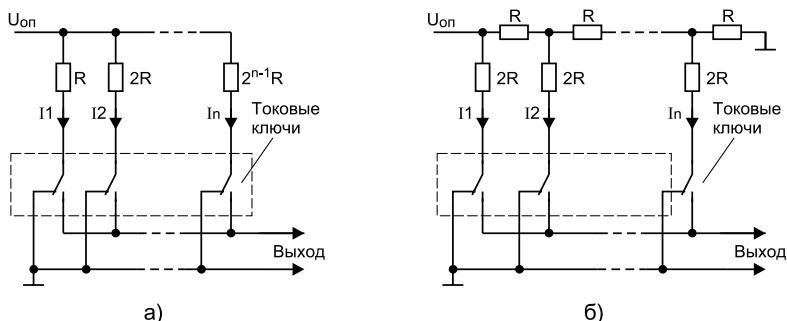


Рис. 2.39. Резисторные матрицы: а — со взвешенными резисторами; б — с резистивной сеткой  $R - 2R$

В микроэлектронных аналогоцифровых преобразователях (АЦП) входным сигналом является напряжение, выходным — цифровой код. В преобразователях производится квантование входного напряжения на конечное число дискретных значений, каждое из которых преобразуется в код. Состав АЦП может изменяться в зависимости от метода преобразования и его реализации. Принцип действия АЦП последовательного приближения (поразрядного кодирования) состоит в сравнении эталонов напряжения, пропорциональных степеням числа 2, с аналоговой величиной. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде ставится 0. Затем производится сравнение со следующим эталоном, и если он равен или меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода ставится 1 и в дальнейшем уравнивается разность между входной величиной и первым эталоном и т. д. В результате преобразования входное напряжение уравнивается суммой эталонных напряжений, снимаемых с ЦАП.

Принцип работы ЦАП последовательного счета основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых и минимальных по значению эталонов. Момент уравнивания определяется компаратором, а количество слагаемых подсчитывается счетчиком. Принцип работы преобразователя параллельного действия основан на одновременном сравнении входного сигнала с  $2^n - 1$  эталонами, соответствующими  $n$ -разрядному двоичному коду, и кодировании результатов. Такие преобразователи являются наиболее быстродействующими, но требуют большого количества компараторов. Поэтому иногда применяют комбинированное

устройство: несколько малоразрядных АЦП параллельного действия соединяют последовательно.

## 2.5. Микропроцессорные устройства

### 2.5.1. Общая характеристика

В аппаратуре и схемах управления и защиты все большее распространение получают микропроцессоры — управляемые «сверх-большие» интегральные схемы. Микропроцессорные устройства защиты и автоматики имеют серьезные преимущества перед обычными электронными:

- Повышенная надежность, которая обеспечивается высокой степенью интеграции применяемых микросхем;
- Реализация сложных алгоритмов работы программным способом без привлечения дополнительного оборудования или перемонтажа схем;
- Возможность перестройки параметров (уставок, характеристик) защиты при изменении конфигурации сети программным путем или дистанционно с компьютера верхнего уровня.
- Значительно меньшие габариты и масса, большая надежность в сравнении с устройствами на основе дискретных электронных элементов.
- Возможность длительного хранения большого объема информации об аварийных процессах, расходе электроэнергии, работе электрооборудования и пр.

### 2.5.2. Микропроцессор

Основным узлом микропроцессорных устройств является микропроцессорный комплект, а его «мозгом» — собственно микропроцессор. Его основные элементы выполняют следующие функции:

*Арифметико-логическое устройство (АЛУ)* по командам *устройства управления* выполняет арифметические и логические операции над данными, поступающими из устройств памяти или ввода-вывода. Оба устройства, скомпонованные на одной интегральной схеме, образуют центральный процессор (ЦП), выполняющий все функции управления и обработки данных.

*Устройство ввода-вывода* обеспечивает связь ЦП с внешними, или периферийными, устройствами.

*Устройство памяти*, или *запоминающее устройство (ЗУ)*, хранит программы и данные.

ЦП связывается со всеми этими устройствами либо посредством памяти, либо через общие шины. Физически шины представляют собой печатные проводники или кабели. Однонаправленная *адресная шина* дает возможность выбирать информацию или блок, двунаправленная *шина данных* — передавать ее в виде команд, адресов и данных.

Программа и данные представляются в цифровой форме. Минимальное количество информации — один разряд в двоичной системе счисления — называется *бит* (от англ. binary digit — бинарная цифра), последовательность бит образует *слово*. Группа из восьми битов называется *байт*, а 1024, т. е.  $2^{10}$  байта, — килобайт, Кбайт. Слова хранятся в специальных блоках — регистрах, содержащих набор триггеров, обычно D-типа. По существу, весь центральный процессор представляет собой набор различных регистров.

Устройство управления содержит регистр команд и программный счетчик. Регистр команд сохраняет текущее слово команды, а программный счетчик вырабатывает адрес следующей команды.

АЛУ представляет собой сложную двухходовую логическую схему, комбинация сигналов на входе которой однозначно определяет сигнал на выходе. В АЛУ непосредственно выполняются только операции сложения и вычитания. При умножении и делении используется то обстоятельство, что сдвиг двоичного числа на одну позицию влево приводит к его удвоению, вправо — делит его пополам (подобно тому, как в десятичной системе сдвиг числа на один разряд соответствует умножению или делению на 10).

Устройство памяти состоит из элементарных ячеек на RS-триггерах, каждый из которых способен хранить один бит информации. Стандартная ячейка памяти имеет емкость один байт. Емкость памяти из 1024 ячеек обозначают как 1К.

Различают *основную (внутреннюю)* и *внешнюю* память. Внутренняя память — это ЗУ, подключенные непосредственно к шинам адреса и данных, внешние же ЗУ подключаются через устройства ввода-вывода и могут хранить большой объем информации, например, жесткие диски, флэш-память.

Различают также *постоянную* и *оперативную* память. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ, или ROM — Read Only Memory, т. е. память только для чтения) позволяет только считывать информацию. ПЗУ характеризуется большим объемом хранимой



информации, которая не разрушается при отключении питания. *Оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ, или RAM — Random Access Memory, т. е. память с произвольным доступом), позволяет как считывать информацию, так и записывать новую, причем адреса можно определять в любом порядке, произвольно. При исчезновении напряжения записанная в полупроводниковых ОЗУ информация утрачивается. В ПЗУ хранятся, в частности, программы, в ОЗУ — данные.

ПЗУ представляет собой матрицу диодов или транзисторов. В диодных ПЗУ наличие диода в данной точке соответствует логической 1, отсутствие — 0. В ПЗУ на биполярных или МОП-транзисторах соединение одного из электродов с землей соответствует 0, изоляция от земли — 1. Заложённая изготовителем программа таких ПЗУ является жесткой и изменению не подлежит. Выпускаются также ПЗУ, программируемые пользователем (ППЗУ): в них контактные соединения выполнены тонкими проводящими перемычками, наличие которых соответствует 0, отсутствие — 1. Ненужные перемычки в процессе программирования расплавляются импульсами тока с помощью специального устройства — программатора. Наконец, существуют *перепрограммируемые ПЗУ*, допускающие стирание хранимой информации и повторное программирование (СПЗУ).

### 2.5.3. Внешние устройства

Микропроцессорные устройства связаны с внешним миром посредством периферийных устройств (магнитные носители, АЦП и ЦАП, отдельные регистры и пр.). Для их функционирования требуются определенные управляющие сигналы, протоколы и способы обмена с микропроцессорным комплектом, и потому шины обмена информацией подключаются не непосредственно к периферийному устройству, а через так наз. интерфейс (лат. *inter* — между) — совокупность программных и аппаратных средств связи и обмена.

*Блоки питания* микропроцессорных устройств построены на базе высокочастотных преобразователей напряжения с бестрансформаторным входом, позволяющим использовать постоянное или переменное напряжение питающей сети. Обеспечивается стабилизированное напряжение питания: микропроцессорного набора — 5 В, интерфейса аналоговых сигналов +15, —15 В, релейных входов и выходов 24 В.

*Устройства ввода информации.* Информация может поступать в виде аналоговых, цифровых и логических сигналов. Устройство

ввода преобразует эти сигналы в формат, пригодный для чтения микропроцессором. Аналоговые сигналы получают от стандартных датчиков, в частности, трансформаторов тока, и преобразуют их (трансформируют и нормируют) для ввода в АЦП. Кроме АЦП, в интерфейс аналоговых сигналов входит *мультиплексор*, позволяющий использовать один преобразователь для нескольких входных сигналов.

Цифровая информация передается по сетевому входу, который может быть выполнен в виде проводной или оптоволоконной линии. Вход используется для передачи сигналов сетевой автоматики, дистанционного управления, сигнализации и пр. Для ввода сигналов от автоматических выключателей, реле и др. применяют оптронные развязки.

Аппаратура ручного ввода и отображения сетевой информации располагается обычно на передней панели блока защиты и автоматики. Для ручного ввода используются кнопки или клавиатура. Для ввода большого количества информации служат контроллеры — пульты, имеющие развитую клавиатуру и дисковые накопители информации.

*Устройство вывода сигналов.* Микропроцессорные устройства выдают команды на выходные реле в цепях защиты, управления и сигнализации. Информация о состоянии этих цепей и выключателей передается также по сетевому каналу. Информация выводится на светодиодные индикаторы, графические дисплеи, жидкокристаллические цифро-буквенные табло. Дисплей показывает значения фазных токов, а при срабатывании защиты — аварийных токов.

## 2.6. Проверка радиоэлектронных цепей

### 2.6.1. Проверка отдельных компонентов

При поиске неисправностей в схемах статических реле, а также при выборе элементов испытательных схем возникает необходимость проверки отдельных компонентов.

*Резисторы и конденсаторы* Прежде всего следует убедиться в отсутствии внешних повреждений и в соответствии параметров, обозначенных на корпусе, тем, которые требуются для данной схемы согласно спецификации или предварительному расчету, выбору по каталогу.

При осмотре резисторов обращают внимание на целостность корпуса, лакового покрытия, выводов проводникового элемента. Сопротивление резистора измеряют омметром или мегаомметром. Перемещение движка переменных резисторов должно быть плавным, без заеданий, плавно и монотонно должно изменяться и сопротивление этих резисторов.

Особо следует обратить внимание на выбор резистора по мощности, имея в виду, что обозначенное на его корпусе номинальное значение мощности является предельным значением длительно допустимой рассеиваемой мощности, при котором температура резистора может достигать 300°C. Чтобы не подвергать перегреву другие компоненты схемы и продлить срок службы резистора, его выбирают так, чтобы в длительном режиме рассеиваемая мощность была существенно меньше номинальной. Вместе с тем полезно иметь в виду и то обстоятельство, что в режиме кратковременной или повторно-кратковременной нагрузки резистор может пропускать значительно больший ток, чем номинальный. Если через резистор сопротивлением  $R$  проходит ток  $I$ , то рассеиваемая мощность будет  $P = I^2R$ . А при подключении резистора на напряжение  $U$  она рассчитывается как  $P = U^2 / R$ .

*Конденсаторы.* Когда возникает сомнение в исправности конденсатора, его проверяют на пробой и короткое замыкание путем измерения сопротивления между выводами и между выводами и металлическим корпусом. Пробой, не выявленный на низком напряжении источника питания омметра, может обнаружиться при проверке изоляции между теми же выводами с помощью мегаомметра.

Параметры конденсаторов с твердым диэлектриком сохраняются длительное время, электролитические же конденсаторы подвержены старению, которое сопровождается высыханием электролита и потерей емкости. Ориентировочно о емкости конденсатора можно судить по характеру изменения тока, подаваемого толчком от источника постоянного тока, например от батарейки: у исправного конденсатора наблюдается бросок тока, затем — постепенное его уменьшение почти до нуля.

Измерить емкость конденсатора с необходимой точностью можно соответствующими приборами или методом амперметра-вольтметра на переменном (синусоидальном) токе;  $C = 10^6 I / \omega U$ , где  $C$  — емкость конденсатора, мкФ;  $I$  — ток через конденсатор, А;  $U$  — напряжение на нем, В;  $\omega$  — угловая частота;  $\omega = 314$  1/с при частоте источника питания  $f = 50$  Гц. Для улучше-

ния формы измерительного тока и ограничения его значения рекомендуется включать в цепь конденсатора резистор, сопротивление которого равно примерно 10% емкостного сопротивления конденсатора при данной частоте.

Электролитические конденсаторы устанавливаются, как правило, в цепях постоянного или выпрямленного тока, и обычно выводы конденсатора подключаются к положительному полюсу цепи, а металлический корпус — к отрицательному (общей точке цепи, к металлическому корпусу устройства). У конденсаторов иной конструкции полярность выводов должна быть обозначена.

*Диоды и транзисторы* Все полупроводниковые приборы очень чувствительны к температуре, поэтому определять их параметры следует с учетом этого обстоятельства, желательно при комнатной температуре. Монтаж выполняется таким образом, чтобы эти приборы располагались вдали от источников тепла. При пайке или лужении выводов рекомендуется применять припой с низкой температурой плавления, пользоваться маломощным паяльником и касаться им вывода прибора на время не более 2—3 с на расстоянии не менее 3—5 мм от корпуса.

Рабочие значения тока, напряжения, мощности должны быть существенно ниже предельных. При снижении тока и напряжения до 70% предельного значения надежность полупроводниковых приборов возрастает в десятки раз.

Следует учитывать также форму кривой тока и характер нагрузки. Приводимые в справочниках средние значения токов выпрямительных диодов соответствуют их работе на активную нагрузку, при угле проводимости 180 град. эл. В этом случае амплитудное значение тока в 3,14 раза, а действующее в 1,57 раза превышает его среднее значение. При работе диодов в выпрямителях на активно-емкостную нагрузку эти отношения могут быть гораздо больше, в зависимости от коэффициента пульсации на выходе выпрямителя. Так, при коэффициенте пульсации 0,1 амплитудное значение тока может достигать 15, а действующее — 3,5 среднего значения. Поэтому для данных схем рекомендуется снижать рабочий ток через каждый диод не менее, чем в 2,2 раза против максимально допустимого среднего значения по каталогу.

При последовательном включении диодов обратное напряжение на каждом из них должно быть примерно одинаковым. Но так как обратное напряжение на диоде в такой цепи определяется падением напряжения на его обратном сопротивлении, значение ко-

торого у различных вентилях может отличаться в несколько раз, обратное напряжение на одном или нескольких вентилях может превысить допустимое значение. Для выравнивания обратного напряжения на последовательно соединенных вентилях их шунтируют резисторами, сопротивление которых должно быть в 3—5 раз меньше обратного сопротивления диодов.

При параллельном включении диодов принимают меры к равномерному распределению тока между ними. В противном случае токи в параллельных ветвях распределятся обратно пропорционально прямому сопротивлению диода и могут превысить максимально допустимое значение. Для выравнивания токов последовательно с вентилями вводят резисторы, сопротивление которых должно быть по крайней мере втрое больше прямого сопротивления диодов.

Разумеется, для обеих схем вентиля подбираются одного типа и с близкими значениями параметров: при последовательном соединении — с одним и тем же номинальным обратным напряжением (одного класса), при параллельном — с тем же или близким значением прямого падения напряжения (одной группы).

Общую оценку работоспособности диода можно произвести с помощью омметра: у исправного прибора прямое сопротивление на несколько порядков меньше обратного. Показания омметра «0» или «∞» указывают первое — на пробой, второе — на обрыв выводов или разрушение полупроводниковой структуры диода. Надо только выбирать предел измерения омметра так, чтобы измерительный ток не превысил допустимого для данного диода значения. Цифровой мультиметр в режиме проверки диодов должен показать напряжение около 0,7 В при прямой полярности и полное напряжение источника питания прибора — при обратной.

Общую оценку пригодности транзистора также можно произвести с помощью омметра. Прямое сопротивление перехода эмиттер — коллектор составляет обычно у транзисторов малой мощности 50—100 Ом, средней и большой — 10—30 Ом. Обратное сопротивление перехода должно быть у транзисторов малой мощности порядка десятков и сотен килоом, средней и большой мощности — свыше 1 кОм. Оценить исправность цепей база-коллектор и база-эмиттер можно с учетом диодного эквивалента этих цепей, проверив полярности их у транзисторов разных типов проводимости (см.рис. 2.28,а).

Более полное суждение о качестве транзистора можно получить путем измерения его основных параметров (рис. 2.40). *Обратным*

## 2.6. Проверка радиоэлектронных цепей

током коллекторного перехода  $I_{к0}$  называют ток, протекающий через переход коллектор — база при отключенном эмиттере и заданном обратном напряжении  $U_{обр}$  между коллектором и базой. Измерение тока  $I_{к0}$  выполняют по схеме рис. 2.40,а. Сопротивление резистора в цепи базы, защищающего схему от коротких замыканий, выбирают по выражению

$$R = 0,1 U_{обр} / I_{к0}$$

Начальный ток коллектора  $I_{кн}$  — это ток в цепи коллектора при замкнутой цепи эмиттер — база и заданном напряжении на коллекторе. Измерение тока  $I_{кн}$  выполняют по схеме рис. 2.40,б. Сопротивление резистора  $R_6$  в базовой цепи составляет 500 — 1000 Ом для маломощных транзисторов, для мощных — до 2 Ом. Токоограничивающее сопротивление рассчитывают по формуле

$$R = U_{обр} / I_{кн}$$

Значения напряжения питания в схемах 2.40,а и б оговаривают в паспортных данных транзистора.

Коэффициент усиления по току определяется по схеме рис. 2.40,в. В одном из положений переключателя устанавливают ток базы  $I_6$ , в другом — измеряют соответствующий ему ток коллектора  $I_k$ . Далее устанавливают ток базы  $I_{62} = (1,3 - 1,5) I_{k1}$  и измеряют ток  $I_{k2}$ . Коэффициент усиления рассчитывают как  $b \approx (I_{k2} - I_{k1}) / (I_{62} - I_{61})$ . Приближенный характер расчета обусловлен нелинейностью зависимости  $I_k(I_6)$ .

Тиристоры и симисторы. Тиристор, как и диод, можно проверить с помощью омметра. У закрытого тиристора значения прямого и обратного сопротивления будут достаточно велики. Если же при прямой полярности напряжения на тиристоре (т. е. «плюс»

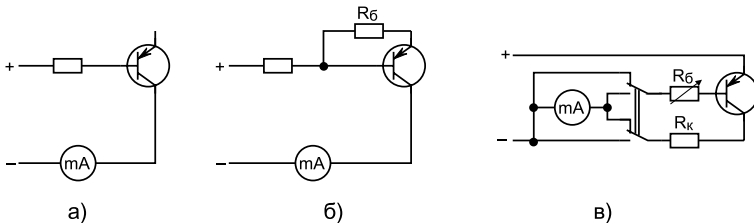


Рис. 2.40. Схемы измерения параметров транзистора: а — обратного тока коллекторного перехода; б — начального тока коллектора; в — коэффициента усиления по току

напряжения омметра на аноде, «минус» на катоде), соединить перемычкой анод и управляющий электрод, последний получит положительный потенциал относительно катода, тиристор откроется и его прямое сопротивление резко упадет. Если, далее, перемычку отсоединить, то тиристор может либо остаться в проводящем состоянии (прямое сопротивление мало), либо закрыться, — в зависимости от того, окажется ли измерительный ток омметра больше или меньше тока удержания тиристора.

Поскольку симистор является аналогом двух встречно-параллельных тиристоров, проверка его производится так же, как и отдельно для каждого из них.

### 2.6.2. Логические схемы. Интегральные микросхемы

Проверить отдельные элементы этих схем невозможно, достаточно лишь убедиться в работоспособности схемы. Для этого необходимо подать на вход схемы нормированный сигнал и наблюдать за ее реакцией. При этом удобно пользоваться портативными устройствами типа логического пробника, разработанного собственными силами либо выпускаемыми промышленностью.

Один из таких пробников (разработка ГПИ Тяжпромэлектропроект) предназначен для индикации состояния транзисторно-транзисторных логических элементов. Информация об уровне сигнала получается при касании иглы пробника проверяемой точки схемы. Уровню «логическая 1» соответствует свечение индикатора, «логический 0» — отсутствие свечения, а неопределенный уровень сигнала индицируется цветом свечения. Особенностью пробника является устройство для растяжения импульсов, позволяющие индицировать узкие одиночные импульсы длительностью не менее 50 нс или серии импульсов частотой до 10 МГц.

Разнообразные логические пробники, удобные для выполнения наладочных работ, предлагаются иными фирмами. Так, фирма Conrad Electronic выпускает портативный (масса 50 г) логический тестер MOD 625 для проверки элементов ТТЛ- и КМОП-логики. Тестер имеет встроенный жидкокристаллический индикатор импульсов и мультивибратор. Входное сопротивление 120 кОм, максимальная частота 50 МГц, минимальная необходимая длительность импульса 10 мс. Генератор 0,5/400 Гц с переключением. Сопротивление входа синхронизации 1 МОм.

Проверку сложных бесконтактных схем на функционирование производят поэтапно. На первом этапе проверяются элементарные

составные части (модули) устройства: ячейки, субблоки, блоки. Для этой цели используются тестеры или специальные устройства, поставляемые изготовителем. На втором этапе проверяется функционирование более сложных узлов, например, комплектных устройств. Эти операции осуществляются с помощью специализированных имитаторов, вырабатывающих определенный набор сигналов для воспроизведения реальных режимов работы узла. Для программируемых систем предусматриваются тестовые программы проверки. На заключительном этапе проводится проверка работы устройства в рабочем режиме.

При обнаружении неисправного элемента или узла следует сразу же заменить его на исправный, а затем по возможности выявить конкретный дефект неисправного модуля. Большинство дефектов бывает связано с ошибками внутрислочно́го монтажа, некачественным монтажом и пайкой печатных плат, повреждением печатных проводников. Вышедшие из строя диоды, транзисторы, микросхемы подлежат замене.

Возможны также неисправности, связанные с временем распространения сигналов. Если время прохождения логических сигналов от входа к выходу по нескольким независимым путям оказывается примерно одинаковым, то возникают так называемые «гонки» сигналов и неопределенные комбинации их, что приводит к появлению ложных сигналов на выходе. Для отыскания причин таких дефектов проверяют параметры сигналов по всему тракту их прохождения от входа к выходу. Эти работы производятся с помощью осциллографа и специальной аппаратуры, они достаточно трудоемки и сложны.

### 2.6.3. Помехи

Ввиду того, что микросхемы и узлы автоматики на их основе имеют высокое входное сопротивление и малое потребление, они подвержены влиянию электромагнитных помех. Различают помехи внутреннего происхождения и внешнего. Источниками внешних электромагнитных помех могут быть тиристорные преобразователи, электродвигатели, коммутационные аппараты. Внутренние помехи могут быть обусловлены особенностями элементной базы, паразитными связями, взаимным влиянием отдельных узлов через источники питания и др. Хотя основные мероприятия по обеспечению помехоустойчивости стремятся осуществить еще на стадии



проектирования, а затем и монтажа, полностью устранить влияние помех удастся при этом не всегда.

*Статической* называют помеху, время воздействия которой на данный логический элемент значительно превышает время его переключения, *динамической* — такую помеху, длительность которой соизмерима со временем переключения. В общем случае допускается наличие помехи, значение которой заведомо недостаточно для переключения логической схемы, например, напряжение статической помехи 0,4 В.

*Импульсные (динамические) помехи* могут вызываться следующими факторами: отражениями в линии связи от их неоднородностей или несогласованных нагрузок; перекрестными наводками между линиями связи; паразитными связями между микросхемами по цепям питания и заземления; искажением формы сигнала; «гонкой» сигналов; наводкой от внешних электромагнитных полей. *Перекрестными* называются помехи, вызванные взаимодействием соседних сигнальных линий. Для уменьшения таких помех необходимо располагать проводники возможно ближе к проводящей поверхности, увеличивать расстояние между проводниками или применять витые пары. Линия в виде витой пары имеет фиксированное волновое сопротивление, не зависящее от расстояния до проводящей поверхности, что облегчает *согласование* линии связи как с источником, так и с приемником сигнала.

Сигналы передаются по данной линии связи без искажения лишь при отсутствии отраженных волн от конца линии. Для этого сопротивление приемника должно быть равно волновому сопротивлению линии, т. е., как говорят, приемник и линия должны быть согласованы. Если же это условие не соблюдается, то согласования можно добиться, включив между линией и приемником согласующее устройство, например, трансформатор.

Кроме изложенных, на стадиях монтажа и наладки можно осуществить следующие общие рекомендации по обеспечению помехоустойчивости цифровых и логических устройств. Все металлические части и экраны выводятся на отдельный контакт разъема, который подключают к шине «земля» комплектного устройства, избегая при этом соединения «шлейфом». Не рекомендуется подавать на разъемы блоков сигналы от внешних устройств без промежуточной гальванической развязки.

С целью снижения статических помех напряжение *питания* должно быть стабилизированным и максимально сглаженным.

Разводка питания по блокам должна выполняться радиально с применением свитых проводов. Для подавления импульсных помех от источников питания устанавливаются сетевые С- или LC-фильтры. Сетевые трансформаторы должны иметь электростатические экраны между первичной и вторичной обмотками, позволяющие в 10—15 раз снизить паразитную межобмоточную емкость, значение которой может достигать сотен пикофард.

*Внутренние линии связи* должны быть возможно короче. Одиночные провода не следует укладывать в жгут. Несогласованные витые пары допускается укладывать в плоские жгуты и в группы проводов без увязки их в жгуты. Длинные линии связи выполняются согласованными витыми парами или коаксиальным кабелем. Монтаж линий связи между блоками и переключателями, тумблерами и т. п. выполняется экранированными или одиночными проводами, собранными в жгут с общей экранной оплеткой. Не допускается укладка в один жгут информационных цепей с цепями коммутации и индикации, а также с цепями переменного тока 50 Гц.

*Внешние связи.* Цепи внешних сигналов получают питание:

- цепи входных сигналов, поступающих от входных коммутационных аппаратов (кнопок, переключателей и т. п.), — от источников питания внешних устройств соответствующего комплектного устройства;
- цепи выходных сигналов комплектного устройства — от источника питания внешних устройств этого комплектного устройства.

Внешняя информация может быть подразделена на три группы:

- команды, поступающие от контактных или бесконтактных аппаратов;
- информация в виде параллельного кода;
- последовательность импульсов.

Сигналы первой группы рекомендуется передавать кабелями связи, имеющими парную скрутку проводов. Сигналы второй группы могут передаваться кабелями связи с общим экраном, поверх которого наложена изоляция, а сигналы третьей — с помощью коаксиальных кабелей. При передаче информации и импульсных сигналов с частотой более 10 кГц целесообразно применять одно- и многополюсные коаксиальные кабели.

В промышленных установках с преобладанием низкочастотных полей (50—1200 Гц) целесообразно применение стального экрана в качестве основного, дополнительное же применение медного эк-

рана оправдано лишь при воздействии высокочастотных (свыше 10 кГц) электромагнитных полей. При передаче низкочастотных сигналов, в том числе и аналоговых, могут использоваться двухполюсные и многополюсные кабели и провода связи.

### 2.6.4. Проверка статических реле

Промежуточные реле и реле времени. Сопротивление изоляции реле с электронными компонентами измеряют мегаомметром на 500 В. Предварительно следует проверить отсутствие замыканий на землю в схеме реле посредством омметра, ЭДС источника питания которого не превышает 15 В. При испытании изоляции повышенным напряжением цепи с электронными элементами должны быть отключены.

Проверяется работа реле при пониженном до 80% и повышенном до 110% номинального значения напряжения. Реле времени проверяют на рабочей уставке, а также и на других, если они заданы.

Обнаружить неисправности в схеме можно путем сравнения проверяемого реле с заводом исправным. Для этого реле подключают к одному источнику питания и подводят к ним напряжение (ток) в пределах 0,5—1,5 уставки. Далее измеряют напряжение в одинаковых точках схемы обоих реле и сравнивают полученные результаты.

При замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока возможно ложное срабатывание высокоомных промежуточных реле (РП16, РП18 и др.), которые к тому же могут самоудерживаться через сопротивление контроля изоляции. Для предотвращения этих явлений необходимо настроить реле на напряжение срабатывания 0,6—0,7 номинального. В тех случаях, когда ложное срабатывание реле может привести в действие коммутационные аппараты или устройства противоаварийной автоматики, искусственно снижают сопротивление цепи обмотки, шунтируя ее резисторами. Номинальная рассеиваемая мощность этих резисторов должна быть порядка 15—20 Вт, а сопротивление выбирается таким, чтобы результирующее сопротивление было не более 4 кОм при напряжении сети оперативного тока 220 В и не более 1 кОм при 110 В. Ввиду значительного тепловыделения эти резисторы должны монтироваться вне корпуса реле.

Реле тока и напряжения. К реле подводится оперативное напряжение (регулируемое), на вход подается контролируемая величина (напряжение или ток), значение которой регулируется автотрансформатором или потенциометром. Измерительные приборы

в контролируемых цепях должны иметь класс точности 0,5. С помощью кнопочных переключателей на шкале выбирается сумма чисел, соответствующих заданной уставке:

$$N = (A_{уст}/A_{мин}) - 1,$$

где  $A_{уст}$  и  $A_{мин}$  — соответственно заданная и минимальная уставки по току (реле РСТ11 — РСТ14) или по напряжению (реле РСН14 — РСН17);

$$N = U_{уст} - 180 \text{ (реле РСН12, РСН18).}$$

Уставка реле контроля изоляции выставляется непосредственно в единицах измерения (у РСН 11 — в вольтах).

Вначале измеряют ток или напряжение срабатывания реле и определяют коэффициент возврата, который должен быть не ниже 0,9 для максимальных реле и не выше 1,1 для реле минимального напряжения, если не нормируются иные значения. Проверяется работа реле при пониженном на 20% напряжении оперативного тока. Далее 3—4 раза включают реле при повышенных значениях контролируемой величины; токовые реле при 10-кратном токе уставки, реле напряжения — при напряжении 110% номинального. Если после этих испытаний параметры срабатывания не изменились, реле считают исправным. У биполярных реле РСН11 расхождение значений напряжения срабатывания при прямой и обратной полярности не должно превышать 10%.

В случае неисправности реле следует найти и заменить поврежденный элемент. Когда при визуальном осмотре обнаружить его не удается, проверяют напряжение в контрольных точках и сравнивают результаты с заводскими данными. Для разных экземпляров реле расхождение может составлять 10—15%; измерения производят с помощью электронных и цифровых вольтметров, осциллографов.

У реле РСТ11-14 и РСН 14-17 напряжение измеряется относительно нулевого потенциала схемы. В первой контрольной точке ХР1 измеряется напряжение на выходе компаратора — постоянное до срабатывания реле и периодическое, с импульсами прямоугольной формы, после его срабатывания. Во второй контрольной точке ХР2 измеряется напряжение, которое управляет компаратором и имеет небольшое отрицательное значение, в третьей — напряжение выхода компаратора, положительное или отрицательное.

В схеме реле РСН11 на первой контрольной точке измеряется напряжение выхода компаратора, на второй и третьей — положительное и отрицательное оперативное напряжение, на четвер-

той — разность между нестабилизированным (48 В) и стабилизированным (15 В) выпрямленным напряжением. Измерения производятся относительно точки «—» контролируемого напряжения.

В схемах реле РСН12, РСН18 оперативное напряжение измеряется на первой контрольной точке, выходное напряжение компаратора — на второй и напряжение цепи управления исполнительным электромагнитным реле — на третьей. Напряжение срабатывания электромагнитного реле должно быть не более 27 В для реле РСН11 и 66 В для реле серий РСТ-14, РСН14 — РСН17, РСН12, РСН18.

Многофункциональные реле. Применение микропроцессоров позволяет выполнить реле многофункциональными. Так, реле контроля и защиты электродвигателя TeSys фирмы Шнайдер Электрик обеспечивает широкий спектр защитных, измерительных, статистических и диагностических функций.

Защитные функции: защита от перегрузки, перегрева, от асимметрии, обрыва или неправильного чередования фаз, от затянувшегося пуска, от токов утечки на землю, от максимального и минимального значений тока и напряжения.

Измерительные функции: измерение линейного, фазного и среднего значений и асимметрии токов и напряжений, активной и реактивной мощности,  $\cos\varphi$ , частоты вращения, температуры двигателя.

Статистические функции: реле фиксирует количество аварийных отключений, диагностируемых неисправностей, срабатываний защиты на сигнал, число контролируемых параметров двигателя, ведет журнал ошибок.

Диагностические функции: контроль температуры реле, исправность цепей тока и напряжения, диагностика сбоев командных сигналов и обмена данными.

Сервисные функции: фиксирует время работы машины, число включений в час, время последнего пуска, максимальное значение тока и пр.

Применение многофункционального реле вместо системы из нескольких реле позволяет экономить место в шкафах управления, обеспечивает высокий коэффициент готовности оборудования и сокращение времени ввода его в эксплуатацию, снижет вероятность возникновения аварийных ситуаций, сокращает время простоя. Реле обеспечивает, кроме того, простой контакт с системами технологической автоматики или АСУТП

## **3. Испытания и проверки типовых цепей и элементов устройств электроснабжения до 1000 В**

### **3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)**

#### **3.1.1. Общие сведения**

Автоматические выключатели (автоматы) — электромеханические аппараты, предназначенные для защиты электрических линий и электроприемников в аварийных режимах, а также нечастых (несколько раз в сутки) включений и отключений цепей постоянного и переменного тока.

Автоматы содержат встроенные реле прямого действия, называемые *расцепителями*, которые обеспечивают отключение АВ при сверхтоках (перегрузке, КЗ) или снижении напряжения. Отключение при перегрузке осуществляется максимальным расцепителем с обратозависимой от тока характеристикой, при КЗ — максимальным расцепителем мгновенного действия (отсечка). При снижении или исчезновении напряжения срабатывает минимальный расцепитель. Автоматы, снабженные и максимальной, и минимальной защитами, называют *универсальными*. *Установочные* автоматы отличаются от них тем, что закрыты изолирующим (пластмассовым) корпусом и практически не выбрасывают дугу. Поэтому первые устанавливаются преимущественно в распределительных устройствах низкого напряжения, вторые — в общедоступных помещениях. Существуют и автоматические выключатели других типов и назначения, которые здесь не рассматриваются. В качестве примера на рис. 3.1 показан общий вид автоматических выключателей фирм ЭКФ (Электротехническая компания «Флавир», Россия) и Легран (Legrand, Франция).

*Приводы* автоматов, ручные и электромеханические, обеспечивают усилие, необходимое для включения аппарата. Как правило, при номинальных токах до 200 А применяются ручные приводы, до 1 кА — электромагнитные. Недостатком последних являются удары при включении, которые могут вызывать вибрацию контактов. Автоматы на ток 1500 А и выше снабжаются электродвигате-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

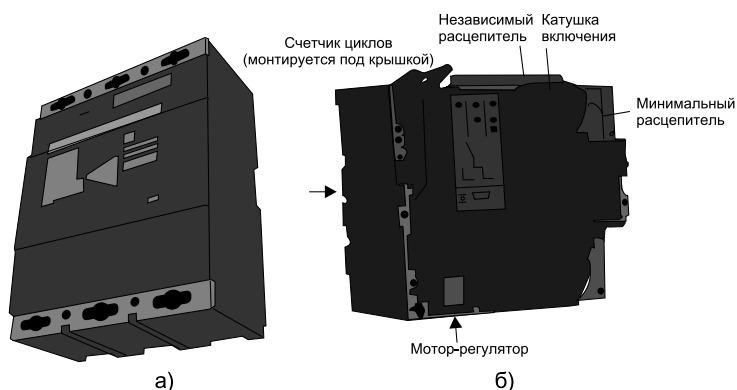


Рис. 3.1. Общий вид автоматов производства фирм ЭКФ (а) и Легран (б); стрелками показаны места установки аксессуаров аппарата

льным приводом, преимуществами которого являются плавный ход механизма и отсутствие ударов, а также то обстоятельство, что при потере напряжения кинетической энергии двигателя оказывается достаточно для завершения процесса включения аппарата. У автоматических выключателей предусматривается механизм свободного расцепления, обеспечивающий отключение автомата в любой момент времени, даже в том случае, если привод выполнял команду на включение. Положение органа ручного управления (рукоятки, рычага) отключенного автомата обозначается знаком «О», включенного — знаком «|».

Обратозависимая время — токовая характеристика расцепления обеспечивается обычно тепловым реле с биметаллической пластиной, отсечка — электромагнитным реле, ток срабатывания которого можно регулировать натяжением противодействующей пружины или изменением числа витков обмотки электромагнита. В ряде конструкций последних лет электромагнит отсутствует, а отсечка реализуется за счет электродинамических усилий, воздействующих на контактную систему при возникновении КЗ. Напряжение отпускания минимального расцепителя электромагнитного типа регулируется в пределах 35—70% номинального значения натяжением пружины. В современных выключателях применяются полупроводниковые расцепители и элементы микропроцессорной техники. Это позволяет производить выбор характеристик и уста-

вок защиты программным путем, а также осуществлять связь выключателей между собой и с центральным компьютером.

#### 3.1.2. Характеристики и классификация АВ

*Быстродействие* автомата характеризуется собственным временем отключения — интервалом между моментом достижения током уставки срабатывания АВ и началом расхождения контактов. Это время составляет более 10 мс у автоматов обычного исполнения и не превышает 5—8 мс у быстродействующих АВ. Отключение может происходить с *выдержкой времени* для обеспечения *селективности* (избирательности) действия максимальной защиты.

Быстродействующие автоматы обладают токоограничивающим эффектом: отключение при КЗ происходит настолько быстро, что к моменту расхождения контактов АВ ток не успевает достичь своего максимального значения (установившегося — при постоянном токе, амплитудного или ударного — при переменном). Благодаря этому улучшаются условия гашения дуги, облегчается работа самого АВ и уменьшается нагрузка на сеть и аппаратуру. Автоматы классифицируются по следующим признакам.

- *Число полюсов*. Выпускаются одно-, двух-, трех- и четырехполюсные автоматы.
- *Наличие защиты от внешних воздействий* — с защитной оболочкой или без нее.
- *Способ монтажа* — на стене, на монтажной рейке и пр.
- *Способ электрического присоединения* — связано или не связано с механическим креплением.
- *Ток мгновенного расцепления* — такое значение тока в главной цепи выключателя, которое вызывает его отключение практически без выдержки времени.
- *Характеристика  $I^2t$*  («интеграл Джоуля»), где  $I$  — действующее значение тока,  $t$  — время срабатывания АВ; эта характеристика позволяет оценить способность выключателя ограничивать сверхтоки в защищаемых цепях.

Кроме того, установлены специальные характеристики АВ по ряду электрических параметров: току, напряжению, частоте и др.

*Номинальный ток  $I_n$*  — установленное изготовителем значение тока, который автоматический выключатель может пропускать длительное время при определенной температуре окружающего воздуха. ГОСТ Р 50345-99 установлены предпочтительные значе-



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

ния номинального тока от 6 до 125 А, но выпускаются автоматы и на 0,5 А, и на 6300 А.

*Номинальная отключающая способность* — наибольшее значение тока КЗ, который автоматический выключатель может отключить дважды подряд без повреждений и ухудшения его характеристик. Различают также *рабочую* отключающую способность, которая может быть равна или меньше номинальной, в зависимости от значения последней.

Стандартом МЭК 60898 нормируется *стандартная время — токовая зона* (standard time — current zone) характеристик расцепления с *выдержкой времени*, в стандарте ГОСТ Р 50345-99 именуемая нормальной время — токовой характеристикой. Это — область разброса между двумя граничными кривыми зависимости времени срабатывания автомата  $t$  от тока  $I$  в его главной цепи, в пределах которой должны находиться время — токовые характеристики  $t(I)$  всех выпускаемых автоматов.

При номинальном токе  $I_n$  автомат срабатывать не должен.

При токе  $1,13 I_n$  расцепление должно происходить за время не менее 1 ч у автоматов с номинальным током  $I_n \leq 63$  А и не менее 2 ч у автоматов с  $I_n > 63$  А, а при токе  $1,45 I_n$  — за время меньше 1 ч или 2 ч у выключателей с номинальным током  $I_n \leq 63$  А или  $I_n > 63$  А соответственно.

При токе  $2,55 I_n$  должны соблюдаться условия  $1 \text{ с} < t < 60 \text{ с}$  ( $I_n \leq 32$  А) или  $1 \text{ с} < t < 120 \text{ с}$  ( $I_n > 32$ ).

Тип *мгновенного расцепления* обозначается буквами **A**, **B**, **C**, **D**, **K**, **Z** и характеризует стандартный диапазон разброса срабатываний отсечки, а также вид защищаемой нагрузки, для которого данный тип расцепления рекомендуется. Установлены диапазоны разброса кратности токов отсечки  $I/I_n$  на переменном и постоянном (в скобках) токе: **A** — 2...3 (3); **B** — 3...5 (7,5); **C** — 5...10 (15); **D** — 10...20 (30) и до 50 по спецзаказу; **K** — 8...12 (18); **Z** — 2...3 (4,5). Тип **A** рекомендуется выбирать для защиты цепей большой протяженности и полупроводниковых устройств, тип **B** — осветительных сетей общего назначения; **C** — цепей с умеренными пусковыми токами (например, трансформаторов); **D** — цепей с активно-индуктивной нагрузкой, электродвигателей; **K** — для индуктивной нагрузки, **Z** — для защиты электронных устройств. Наибольшее распространение получили автоматические выключатели с характеристиками **B**, **C** и **D** (рис. 3.2).

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

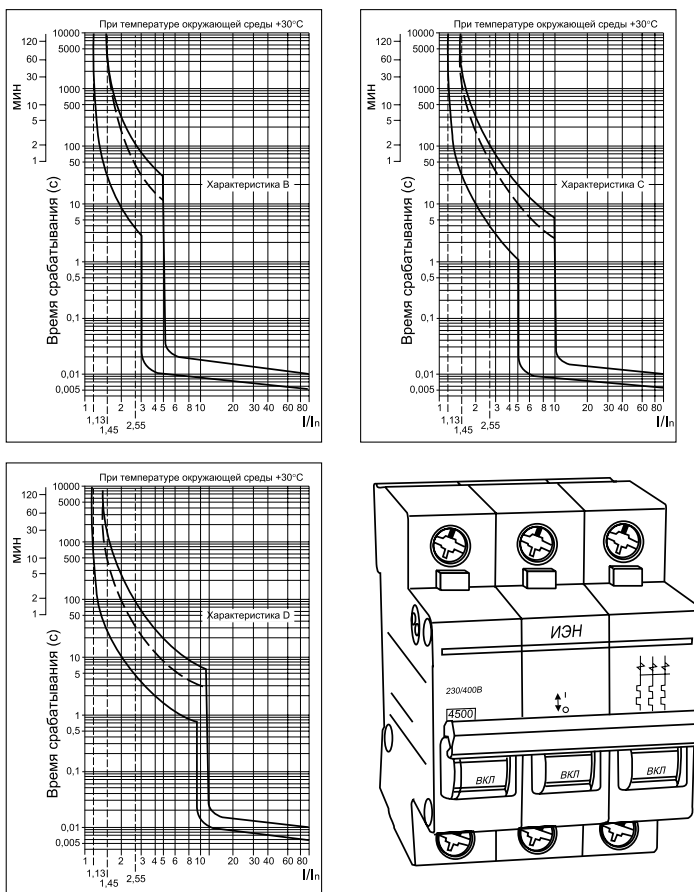


Рис. 3.2. Время-токовые характеристики отключения автоматов ВА 47—29: пунктирная линия — для АВ с  $I_n \leq 32$  А; кратность тока отсечки  $I/I_n = 10...14$

В АВ отечественного производства встречаются следующие обозначения для расцепителей:

- М — мгновенного действия (электромагнитный);
- Т — тепловой;
- Н — минимальный расцепитель напряжения или неселективный;

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

- Д — независимый;
- О — максимальный расцепитель тока в нулевом проводе.

Цифрами обозначаются количество полюсов и максимальных расцепителей автомата.

#### 3.1.3. Проверка расцепителей

Согласно стандарту, расцепители калибруются при контрольной температуре окружающего воздуха 30 °С. Для учета влияния температуры и др. внешних факторов изготовители аппаратуры вводят поправочные коэффициенты в виде таблиц или кривых. Эти данные применительно к автоматическим выключателям ВА 47-29 приведены ниже в качестве примера.

Зависимость номинального тока от температуры (поправочный коэффициент  $K_n$ ) близка к линейной (рис. 3.3).

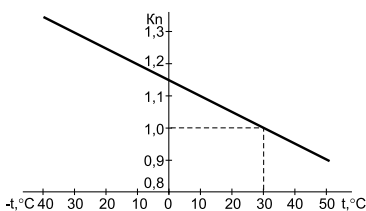


Рис. 3.3. Изменение значений номинальных токов в зависимости от температуры окружающей среды

Нагрузочная способность АВ уменьшается с ростом температуры (рис. 3.4), а также при размещении нескольких выключателей в одной оболочке (рис. 3.5).

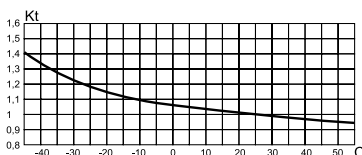


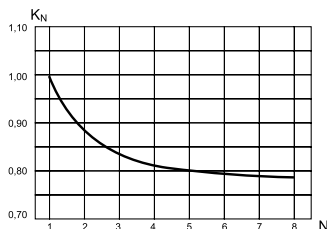
Рис. 3.4. Изменение нагрузочной способности в зависимости от температуры окружающей среды

Ток неотключения для размещенных рядом автоматических выключателей в зависимости от их количества ( $N$ ) и температуры окружающего воздуха ( $t$ ) определяется по формуле

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

$$I_{н.о} = 1,13 I_n K_N K_t,$$

где  $I_n$  — номинальный ток при температуре настройки тепловых расцепителей  $30^\circ\text{C}$  (указанный на маркировке);  $K_N$ ,  $K_t$  — поправочные коэффициенты.



*Рис. 3.5. Нагрузочная способность для параллельно размещенных выключателей*

В принятой технологии наладочных работ расцепители, изготовленные в соответствии с ГОСТ Р 50345-99 (или МЭК 60898 и аналогичных), испытывают при двух значениях тока мгновенного расцепления:  $I_{m1}$  — нижний предел диапазона данного типа и  $I_{m2}$  — верхний предел. У автоматов нестандартных типов мгновенного расцепления контрольные значения токов принимают в зависимости от уставки по току КЗ (отсечки)  $I_{отс}$ :  $I_{m1} = 0,8 I_{отс}$ ;  $I_{m2} = 1,2 I_{отс}$ . Время срабатывания  $t$  нормируется в пределах  $t \geq 0,1$  с и  $t < 0,1$  с при токах  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$  соответственно.

Обычно время срабатывания указывается изготовителем для случая одновременной нагрузки испытательным током всех полюсов выключателя. При нагрузке одного полюса ток срабатывания увеличивается не менее чем на 10% у двухполюсного и на 20% — у трех- и четырехполюсных автоматов. Расцепитель токов перегрузки должен вызывать размыкание выключателя с погрешностью не более 20%, расцепитель мгновенного действия или с независимой выдержкой времени — не более  $\pm 10\%$ .

Проверка калибровки расцепителей с обратнoзависимой выдержкой времени производится при установленной кратности уставки по току. Время расцепления не должно превышать значения, соответствующего верхней кривой время-токовой зоны. При отклонении температуры от контрольной должна быть введена поправка, указываемая в документах изготовителя.

Источником нагрузочного тока для испытания максимальных расцепителей служит понижающий трансформатор. Первичную обмотку его предпочтительно включать на линейное напряжение сети, более близкое к синусоидальному, чем фазное. Ток нагрузки трансформатора можно регулировать с помощью переменного резистора или автотрансформатора в первичной цепи. Применение регулировочных резисторов предпочтительно с точки зрения улучшения формы кривой тока, но ограничено сравнительно небольшой мощностью широко применяемых реостатов. Их удобно использовать для получения относительно небольших токов порядка нескольких сотен ампер от трансформаторов безопасности (так наз. «котельных») с вторичным напряжением 12 или 36 В.

Когда требуется подавать токи больших значений (вторичный — 1000 А и выше, первичный — десятки ампер и более) от более мощных нагрузочных трансформаторов специального изготовления, чаще всего применяют регуляторы с силовыми полупроводниковыми вентилями. Необходимо только принимать во внимание их принципиальный и существенный недостаток: при глубоком регулировании форма кривой тока значительно искажается. Кроме того, при испытании электронных расцепителей, реагирующих на амплитуду тока, не следует устанавливать угол отпирания вентилей больше 80...90 град. эл.

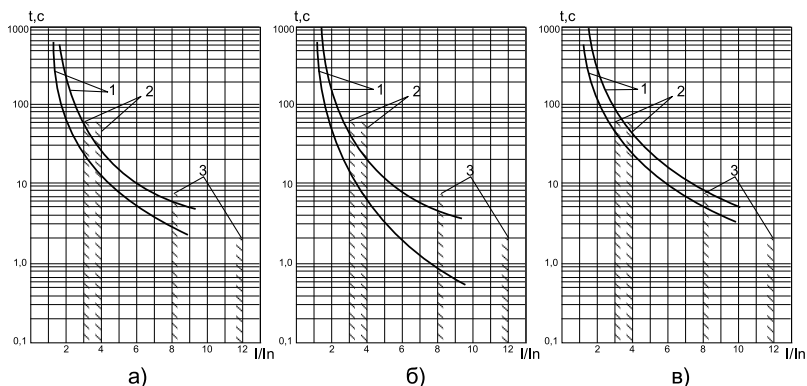
Возможность получения больших токов от понижающих трансформаторов ограничивается их мощностью и сопротивлением внешних соединений.

#### 3.1.4. Автоматические выключатели переменного тока серий АХХХХ

**Выключатели типа АП-50 (АП50Б).** Широко распространены. Предназначены для защиты электрических цепей от перегрузок и КЗ, а также оперативных включений и отключений с частотой от 6 до 30 раз в сутки (АП50Б), в частности, для пуска, защиты и отключения электродвигателей. Номинальные токи от 1,6 до 50 А (63 А), уставка теплового расцепителя регулируется в пределах  $(0,6...1,0)I_n$ . Тепловые расцепители не срабатывают в течение 1 ч при токе нагрузки 1,1 (1,05) тока уставки, срабатывают не более чем за 30 мин при токе 1,35 уставки и за 1...10 с (1,5...15 с) при токе в 6 раз больше уставки. Время остывания теплового элемента после срабатывания не превышает 2 мин.

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

Кратность уставки тока отсечки  $I/I_n$  у автоматов АП-50 составляет примерно 7 на переменном и 9 на постоянном токе. Электромагнитный расцепитель не срабатывает при испытательном токе на 15% (20%) ниже этих значений и должен надежно срабатывать при токе на 15% (20%) выше. Время-токовые характеристики выключателей АП50Б показаны на рис. 3.6; кратность отсечки (уставки) автомата 3,5 и 10.



*Рис. 3.6. Время-токовые характеристики автоматических выключателей АП50Б: а, б, в — с тепловыми и электромагнитными расцепителями на токи от 1,6 до 4; от 6,3 до 50; 60 А соответственно; 1 — зона срабатывания тепловых расцепителей, 2 и 3 — зоны срабатывания электромагнитных расцепителей на уставках 3,5 и 10 соответственно*

Время срабатывания тепловых расцепителей проверяется на соответствие характеристикам рис. 3.7, обычно при трехкратном токе уставки.

**Автоматические выключатели серии АЕ (АЕ-1000 и АЕ-2000)** не отличаются существенно от АП-50.

Номинальный ток АВ — от 16 до 100 А, номинальный ток расцепителя от 0,6 до 100 А, число полюсов от 1 (АЕ-1000) до 3. Время-токовая характеристика срабатывания автоматов серии АЕ-2000 показана на рис. 3.7. Допустимый диапазон срабатывания выключателей с комбинированными расцепителями должен соответствовать этой характеристике.

Несрабатывание электромагнитных расцепителей проверяется током на 20% ниже уставки, срабатывание — на 20% выше. Чтобы

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

убедиться, что срабатывание автомата с комбинированным расцепителем последовало от электромагнитного, а не от теплового расцепителя, необходимо сразу же после отключения АВ (пока не остыли тепловые элементы) попытаться включить его вновь: в случае срабатывания теплового элемента включения не произойдет.

Испытание максимальных расцепителей автоматов типов АП-50 и АЕ, а также АК-50, АК-63, А-63, С-25 и аналогичных им проводят по схеме рис. 3.8; вместо реостата можно использовать ЛАТР. Для испытания при одновременной нагрузке всех полюсов они соединяются последовательно (пунктир).

**Автоматические выключатели серии А3100.** До недавнего времени были широко распространены. Уставки защиты у этих автоматов не регулируются. После калибровки расцепителей на заводе — изготовителе их крышки опечатываются.

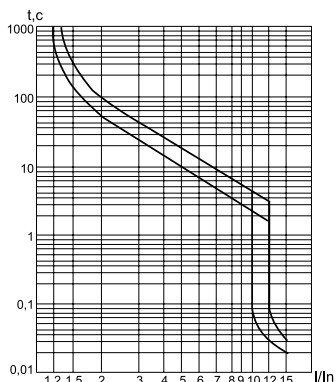


Рис. 3.7. Время-токовая характеристика выключателей АЕ-2000 с комбинированными расцепителями

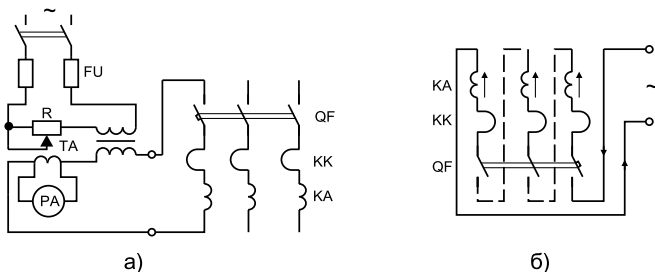


Рис. 3.8. Схемы проверки максимальных расцепителей тока до 100 А: а — нагрузка на один полюс; б — нагрузка на три полюса; S — рубильник; FU — предохранитель; R — реостат; Т — нагрузочный трансформатор; ТА — трансформатор тока; QF — испытываемый выключатель с тепловым расцепителем КК и электромагнитным расцепителем КА

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

Для проверки тепловых расцепителей рекомендуется выполнить следующие операции.

1. Нагрузка каждого полюса поочередно током, равным двух- (А3160, А3110) или трехкратному (А3120, А3130, А3140) номинальному току расцепителя.

2. Одновременная нагрузка всех полюсов. Время срабатывания расцепителя должно соответствовать время-токовым характеристикам, которые нормируются изготовителем. Контрольные значения параметров при различной температуре окружающей среды для выключателей на переменном токе приведены в табл. 3.1 (выборочно).

3. Проверка начального тока срабатывания тех автоматов, время срабатывания которых выходит за указанные изготовителем пределы.

Предельный ток срабатывания для выключателей А3160 равен  $1,35 I_n$ , для выключателей остальных типов —  $1,45 I_n$ . Повторное включение автомата после срабатывания защиты от перегрузки возможно по истечении времени, не превышающего для выключателей А3110 и А3160 — 1 мин, А3120 — 2,5 мин, А3130 — 3 мин, А3140 — 4 мин.

Проверка электромагнитных расцепителей производится для каждого полюса выключателя отдельно. Следует убедиться, что выключатель А3110 не срабатывает при токе ниже уставки на 30%, остальные — на 15%. Затем испытательный ток поднимают на 30% выше уставки для автоматов А3110, а для прочих выключателей — на 15%; при этом автомат должен отключиться. Когда испытывается комбинированный расцепитель, следует убедиться, что отключение произошло от электромагнитного, а не от теплового элемента.

*Таблица 3.1*

*Характеристики тепловых расцепителей выключателей серии А3100 при одновременной нагрузке всех полюсов*

Исполнение выключателя	Номинальный ток расцепителя, А	Испытательный ток, А, при температуре окруж. воздуха, °С					Время срабатывания, с	Допустимое время испытания, с
		0	10	25	30	40		
А3110	15	37	34	30	29	25	19–27	50
	30	74	68	60	57	50	55–65	130
	50	114	109	100	97	90	80–100	200
	100	228	218	200	194	180	100–150	240



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

Исполнение выключателя	Номинальный ток расцепителя, А	Испытательный ток, А, при температуре окруж. воздуха, °С					Время срабатывания, с	Допустимое время испытания, с
		0	10	25	30	40		
А3160	15	34	32	30	29	28	15–20	40
	30	67	64	60	59	55	28–35	70
	50	114	109	100	97	91	58–78	150
А3120	15	50	49	45	44	41	18–22	45
	30	101	97	90	88	83	28–38	70
	50	168	162	150	146	138	50–60	120
	100	336	324	300	293	276	60–70	140
А3130	120	403	389	360	351	331	65–75	150
	170	571	551	510	497	469	68–78	150
	250	840	810	750	731	690	60–70	140
А3140	300	1008	972	900	878	828	65–75	150
	400	1344	1296	1200	1170	1140	50–60	120
	600	2016	1944	1800	1755	1656	65–75	150

**Автоматические выключатели серии А3700.** Превосходят выключатели А3100 по массогабаритным показателям, износоустойчивости, коммутационной способности. Конструкция аппаратов — блочная. Комплекуются сменными расцепителями максимальной токовой защиты в зонах перегрузки и короткого замыкания. Расцепители токовой защиты выполняются на полупроводниковых и электромагнитных элементах. Могут быть *селективными* и *токоограничивающими*. Селективная защита выполняется только на полупроводниковых элементах; время срабатывания ее в зоне КЗ регулируется в пределах 1...0,4 с. Уставки по току и времени срабатывания электромагнитных расцепителей в зоне перегрузки не регулируются.

Полупроводниковые расцепители допускают регулировку: номинального тока расцепителя; уставок по току срабатывания в зоне КЗ; уставок по времени срабатывания в зоне перегрузки; уставок по времени срабатывания в зоне КЗ для выключателей с селективной защитой. Наличие полупроводникового расцепителя обеспечивает возможность быстрого повторного включения аппарата после отключения аварийного тока.

Выключатели токоограничивающего исполнения имеют в каждом полюсе электромагнитный расцепитель, срабатывающий при

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

КЗ без выдержки времени. Токоограничение позволяет снизить ток КЗ в 2...3 раза и более.

Выключатели А3700 изготавливаются в стационарном и выдвигном исполнениях на токи до 630 А и широко применяются в комплектных распределительных устройствах до 1 кВ: А3700Б — токоограничивающие с электромагнитными расцепителями мгновенного действия и полупроводниковыми расцепителями; А3700С — селективные с полупроводниковыми расцепителями с регулируемой выдержкой времени; выпускаются также А3700БР, Ф и др. модификации. Пределы регулирования: ток срабатывания при перегрузках —  $1,25I_n$ , при КЗ —  $(3...10) I_n$ ; время срабатывания 4...16 с при токе  $6I_n$  и 0,1...0,4 с — при КЗ. Включение и отключение производится вручную с помощью рукоятки или электромеханического привода. Время — токовые характеристики выключателей приведены на рис. 3.9 и рис. 3.10.

Отключение выключателя при срабатывании расцепителя происходит по принципу свободного расцепления.

Тепловые и электромагнитные расцепители автомата калибруются на заводе — изготовителе и регулировке не подлежат. Проверка срабатывания *тепловых* элементов производится при закры-

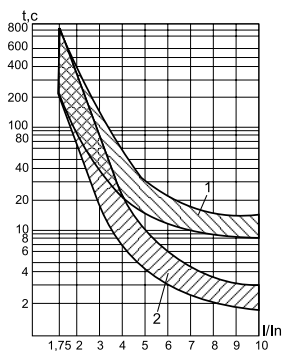


Рис. 3.9. Время-токовые характеристики выключателей переменного тока с полупроводниковыми расцепителями при уставках срабатывания: по току  $6 I_n$ , по времени 16 с (1) и 4 с (2)

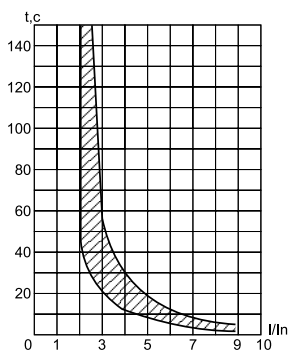


Рис. 3.10. Время-токовая характеристика выключателя А3710Б с тепловыми расцепителями на токи от 10 до 160 А

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

той крышке и рабочем положении выключателя трехкратным номинальным током расцепителя, по каждому полюсу отдельно. Время срабатывания должно соответствовать данным изготовителя, которые приведены в табл. 3.2 (частично). Когда температура окружающей среды при испытании отличается от 40 °С, значения тока корректируются в соответствии с табл. 3.3. Если за максимально допустимое время (табл. 3.2) автомат не отключится, то он подлежит ремонту или замене. Если неисправен тепловой расцепитель на выключателях I и II величин, его заменяют, на III и IV — заменяют выключатель.

Для проверки *электромагнитных* расцепителей следует предварительно снять блок управления полупроводниковым расцепителем (БУРП), если последний имеется, и закоротить вторичные обмотки трансформаторов тока, установив в розетку штепсельного разъема ХР (рис. 3.12) вилку с перемычками А1- В1, А2 — В2, А3 — В3.

Проверка производится следующим образом. Регулятором нагрузки поднимают ток до значения, превышающего на 15% уставку расцепителя; выключатель должен сработать. Затем нагрузку снимают, включают автомат и подают ток толчком; автомат должен отключиться. Далее, не изменяя положения ручек регулировочного устройства, проверяют работу расцепителей других полюсов. Отключение должно происходить за время не свыше 40 мс с допустимыми отклонениями от тока уставки не более чем на 15% для новых выключателей. У выключателей, бывших длительное время в эксплуатации, отклонения тока срабатывания могут достигать  $\pm 30\%$ .

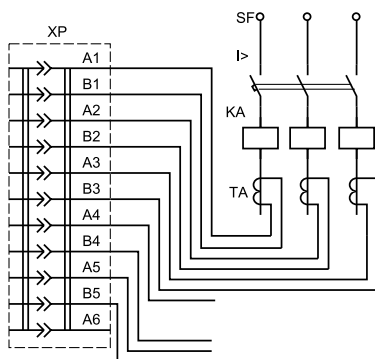


Рис. 3.11. Принципиальная электрическая схема токовых цепей автоматических выключателей серии А 3700

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

Таблица 3.2

*Характеристики тепловых расцепителей автоматических выключателей серии А3700 при нагрузке трехкратным номинальным током и температуре окружающей среды 40°С*

Тип выключателя	Номинальный ток, А, теплового расцепителя	Оптимальное время срабатывания, с	Максимально допустимая длительность нагрузки, с
А3710	16	22–25	70
	25	61–68	130
	50	49–54	100
	100	50–57	130
	160	69–75	130
А3720	160	51–57	130
	250	55–73	130
А3730 и А3740	250	23–28	100
	400	50–55	100
	630	65–75	190

Таблица 3.3

*Значения токов проверки тепловых расцепителей автоматических выключателей серии А3700 при различных температурах окружающей среды*

Тип выключателя	А3710					А3720			А3730 и А3740			
	Номинальный ток, А, расцепителя	16	25	50	100	160	160	200	250	250	400	630
Температура окружающей среды, °С	10	54	84	175	339	538	536	679	849	856	1376	2141
	14	53	83	172	334	530	529	669	837	843	1355	2109
	18	52	82	169	329	523	521	659	824	829	1332	2075
	22	51	80	166	324	515	514	649	811	815	1308	2039
	26	51	79	162	319	507	506	638	798	800	1286	2005
	30	50	78	159	313	500	499	627	784	787	1261	1979
	34	49	76	155	308	492	491	616	771	772	1246	1943
	40	48	75	150	300	480	480	600	750	750	1200	1890

Влияние температуры у выключателей А3700 Ф, Б, БР (Дивногорск, Россия) и характеристика токоограничения для автоматов А 3700 Б и А 3700 БР показаны на рис. 3.12 и 3.13 соответственно.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

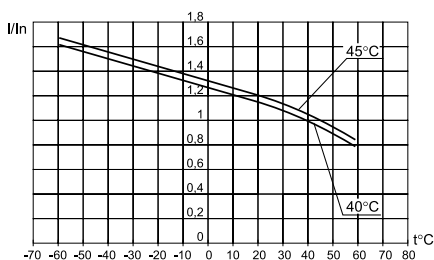


Рис. 3.12. Зависимость номинальных токов максимальных расцепителей от температуры окружающей воздуха;  $I_n$  — значение номинального тока при температурах 40 °С и 45 °С

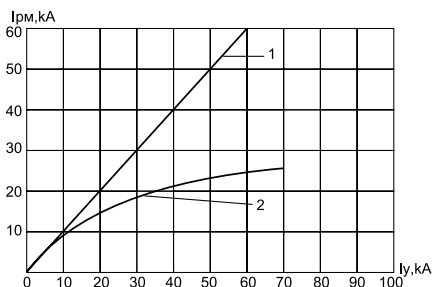


Рис. 3.13. Ограничение тока при напряжении 380 В:  
1 — характеристика без ограничения тока; 2 — характеристика ограничения тока;  $I_y$  — ожидаемый ток КЗ;  $I_{рм}$  — фактический ток при отключении

Параметры полупроводникового расцепителя настраивают следующим образом. Собирают испытательную схему (рис. 3.14). Сопротивление резистора  $R$  подбирается так, чтобы при его шунтировании ток нагрузки увеличивался от 70...100% расчетного значения номинального рабочего тока  $I_{н.р}$  расцепителя до значения, превышающего не менее чем на 20% уставку тока срабатывания отсечки. Вместо резистора можно использовать автотрансформатор, если при этом не искажается форма кривой тока.

Требуется, чтобы форма тока в главной цепи выключателя была синусоидальной, действующее значение высших гармоник составляло не более 5% действующего значения первой гармоники, колебания тока в сети не превышали  $\pm 5\%$ . Для измерения тока и напряжения следует пользоваться приборами класса 0,5.

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

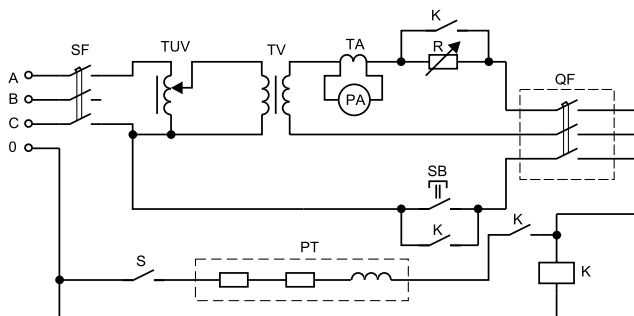


Рис. 3.14. Схема проверки уставок автоматических выключателей переменного тока АЗ700 с полупроводниковыми расцепителями:  
**QF** — испытываемый выключатель; **TUV** — автотрансформатор;  
**K** — контактор; **SB** — кнопка; **PT** — секундомер

Уставка тока срабатывания расцепителя в зоне перегрузки определяется подъемом тока выше номинального. В целях экономии времени на ожидание срабатывания выключателя рекомендуется подать трехкратный (по отношению к номинальному) ток и убедиться, что время срабатывания соответствует время-токовой характеристике. В противном случае подключают электронный осциллограф и регулятором нагрузки устанавливают ток через выключатель, равный 125% расчетного значения номинального рабочего тока  $I_{н.р}$ . При этом на экране осциллографа, подключенного к контрольным гнездам БУРП (выпуска после 1980 г.), не должно быть сигнала. Затем медленно поворачивают ручку «Ном. ток» против часовой стрелки до появления на экране устойчивой последовательности отрицательных импульсов амплитудой 1,7—2,5 В частотой 50—100 Гц (рис. 3.15). Это положение ручки и будет соответствовать расчетной уставке номинального рабочего тока.

При токе  $1,3I_{н.р}$  проверяют настройку максимальной выдержки времени: на экране осциллографа должны наблюдаться одиночные однополярные импульсы с интервалом между ними 7...14,5 с. С увеличением тока в главной цепи этот интервал сокращается, а количество импульсов остается практически неизменным — выдержка времени уменьшается.

Для калибровки уставки *тока отсечки* устанавливают с помощью нагрузочного устройства расчетный ток ее срабатывания и медленно вращают ручку «Ток. Короткое замыкание» против часовой стрелки до отключения автомата. Затем отключают нагру-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

зочное устройство и, не изменяя положения ручек регулировки, снова включают АВ и ток нагрузки, после чего автомат должен отключиться за время не более 1 с.

При калибровке уставки *времени отсечки* селективных выключателей необходимо предварительно в течение 1—2 с пропустить по двум полюсам выключателя ток, равный 0,7—1,0 установленного на шкале значения номинального рабочего тока расцепителя, а затем толчком увеличить его до значения, превышающего не менее чем на 20% уставку тока срабатывания отсечки, например, с помощью резистора R в схеме рис. 3.14. Время измеряется от момента подачи толчка тока до начала размыкания контактов выключателя.

Калибровка рабочей уставки времени срабатывания отсечки (селективные выключатели) выполняется в следующем порядке. Ориентировочно устанавливают расчетное значение уставки на шкале «Время сраб. Короткое замыкание»; включают автомат и подают ток нагрузки, превышающий не менее чем на 20% ток срабатывания отсечки; на время 1...2 с поднимают ток от нуля до 70...100% расчетного значения номинального рабочего тока расцепителя, а затем нажимают кнопку SB, в результате чего срабатывает контактор К (рис. 3.14), создается толчок тока и автомат отключается; время отключения фиксируется секундомером. Если измеренная выдержка времени не соответствует требуемой, изменяют положение ручки уставки и повторяют измерение, добиваясь, чтобы выключатель срабатывал за нужное время.

Калибровка рабочих уставок на БУРП *без защиты в зоне перегрузки* проводится следующим образом. Подав в цепь выключателя ток  $3 I_{н.р.}$  медленно поворачивают ручку «А. Ном. ток» против часовой стрелки до получения показания вольтметра 30 В. Достигнутое положение регулировочной ручки соответствует расчетной уставке номинального рабочего тока. Калибровка и проверка остальных расчетных уставок выполняется так же, как описано выше.

Калибровку расчетных уставок номинального тока на БУРП всех исполнений проводят поочередно для каждой пары последовательно соединенных полюсов выключателя. Во время калибровки или проверки расчетных уставок необходимо следить, чтобы нагрев токоведущих частей выключателя не превышал допустимой температуры. Допускается протекание через выключатель (при его холодном состоянии) тока  $6I_n$  в течение не более 20 с, а  $10I_n$  — не более 10 с, после чего он должен охлаждаться не менее 20 мин без обдува воздухом или 5 мин — с обдувом. Работоспособность полу-

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

проводникового блока сохраняется при колебаниях напряжения питания в пределах 85...110%.

**Автоматические выключатели серии АВМ.** По исполнению максимальной токовой защиты различают неселективные и селективные АВ. Выключатели снабжаются максимальными расцепителями, которые при перегрузках срабатывают с обратозависимой от тока выдержкой времени, а при КЗ — мгновенно (неселективные) или с независимой от тока выдержкой времени (селективные). Обратозависимая характеристика создается с помощью часового механизма, а независимая — с помощью механического замедлителя. При максимальной уставке часового механизма и минимальной — на шкале перегрузок выдержка времени составляет не менее 10 с. Допускается отклонение от номинального тока срабатывания не более чем на  $\pm 10\%$ , отклонение от уставки времени отключения при КЗ — до  $\pm 15\%$ .

Проверяются следующие параметры максимальной токовой защиты автоматов: ток трогания и время срабатывания при этом расцепителей с обратозависимой характеристикой; ток срабатывания расцепителей с независимой выдержкой времени и значение последней; время возврата расцепителей в исходное положение при снижении тока. Расцепитель должен вернуться в исходное положение (без отключения автомата) по истечении  $2/3$  времени, соответствующего уставке, при снижении тока: а) от наименьшей уставки тока перегрузки до 75% номинального тока расцепителя или б) от наибольшей уставки тока перегрузки до 100% номинального тока расцепителя.

Проверка выполняется по схеме рис. 3.15 (обозначения те же, что на рис. 3.14). Ток срабатывания максимальных расцепителей регулируется натяжением пружины.

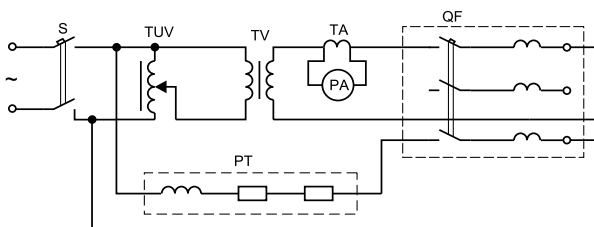


Рис. 3.15. Схема проверки максимальных расцепителей автоматов серии АВМ



#### 3.1.5. Автоматические выключатели серий ВА

**Выключатели фирмы «ДЭК»** («Дальэлектрокомплект») ВА-101 и ВА-201. Выпускаются в одно-, двух-, трех- и четырехполюсном исполнении, с размыкателями теплового и электромагнитного типа. Автоматы серии ВА-101 имеют характеристики отключения типа В, С и D. Номинальные значения тока — от 1 до 63 А. Маркировка ВА-101-3/10, например, относится к трехполюсному автомату с номинальным током 10 А.

Автоматы ВА-201 выпускаются на токи от 25 до 100 А, с характеристиками отключения С и D.

**Выключатели фирмы «Интерэлектрокомплект»** ВА47-29, ВА47-100 и ВА88. Выключатели первых двух серий выпускаются в одно-, двух-, трех- и четырехполюсном исполнении, серии ВА88 — в трех- и четырехполюсном.

Автоматы ВА47-29 имеют характеристики В, С и D, диапазон номинальных токов от 0,5 до 63 А, автоматы ВА47-100 — характеристики С и D, диапазон номинальных токов — от 10 до 100 А. Маркировка ВА47-100/1/C50 обозначает однополюсный автоматический выключатель с характеристикой срабатывания электромагнитного элемента типа С и номинальным током 50 А. Время — токовые характеристики, кривые зависимости параметров выключателей от температуры приведены выше (рис. 3.2, 3.3, 3.4).

Выключатели ВА88 применяются для групповой защиты бытовых и промышленных электроустановок, отличаются высокой отключающей способностью, достигающей 35 кА и даже 65 кА (для ВА88-43). Диапазон номинальных токов — от 10 до 100 А.

**Электротехническая компания «Флавир»** выпускает выключатели ВА 47-63, ВА 47-100, ВА 63, ВА 99 и др.

Выключатели ВА 47-63 имеют характеристики отключения В, С и D, выключатель ВА 47-100 — характеристику D; диапазон номинальных токов соответственно 0,5...63 А и 1...100 А. Эти автоматы отличаются надежностью и высоким сроком эксплуатации.

Выключатели ВА 63 отнесены к аппаратам «премиум класса» благодаря высокому качеству и надежности. Дугогасительная камера обеспечивает высокие износостойкость контактов (не менее 20000 циклов) и предельную коммутационную способность (до 10 кА). Номинальный ток до 63 А, характеристика отключения типа С.

Выключатели ВА 99 имеют широкий диапазон номинальных токов от 12,5 до 1600 А. Искрогасительная камера препятствует раз-

брасыванию искр за пределы корпуса аппарата. Уставка электромагнитного расцепителя для большинства типоразмеров составляет  $10I_n$ , у автоматов с  $I_n = 1600$  А — регулируемая. При установке выключателей в распределительные шкафы следует учитывать тепловыделение, так как мощность рассеяния значительна и, например, для ВА 99/1600 достигает 260 Вт при номинальном токе.

Выключатели ВА 47+N — однофазные, малогабаритные, на сравнительно небольшие токи (от 6 до 32 А), масса одного полюса 0,1 кг. Предназначены для защиты цепей в жилых, общественных и сельскохозяйственных помещениях.

**Выключатели ВА 51, ВА 52** могут эксплуатироваться в электроустановках до 660 В переменного тока. Номинальный ток теплового расцепителя — от 16 до 630 А, уставка электромагнитного расцепителя — до 4000 А (ОАО «Ангарский электромеханический завод»).

**Ульяновский завод «Контактор»** выпускает автоматы ВА04-36 (до 400 А), ВА51-39 (до 630 А), ВА08 (до 800 А), ВА50-41 (до 1000 А), ВА50-43 (до 2000А). На основе аппаратов этой серии созданы выключатели АВ2М, предназначенные для замены АВМ (2000А).

**ОАО «ДЗНВА» (г. Дивногорск)**, обновив свою производственную базу, при производстве аппаратов стремится учесть современные тенденции и требования, как то: расширение диапазона кратности токов отсечки — раньше она выполнялась только десятикратной; возможность изменения время-токовой характеристики; возможность отличить трехфазное замыкание от однофазного; обеспечение электромагнитной совместимости — независимость от внешних электромагнитных помех и минимизация собственных; возможность тестирования выключателя, использования его в системах автоматики и др.

Завод выпускает выключатели серии ВА 5731 на ток от 16 до 100 А, ВА 5735, ВА 57Ф35 (в пенопластовом корпусе) на ток до 250 А, ВА 5739 (до 630 А). В 2006 г. поставлены на производство автомат ВА 57-43 на 1600 А, имеющий пульт тестирования и возможность управления с помощью мобильного телефона, а также модульный аппарат ВА 61-31 на ток до 125 А с индикацией замыкания контактов.

#### 3.1.6. Автоматические выключатели серии «Электрон» (ЗАО «Контактор», г. Ульяновск)

##### 3.1.6.1. Общие сведения

Выключатели этой серии устанавливаются в распределительных устройствах на напряжение переменного тока до 660 В и номинальный ток от 250 до 6300 А. Они допускают нечастые (до 10 раз в сутки) оперативные включения и отключения электрических цепей, в том числе (автоматы до 1600 А) — асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Выключатели поставляются в комплекте с полупроводниковым блоком максимально — токовой защиты от перегрузки и КЗ. После срабатывания защиты производится взвод расцепителей и самовзвод механизма свободного расцепления, т. е. подготовка автомата к повторному включению. Выключатель имеет контакт несоответствия, который замыкает цепь сигнализации при срабатывании МРТ и остается замкнутым до ручного возврата.

Максимально-токовая защита (МТЗ) состоит из датчиков тока, расцепителя максимального тока (МРТ) и исполнительного элемента. Датчиками служат трансформаторы тока, которые одновременно являются источником питания МРТ. При срабатывании МРТ подается сигнал на катушку исполнительного элемента, который воздействует на механизм свободного расцепления выключателя.

Программа работ МТЗ задается ручками управления или выгнутыми штеккерами на лицевой панели блока МРТ. Общий вид панели блока МРТ-5 выключателей переменного тока, а также назначение переключателей и органов управления приведены на рис. 3.16.

При срабатывании МРТ отклонение от уставок, указанных на шкалах, должно быть не более  $\pm 15\%$  для защит по току перегрузки и КЗ, а также по времени перегрузки,  $\pm 20\%$  по времени при КЗ и 0,2...0,4 с для защиты мгновенного действия при КЗ.

Зависимость времени срабатывания выключателей в зоне перегрузки ( $T_n$ ) и КЗ ( $T_k$ ) от кратности сверхтока (по отношению к номинальному рабочему  $I_p$ ) показана на рис. 3.17.

##### 3.1.6.2. Проверка функционирования выключателей

Исправность цепей трансформаторов тока. Подключить омметр поочередно к гнездам разъема «ТЕСТ»: 1-2, 3-4 и 5-6 и измерить сопротивление обмоток ТА (левый, средний и правый полюсы со-

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

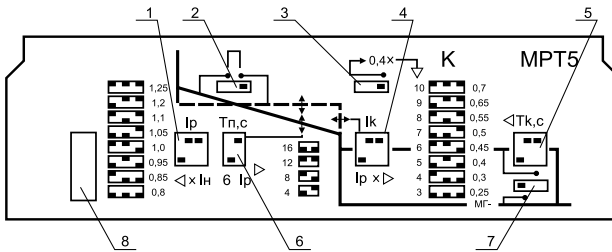


Рис. 3.16. Лицевая панель блока расцепителя МРТ5:

- 1 — уставки номинального рабочего тока; 2 — переключение режимов работы защиты от перегрузки (вправо — с независимой от тока выдержки времени, влево — с зависимой); 3 — значения уставок тока срабатывания защиты от КЗ умножаются на 0,4; 4 — уставки тока срабатывания защиты от КЗ; 5 — уставки выдержки времени защиты от КЗ; 6 — уставки выдержки времени защиты от перегрузки; 7 — включение выдержки времени защиты от КЗ (вправо — введена, влево — отсутствует); 8 — разъем «ТЕСТ»

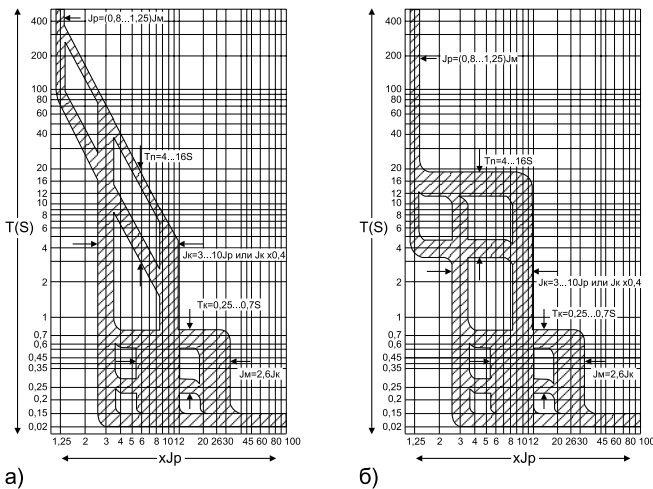


Рис. 3.17. Время-токовые характеристики выключателей «Электрон» с выдержкой времени в зоне перегрузки:  
а) обратозависимой от тока; б) независимой от тока

ответственно). Значения сопротивления должны быть в пределах, указанных в табл. 3.4.

Работа защиты от КЗ. Выставить уставку номинального тока  $I_H = 0,8$ , тока защиты от КЗ  $I_K = 3$  и подать на гнезда 8 — 5 (минус) разъема «ТЕСТ» через сопротивление 220 Ом постоянное или выпрямленное напряжение 180 В; автомат должен отключиться через 1 с.

Работа защиты от перегрузки. Выставить уставки  $I_H = 0,8$ ,  $I_K$  — максимальную для данного выключателя,  $T_H = 4$  с, установить режим работы защиты от перегрузки — с зависимой выдержкой времени (переключатель П в левом положении), переключатель 0,4х — в левом положении. При подаче напряжения 2 автомат должен отключиться через 2,5...5,5 с.

#### 3.1.6.3. Проверка уставок

Проверка уставки по току срабатывания защиты от перегрузки. Выставить  $I_H = 0,8$ , переключатель 0,4х установить в левое положение, к гнездам разъема «ТЕСТ» подключить осциллограф.

Через два последовательно соединенных полюса выключателя пропустить ток  $1,44 I_p$ . При этом на экране осциллографа должна появиться последовательность импульсов с амплитудой 10...13 В, вырабатываемых схемой выдержки времени.

Уменьшить ток до  $1,06 I_p$ , выключить и вновь включить ток. Импульсы на экране должны отсутствовать.

Проверка уставки по току срабатывания защиты от КЗ. Выставить  $I_H = 0,8$ ,  $I_K = 3$ , переключатель 0,4х установить в левое положение.

При подаче тока  $2,55 I_p$  в течение 1 с выключатель должен оставаться включенным, а при токе  $3,45 I_p$  — отключиться за время не более 1 с.

Проверка уставки выдержки времени защиты от перегрузки. Выставить  $I_H = 0,8$ ,  $T_H = 4$  с,  $I_K$  — максимальное значение. Переключатель 0,4х установить в левое положение, переключатель режима работы защиты от перегрузки ИТ — в положение с зависимой выдержкой времени. После подачи через выключатель ( $I_H \leq 2500$  А) тока  $6 I_p$  он должен отключиться через 3,2...4,8 с.

Проверка уставки выдержки времени защиты от КЗ. Выставить  $I_H = 0,8$ ,  $I_K = 3$ ,  $T_K = 0,7$  с и поставить переключатель 0,4х в левое положение. После подачи тока  $4 I_p$  автомат должен отключиться через 0,63—0,77 с.

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

Таблица 3.4

#### Сопротивление постоянному току вторичных обмоток трансформаторов тока

Тип выключателя	Номинальный ток, А	Сопротивление, Ом
Э306	250	(51 ±2,5)х2
	400	(84 ±4,5)х2
	630	(138 ±7)х2
	800	(176 ±9)х2
	1000	(234 ±12)х2
Э16, Э25	630	(153 ±8)х2
	1000	(255 ±13)х2
	1600	(420 ±21)х2
	2500	(1080 ±54)х2
	4000	(1720 ±86)х2
Э40	2500	(1640 ±82)х4
	4000	(2740 ±137)х4
	6300	(4500 ±225)х4

При отсутствии нагрузочного устройства достаточной мощности можно проверить рабочие уставки МРТ вторичным током. Однако в этом случае надо иметь в виду, что значение коэффициента трансформации трансформаторов тока не остается постоянным, а изменяется в зависимости от кратности нагрузочного тока. Поэтому метод рекомендуется лишь в том случае, когда соответствующие значения известны достаточно достоверно или кратность тока невелика. Коэффициент трансформации при номинальном токе легко определить из обмоточных данных, но с увеличением кратности свыше 3...4 значение его резко возрастает и при кратности 7...10 может превысить номинальное на 30%.

Переключатели, не упомянутые в пп. 3.1.6.2 и 3.1.6.3, могут находиться в любом положении.

#### 3.1.7. Автоматические выключатели зарубежных фирм

Автоматические выключатели бытового и промышленного применения выпускают все ведущие электротехнические фирмы. Основные данные некоторых из этих аппаратов, наиболее широко применяемых в России, приведены ниже (табл. 3.5). Индексом N обозначен здесь «нейтральный» полюс, конструктивно отличающийся от других отсутствием дугогашения.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

**Фирма «ABB».** Автоматические выключатели входят составной частью в модульную систему System pro M. Справочные данные выключателей с комбинированными расцепителями приведены в табл. 3.5.

*Таблица 3.5*  
*Основные характеристики автоматических выключателей*  
*фирмы «ABB»*

Серия	Число полюсов	Номинальный ток, А	Характеристика отключения
S 230 R	2, 4	6...40	C
	1, 3	6...63	C
S 240	1, 1+N, 2, 3, 3+N, 4	6...32	C
S 250	1, 1+N, 2, 3, 3+N, 4	0,5...63	B, C, D
S 270	1, 1+N, 2, 3, 4	0,5...63	B, C, D, K
S 280	1, 2, 3, 4	0,5...63	B, C, D, K, Z
S 280 UC	1, 1+N, 2	0,5...63	B, C, K, Z
S 290	1, 3	80, 100, 125	C,D

Выпускаются также автоматические выключатели серии M 280, снабженные только электромагнитными расцепителями; номинальный ток в диапазоне 0,5...63 А, число полюсов от 1 до 4; применяются преимущественно в цепях электродвигателей.

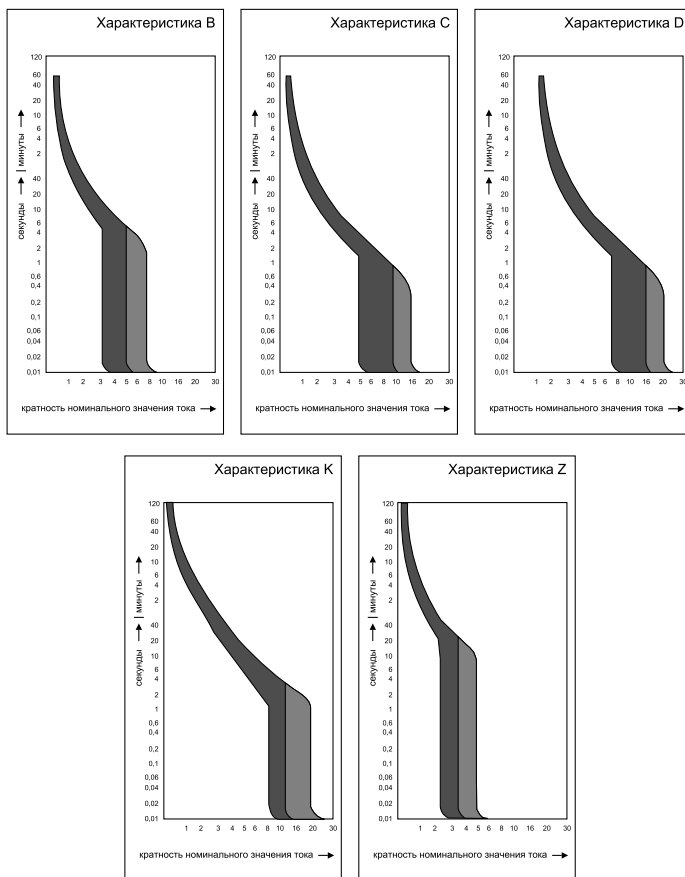
Автоматы с характеристикой **В** предназначаются для защиты активной нагрузки и протяженных линий освещения, автоматы с характеристикой **С** используют в цепях с активной или активно — индуктивной нагрузкой, с характеристикой **Д** — при индуктивной нагрузке и больших пусковых токах. Характеристики **К** и **З** находят применение для цепей с индуктивностью, с полупроводниками, в измерительных цепях. Эти характеристики показаны на рис. 3.18.

Номинальное значение тока дается при 20°С для автоматических выключателей с характеристиками **К** и **З** и при 30°С — с характеристиками **В**, **С** и **Д**. При отклонении температуры от указанной значение неотключающего тока корректируется путем умножения на поправочный коэффициент (рис. 3.19).

Аналогичным образом учитывается воздействие расположенных по соседству других приборов; значения поправочного коэффициента приводятся ниже.

Количество приборов	1	2	3	4	5	6	7	8	>8
Поправочный коэффициент	1	0,95	0,90	0,86	0,82	0,80	0,78	0,77	0,76

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)



*Рис. 3.18. Характеристики срабатывания автоматических выключателей производства концерна АВВ*

При нагрузке длительностью более одного часа вводится уменьшающий коэффициент 0,9. Так, например, неотключающий ток автомата S 252 C 16 (характеристика С, номинальный ток 16 А при 30 °С) при нагрузке более 1ч, температуре окружающей среды 40 °С и наличии 8 соседних приборов будет:  $16 \times 0,9 \times 1,07 \times 0,77 = 11,86$  А. Эквивалентное номинальное значение тока находится делением неотключающего тока на коэффициент 1,13 для выключателей с характеристиками В, С и D и на 1,05 — с характе-



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

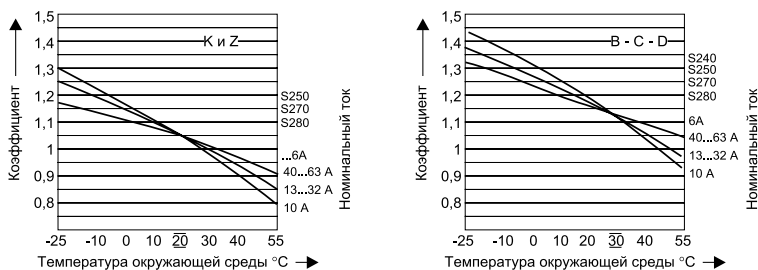


Рис. 3.19. Влияние температуры окружающей среды

ристиками **K** и **Z**. В данном примере эквивалентный номинальный ток будет  $I_n = 11,86 / 1,13 = 10,5 \text{ A}$ .

**Фирма Siemens.** По конструкции аппараты аналогичны выключателям фирмы АВВ и также предназначены как для бытового, так и для промышленного применения. Различаются исполнением в соответствии с программами: стандартная (5SQ2, 5SQ3, 5SX2, 5SX4), универсальная (5SX5) и сильноточная (5SX6, 5SX7). Основные характеристики этих выключателей сведены в табл. 3.6.

Автоматические выключатели системы **N**, служащие для защиты цепей от сверхтока, имеют четыре типа характеристики мгновенного расцепления **A**, **B**, **C** и **D**, большой ресурс, высокую стойкость к свариванию контактов и столь высокую токоограничивающую способность, что предельное значение величины  $I^2t$  не достигается и наполовину.

Таблица 3.6

Основные характеристики автоматических выключателей фирмы «Siemens»

Серия	Число полюсов	Номинальный ток, А	Характеристика отключения
5SQ2	1, 1+N, 2, 3, 3+N	0,5...4,0	C
	1, 1N, 2, 3	6...63	B
5SX2	1, 2, 3	0,3...4,0	C
	1, 1+N, 2, 3, 3+N	6,0	B, C
	1, 2, 3	8,0	C
	1, 1+N, 2, 3, 3+N	10...63	B, C

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

Серия	Число полюсов	Номинальный ток, А	Характеристика отключения
5SX4	1, 2, 3	0,5...4,0	С
	1, 1+N, 2, 3	6,0	В
	1, 1+N, 2, 3, 3+N	6,0	С
	1, 2, 3	8,0	С
	1, 1+N, 2, 3, 3+N	10...32	В, С
	1, 2, 3	40	В
	1, 1+N, 2, 3, 3+N	40	С
	1, 2, 3	50	В
5SX5	1, 2	0,5...3,0	С
		6...32	В, С
		40	С
		50	С
5SX7	1, 2, 3, 4	63...125	С, D

Автоматические выключатели предназначены для защиты: автоматы с характеристикой типа **A** — полупроводниковых приборов, преобразователей, цепей с большой протяженностью; типа **B** — проводов в жилых зданиях; **C** — проводов в цепях с высокими токами включения оборудования (лампы накаливания, электродвигатели и т. п.); **D** — электрооборудования с большими бросками тока (трансформаторы, конденсаторы и др.). Характеристики расцепления показаны на рис. 3.20.

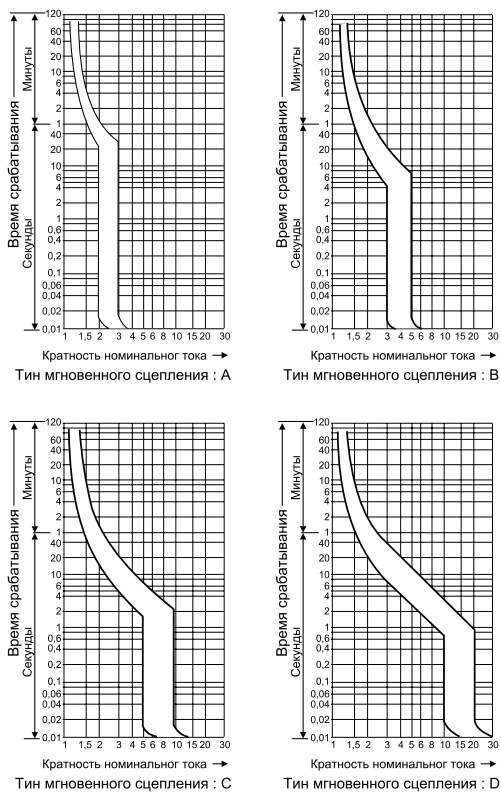
Новые автоматические выключатели SENTRON WL и SENTRON VL покрывают весь диапазон номинальных токов от 16 до 6300 А. Замена модуля номинального тока осуществляется в течение нескольких секунд, не требуя при этом трудоемкой замены трансформаторов тока. Обеспечивается объединение выключателей между собой и с другими компонентами в общую информационную сеть, дистанционная диагностика и сервис через сеть Интернет. Различные исполнения электронного расцепителя позволяют реализовать как простейшие защиты от перегрузки и КЗ, так и самые сложные с возможностью удаленного параметрирования и многими измерительными и сигнальными функциями.

**Фирма Legrand.** Выпускаются аппараты серий DX на ток от 1 до 125 А, LR (6...63 А), предназначенные специально для электрооборудования жилых и общественных зданий, более мощные выключатели серии DPX (16... 1600 А) и сильноточные («силовые») DMX

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

(2500...4000 А) с характеристиками отключения **B**, **C** и **D** (рис. 23). Выключатели оснащаются электронными расцепителями типов MP17 (стандартная комплектация) и MP20 (по заказу), допускающими ступенчатую регулировку уставок защиты от перегрузки в пределах от 40 до 100% номинального тока.

Основные характеристики автоматических выключателей широко распространенной серии DX приведены в табл. 3.7. Изменение значений номинального тока в зависимости от внешних условий отражено в табл. 3.8 и 3.9 (для автоматов серии LR).



**Рис. 3.20. Время-токовые характеристики автоматических выключателей фирмы «Siemens» (типы мгновенного расцепления A, B, C и D)**

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

В документах фирмы приводятся также таблицы селективности между данным автоматическим выключателем и предвключенными аппаратами максимальной токовой защиты в зависимости от типа характеристики отключения автомата.

Производитель указывает, до каких значений тока КЗ обеспечивается селективность между данным и предвключенным автоматическими выключателями в зависимости от их исполнения и номинального тока, а также от типа мгновенного срабатывания данного автомата. Указываются границы селективности при КЗ между автоматами. Если значение тока КЗ в месте установки выключателя неизвестно или оно превышает номинальную отключающую способность последнего, то во избежание повреждения АВ должен быть включен еще один аппарат защиты.

Таблица 3.7

*Основные характеристики автоматических выключателей серии DX фирмы «Legrand»*

Число полюсов	Номинальный ток, А	Тип характеристики
1+N	2	C
1, 2, 3, 4	6...32	B
1, 1+N, 2, 3, 4	6, 10, 16, 20, 25, 32	C
1, 2, 3, 4	13, 40, 50, 63	B, C

Таблица 3.8

*Изменение номинального значения тока выключателей серии LR фирмы «Legrand» в зависимости от количества установленных рядом аппаратов*

Количество автоматов	1... 3	4 ...6	7...9	Более 10
Поправочный коэффициент	1	0,8	0,7	0,6

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

Таблица 3.9

Поправочные коэффициенты к значению номинального тока ( $I_n$ ) выключателей серии LR фирмы «Legrand» в зависимости от температуры окружающей среды

Ток $I_n$ , А	Температура, °С					
	-25	-10	0	10	20	40
6	7,5	7	6,6	6,4	6,2	5,8
16	20	18,7	18	17,3	16,6	15,4
25	31,5	29,5	28,3	27,2	26	24
40	51	48	46	44	42	38
63	64	60	57,5	55	52,5	47,5

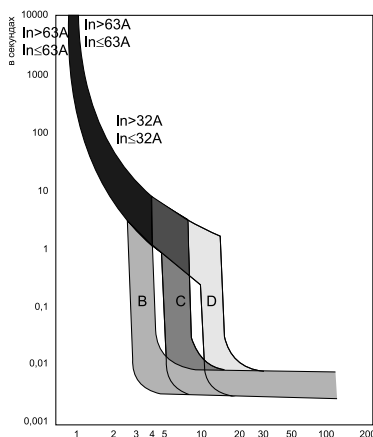


Рис. 3.21 Время — токовые характеристики срабатывания автоматических выключателей фирмы «Legrand»

**Фирма Schneider Electric** (торговые марки Merlin Gerin, Telemecanique). Разработана и выпускается гамма устройств защиты, контроля и управления Multi 9, в состав которой входят автоматические выключатели серий С60а, С60N, С120 N, NG125N и специально для оборудования жилых зданий — гамма «Домовой» с выключателями серии ВА63. Все они характеризуются большим сроком службы (выдерживают более 20000 коммутаций) и быстродействием (коммутация или разрыв цепи происходят менее чем за

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

6 мс), а также полной совместимостью с другими устройствами этой фирмы. Характеристики отключения автоматов: В — срабатывание электромагнитных расцепителей в пределах  $3...5 I_n$ , С —  $5...10$ , D —  $10...14$ . Значение номинального тока определяется при температуре  $30^\circ\text{C}$ . При большей температуре характеристики защиты от перегрузки изменяются незначительно. Основные характеристики автоматов серий С и NG приведены в табл. 3.10, ВА63 — в п. 3.1.5.

Таблица 3.10

Серия	Номинальный ток, А	Число полюсов	Характеристика отключения
С60а	2	1, 2, 3, 4	В
	6...40	1, 2, 3, 4	В, С
С60N	0,5	1, 2, 3, 4	С, D
	1...63	1, 2, 3, 4	В, С, D
С120N	63...125	1, 2, 3, 4	В, С, D
NG125N	10...63	1, 2, 3, 4	С
		1, 2	С
	80	3, 4	В, С, D
		3 + N	С
	100, 125	3, 4	В, С, D
3 + N		С	

Выпускаются и более мощные выключатели: Compact на токи 15...1250 А, Interpact на 40...2500 А, Masterpact на 630...6300 А. Масса их сравнительно невелика и у аппарата Masterpact на 4000 А, например, составляет 90 кг (у выключателя «Электрон» на тот же ток — 200 кг). Новая серия Compact NS на 80...1600 А способна полностью удовлетворить потребность в выключателях для сети 0,4 кВ. Эти аппараты обеспечивают селективность вплоть до уровня предельной отключающей способности при каскадном соединении с нижерасположенным автоматическим выключателем, обладающим меньшей отключающей способностью.

#### 3.1.8. Автоматические выключатели с микропроцессорными блоками управления и защиты

Широкое применение микропроцессорных систем для защиты и управления электрооборудованием привело к использованию их

в коммутационных аппаратах. Электронные узлы контроля и управления, связанные с программируемыми контроллерами и/или системами АСУ электроснабжения, используются в электрооборудовании зданий и промышленных установок.

Большинство производителей коммутационных аппаратов для систем электроснабжения и электроприводов выпускают автоматические выключатели с электронными блоками, обеспечивающими сетевую связь с микропроцессорными устройствами высшего уровня. Такие блоки позволяют дистанционно изменять уставки при изменении конфигурации сети (например, при срабатывании АВР), контролировать положение коммутационного аппарата, фиксировать рабочие и аварийные переключения.

Автоматические выключатели *Sentron* фирмы *Siemens* на ток до 6300 А оборудованы микропроцессорным модулем управления и защиты, поддерживающим широкий набор функций: максимальную токовую защиту присоединений, селективную токовую отсечку, передачу данных о состоянии выключателя по сети PROFIBUS или Интернет. Измерительные устройства позволяют выводить на щитовые приборы или передавать в сеть значения токов, напряжений, мощности, электроэнергии, частоты, cosφ, температуры окружающей среды, данные о гармоническом составе. Микропроцессор ведет протокол событий, включающий сведения о числе и времени срабатывания выключателя, значения токов перегрузки или КЗ, общее количество срабатываний.

По сети PROFIBUS возможно управление выключателем и изменение уставок защит при изменении конфигурации защищаемой сети. При использовании ноутбука, его подключают к модулю через адаптер данных BDA, который содержит программное обеспечение для чтения и конфигурации данных в памяти выключателя.

Существенная информация о работе выключателя может быть передана в виде SMS сообщения на мобильный телефон эксплуатационного персонала. Модуль функционирует независимо от наличия вспомогательного напряжения питания при срабатывании защиты, но оно необходимо для передачи информации. Устройство обеспечивает сбор данных для технического обслуживания, включая информацию об износе силовых контактов.

Настройка уставок защит производится либо непосредственно на модуле электронного расцепителя, либо с адаптера данных BDA (с сохранением уставок в памяти последнего), либо с РС.

Автоматические выключатели *Tmax*, *Isomax* фирмы *ABB* на ток до 6300 А содержат микропроцессорные блоки защиты с тем же почти набором функций, что и у модулей фирмы *Siemens*, за исключением измерения тока (только пофазно). Сетевой обмен данными может выполняться по многим распространенным протоколам: PROFIBUS, Modbus RTU и др. Дисплейная панель может быть использована только для автоматов с ручным приводом. На панель выводятся те же данные, которые запрашиваются по сети. Модуль тестирования и настройки, подключаемый к отдельному разъему, позволяет производить тестирование, программирование или считывание параметров защиты. Модуль можно подключить к РС и переписать данные настроек защит выключателя, выполненных с модуля.

Микропроцессорные блоки защиты *Micrologic* в выключателях *Masterpact* на ток до 6300 А фирмы *Merlin Gerin* обеспечивают набор функций управления, сигнализации и измерения, идентичный предлагаемому фирмой *Siemens*. Параметры качества электроэнергии: гармонический состав, коэффициент искажения, амплитуда и фаза гармоник записываются в память и могут быть переданы по сети. На дисплей блока выводится ток наиболее нагруженной фазы и другие регистрируемые параметры. Источник питания на 24 В постоянного тока поддерживает режимы записи, сохранения информации и передачи данных; он содержит аккумулятор, обеспечивающий непрерывную работу дисплея в течение 12 часов.

Для настройки защит и чтения всей информации, находящейся в блоке *Micrologic*, имеется автономный испытательный комплект с клавиатурой и дисплеем, непосредственно подключаемый к блоку. Испытательный комплект с РС дополнительно обеспечивает: сравнение реальной кривой отключения аппарата с каталожными кривыми, хранящимися в памяти компьютера, сброс сигнализации, считывание и изменение заданных параметров и показаний счетчиков, просмотр хронологических протоколов и журналов, запись параметров тока и напряжения, анализ гармоник (рис. 3.22).

В выключателях фирмы *MITSUBISHI ELECTRIC* цифровая обработка сигнала обеспечивает точное срабатывание токовой защиты при искаженной форме тока. Опционно поставляется модуль предварительной сигнализации, который выдает предупреждающий сигнал перед срабатыванием автоматического выключателя и разрывом защищаемой цепи. Пользователь может выбрать шесть различных параметров (уставки по току и времени) в качестве ха-



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

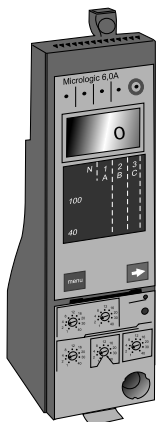


Рис. 3.22.

Внешний вид блока Micrologic

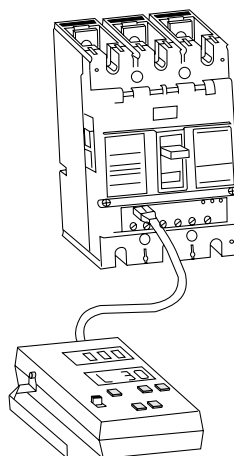


Рис. 3.23.

Подключение переносного тестера

характеристик отключения, что позволяет отстроиться от колебаний тока нагрузки. Проверку параметров облегчает использование портативного тестера (рис. 3.23). Отличительной особенностью является также наличие защиты от перегрузки нейтрали, когда ток в ней превышает фазный и создается угроза возгорания проводки.

Цифровой измеритель (MDU) отображает ряд характеристик тока нагрузки. Измеренные значения и/или сигнал АВАРИЯ могут быть переданы через вычислительную сеть. MDU может быть установлен отдельно от выключателя. Лицевая панель измерителя с кнопками управления и дисплеем показана на рис. 3.24.

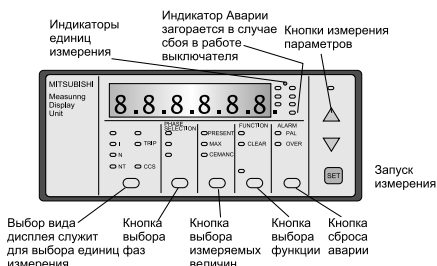


Рис. 3.24. Лицевая панель измерителя MDU

#### 3.1.9. Комплектные устройства для испытания расцепителей током нагрузки

##### 3.1.9.1. Система испытания первичным током ODEN AT (фирма «Programma», представитель в РФ — компания «Пергам»)

Является многофункциональным агрегатом, способным вырабатывать ток от нескольких сотен до 22000 А и, кроме того, производить измерение времени, тока и напряжения, полного и активного сопротивления, фазового угла, мощности и коэффициента мощности и выводить значения этих величин на цифровой дисплей, а также тестирование устройств релейной защиты и испытание высоковольтных выключателей. Конструктивно система состоит из нескольких блоков (модулей), которые могут устанавливаться и транспортироваться на тележке (рис. 3.25, а) или переноситься отдельно. Модульная компоновка включает блок управления и один, два или три источника тока одного из типов S, X, H, соединяемых между собой параллельно или последовательно. Максимальные значения тока, которые при этом можно получить в течение определенного времени, сведены в табл. 3.11. Интерфейс, панель управления (рис. 3.25, б) удобны для пользователя.

Протекание тока контролируется с помощью встроенного таймера и может быть прекращено с использованием внешнего напряжения или контакта. Можно получить кратковременный ток или последовательность импульсов с заданными амплитудой и интервалом между ними, что позволяет избежать перегрева источника тока и испытываемого объекта. Испытание выключателя прекращается в тот момент, когда главные контакты его размыкаются, разрывая цепь тока. Функция «Удержание» позволяет сохранить на дисплее то значение тока, при котором он прерывается. Дополнительный модуль позволяет прогружать выключатель

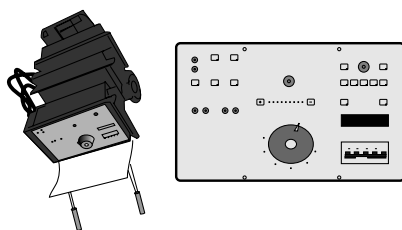


Рис. 3.25. Внешний вид системы ODEN AT: а) блоки на тележке; б) панель управления

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

постоянным (выпрямленным) током 4,5 кА в течение 5 с. Измерительные приборы показывают среднеквадратичные значения напряжения и тока.

Таблица 3.11

*Максимальный выходной ток (А) модулей-источников ODEN AT при их параллельном или последовательном соединении и напряжении (В) холостого хода (питание 380 В)*

Модель ODEN AT	Соединение модулей тока	Напряжение, В	Продолжительность работы			№ кривой рис. 3.26	
			Длительно	3 мин	1 с	а	б
1S	–	6	1000	2000	7000	3	
2S	Параллельно Последоват.	6	1900	4000	3000	4	
		12	900	2000	6000	2	
3S	Параллельно Последоват.	6	1900	4000	13000	5	
		18	600	1400	4400	1	
1X	–	6	1000	2000	7000	3	
		30	160	300	1200		6
		60	80	150	600		3
2X	Параллельно Последоват.	6	1900	4000	13000	4	
		12	900	2000	6000	2	
	Параллельно Последоват.	30	320	600	2500		7
		60	160	300	1200		5
		120	80	150	600		2
3X	Параллельно Последоват.	6	1900	4000	13000	5	
		18	600	1400	4400	1	
	Параллельно	30	380	850	2600		8
		90	120	290	880		4
		180	60	145	440		1
1H	–	3,6	1250	2600	11000	8	
2H	Параллельно Последоват.	3,6	2500	5300	21000	9	
		7,2	1250	2500	10900	7	
3H	Параллельно Последоват.	3,6	3800	7700	21900	10	
		10,7	1250	2600	7200	6	

Промежуточные значения тока могут быть получены из кривых рис. 3.26, представляющих зависимость допустимого тока от времени нагрузки. Номера кривых, соответствующих параллельному

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

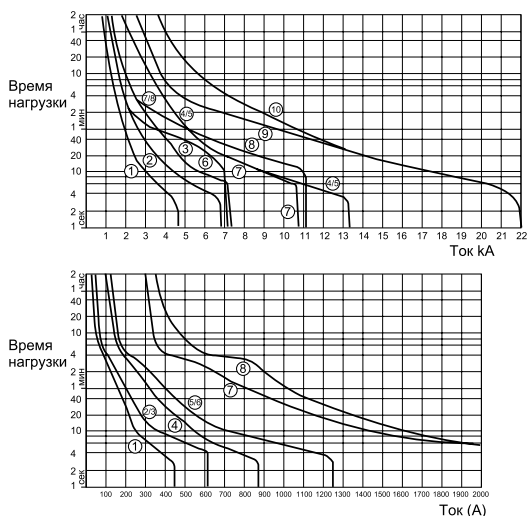


Рис. 3.26. Выходной ток системы Oden AT при напряжении питания 380 В: а) напряжение холостого хода модуля 0...6 В; б) диапазон холостого хода 0...30/60 В

или последовательному соединению модулей той или иной системы, указаны в последнем столбце табл. 3.11. Зависимости для систем типа X и S аналогичны.

Масса блока управления — 25 кг, источников тока S, X, H — соответственно 42, 45 и 49 кг. Стоимость системы зависит от типа и количества модулей — источников и дополнительных аксессуаров. Например, при максимальной комплектации система Oden AT/3H (три модуля — источника типа H) с током на выходе 21,9 кА, тележкой на пневмошинах и соединительными кабелями стоит порядка 1 млн. руб, а Oden AT/1S (один модуль типа S) с током на выходе 7 кА — почти вдвое меньше.

#### 3.1.9.2. Испытательные устройства серии «Сатурн» (г. Зеленоград, НПФ «Радиус»)

Это — многофункциональные установки, предназначенные, в частности, для проверки и настройки автоматических выключателей с тепловыми и электромагнитными расцепителями, на напряжение 220/380 В, 50 Гц. Установка «Сатурн-М» представляет собой одноблочное, «Сатурн-М1» — двухблочное устройство, состо-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

ящее из базового (аналогичного «Сатурн-М») и силового блоков. Установки обеспечивают возможность проверки защит как первичным, так и вторичным током с измерением его действующего значения и времени отключения проверяемого аппарата.

Силовая часть устройства содержит тиристорный замыкатель и трансформатор тока с двумя первичными и одной вторичной обмотками. Тиристоры, включенные встречно — параллельно, выбраны на ток 1200 А каждый («Сатурн-М1»), установлены на радиаторах и снабжены тепловой защитой. Управление схемой осуществляется контроллером, выполненным на базе микропроцессора. Силовая часть может быть дополнена нагрузочным трансформатором и внешним трансформатором тока, а также регулировочным автотрансформатором. Измерения осуществляются с помощью встроенного или внешнего трансформатора тока. На схеме рис. 3.27 включена в работу одна из вторичных обмоток встроенного трансформатора тока (выводы 3—4); вторичная обмотка внешнего трансформатора тока подключается к выводам 5—6 (пунктир). Резистор R служит для обеспечения необходимого тока удержания тиристоров, его сопротивление выбирается в пределах 68...100 Ом, мощность 150—200 Вт.

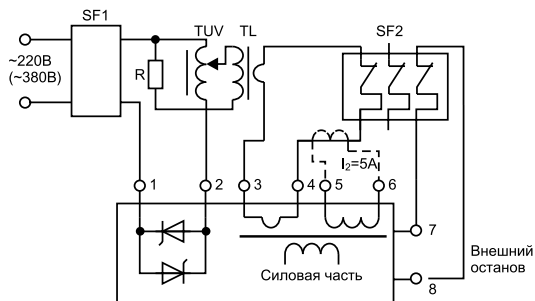


Рис. 3.27. Общая принципиальная схема испытательной установки «Сатурн»: SF1, SF2 — сетевой и испытываемый автоматические выключатели; TUV — автотрансформатор, TL — нагрузочный трансформатор

Испытательный ток может быть получен непосредственно от сети путем замыкания цепи с выключателем за местом его установки с помощью тиристоров, позволяющих при этом плавно регулировать значение тока. Если для испытания требуется ток большой,

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

чем ток КЗ в данной точке сети, применяется нагрузочный трансформатор, в качестве которого поставляется малогабаритный трансформатор НТ-12. Благодаря сильной индуктивной взаимосвязи и малым магнитным потокам рассеяния обмоток этот аппарат работает в режиме трансформатора тока. Конструкция обмоток позволяет подключать его на напряжение сети 220 или 380 В. Номинальный вторичный ток трансформатора — 7 кА при времени включения не более 20 с, максимальный — 12 кА не более 2,2 с ; масса аппарата не более 25 кг, стоимость до 40 тыс. руб.

Однако применение нагрузочного трансформатора само по себе не приводит к существенному улучшению формы тока, искажаемой тиристорным регулированием. Полностью решить эту проблему позволяет только применение автотрансформатора, например, ЛАТРа на 10 А и более. При этом тиристоры остаются постоянно открытыми на 100% и работают в качестве коммутатора (включено — отключено), ограничивая время протекания тока.

Измерение тока до 2500 А производится с помощью встроенного трансформатора тока, при большем токе применяют внешний трансформатор тока («бублик») и разветвитель в виде пучка параллельных проводов. Фирма выпускает измерительные трансформаторы типа ТМ-0,66Р-5 с номинальным первичным током 3 кА и возможностью пятикратной перегрузки, разветвитель же при необходимости изготавливается потребителем.

Основные технические характеристики серии «Сатурн»:

Диапазон регулирования и измерения тока в схеме без нагрузочного трансформатора, А

«Сатурн-М», базовый блок	10...2000
«Сатурн-М1»	30...12000

Диапазон регулирования первичного тока нагрузочного трансформатора, А

Диапазон измерения тока, А	
со встроенным трансформатором тока	10...2500
с внешним трансформатором тока	100...99990

Диапазон задания и измерения длительности протекания тока и времени отключения аппарата, с

Допустимая длительность, с , протекания тока в схеме без нагрузочного трансформатора при токе, А

«Сатурн-М»	100	100
	500	5

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

«Сатурн-М1»	500	40
	2000	3
	12000	0,06
Масса каждого блока, не более, кг		13
Стоимость устройств «Сатурн-М» и «Сатурн-М1» — около 50 и 70 тыс. руб. соответственно.		

Рекомендуются три варианта комплектации устройства:

а) только базовый блок или «Сатурн-М» — для проверки непосредственно от сети автоматов с уставкой теплового расцепителя до 100—200 А и отсечкой до 1500—2000 А;

б) базовый блок или «Сатурн-М», нагрузочный трансформатор НТ-12 и измерительный трансформатор тока ТМ-0,66Р-5 — в случаях, когда искусственное КЗ производить нежелательно или если ток КЗ в сети либо не достигает требуемого значения, либо превышает 2000 А;

в) полный двухблочный комплект «Сатурн -М1», нагрузочный трансформатор НТ-12 и измерительный трансформатор ТМ-0,66Р-5 — для всех случаев.

Проверку непосредственно от сети 0,4 кВ в режиме искусственного КЗ рекомендуется проводить с последовательно включенным в цепь дополнительным автоматом с более грубыми, чем у проверяемого, уставками теплового и электромагнитного расцепителей. При проверке срабатывания электромагнитного элемента рекомендуется устанавливать предельное значение тока на 20...30% больше предполагаемого тока срабатывания, длительность тока 0,02 с и шаг открытия тиристорov 2%. При проверке теплового расцепителя рекомендуется выставить уставки испытательного тока и времени его протекания на 50...60% больше ожидаемых значений. Ввиду ограниченной длительности протекания тока можно использовать соединительные провода сравнительно небольшого сечения: 10...16 мм<sup>2</sup> при токах до 2 кА и 60...100 мм<sup>2</sup> при токах до 12 кА. Отсчет времени прекращается (цепь «останов» на рис. 3.27) свободным силовым контактом проверяемого выключателя в момент разрыва тока его рабочим силовым контактом.

Проверка мощных автоматических выключателей непосредственно от сети ведется с применением силового блока устройства «Сатурн-М1», причем измерения производятся с помощью встроенного в базовый блок трансформатора тока при испытательном токе до 2500 А, а при большем его значении — с помощью внеш-

него трансформатора тока, в частности, типа ТМ-66Р-5. В последнем случае не требуется использования громоздких разветвителей тока, повышается точность измерений.

Измерение тока при ожидаемых значениях его до 2 кА рекомендуется проводить в ручном режиме с открытием тиристорov на 100%. При ожидаемых значениях тока в пределах 2...12 кА целесообразно устанавливать открытие тиристорov на 50% и использовать силовой блок. Для расчета истинного тока КЗ следует принимать коэффициент 2 и по возможности уточнить полученное значение при 100% — ном открытии тиристорov.

Заметное влияние на точность измерений оказывает наличие аperiodической составляющей тока. Для уменьшения этого влияния при проверке отсечки рекомендуется устанавливать целое число периодов тока. Той же цели способствует и повышение активного сопротивления в цепи нагрузки за счет уменьшения сечения соединительных проводов, введения дополнительного провода или резистора сопротивлением 0,5...1,0 Ом, мощностью 1...2 кВт. Измерять ток отсечки рекомендуется при углах открытия тиристорov 30...40% и более. Возможна проверка подачей однократного импульса тока в ручном режиме с углом открытия тиристорov, значение которого предварительно определено в автоматическом режиме.

При проверке тепловых элементов измеренное значение тока может получиться меньше заданного из-за влияния аperiodической составляющей тока и нагрева проводников. При определении необходимого угла открытия тиристорov (наборе тока) испытание проводится короткими импульсами длительностью 0,02 с. Когда тиристоры отпираются в начале положительной полуволны напряжения на вентиле, наличие аperiodической составляющей в импульсе приводит к завышению измеряемого значения тока, в связи с чем угол отпирания вентилей выбирается недостаточный. При большей длительности тока аperiodическая составляющая уменьшается до нуля и измеренное значение тока оказывается меньше заданного. То же происходит и при неправильном выборе проводов, когда в результате нагрева их сопротивление увеличивается. Истинным значением тока следует считать его измеренное значение.

Для измерения больших токов (свыше 2 кА для отсечки и 0,5 кА для проверки теплового элемента) целесообразно использовать внешний трансформатор тока. В этом случае уменьшается износ блока управления и встроенного трансформатора тока, а так-



же осуществляется автоматический пересчет показаний прибора при использовании разветвителя в виде параллельно включенных одинаковых проводников с трансформатором тока на одном из них. До начала работы с устройством «Сатурн» рекомендуется проверить исправность тиристоров.

Проверку точности измерения тока и времени рекомендуется производить с помощью нагрузочного трансформатора на ток 500...2000 А и эталонного амперметра, реагирующего на действующее значение тока. Соотношение погрешностей средств измерения и проверяемого устройства должно быть 1:3.

В качестве измерителя тока можно использовать трансформаторы тока типа УТТ-6М2 с номинальным током 2 кА и классом точности 0,2 или типа И-523 с номинальным током 10 кА и классом точности 0,05. Проверка проводится в ручном режиме при длительности тока 5...10 с и разной степени открытия тиристоров. Относительная погрешность измерения тока должна быть не более  $\pm 10\%$ . Погрешность измерения времени в продолжение 40...60 с не должна превышать 0,3 с.

Проверка может производиться и без нагрузочного трансформатора. В этом случае резистор в цепи нагрузки выбирают сопротивлением 8...10 Ом, а длительность протекания тока — не более 5...6 с, чтобы ограничить требуемую мощность резистора. Погрешность измерения этого интервала времени не должна превышать 0,1 с.

#### **3.1.9.3. Нагрузочные комплекты ООО «ИнтерМикс» (г. Санкт-Петербург)**

**Комплект с регулятором РТ-2048** состоит из силового блока и пульта управления. Силовой блок содержит нагрузочный трансформатор, тиристорный узел и датчик тока. Пульт управления состоит из: а) блока питания, вырабатывающего напряжения питания для всех узлов; б) блока управления регулятором; в) блока измерения и вычисления действующего значения тока; г) блока индикации действующего значения испытательного тока и его длительности. Предусмотрены два режима работы: кратковременный (импульсный) и длительный. Комплекты выпускаются в четырех исполнениях в зависимости от максимального значения испытательного тока: на 1, 2, 5 и 10 кА.

Малогабаритный нагрузочный комплект РТ-2048-01 содержит силовой блок на основе специального трансформатора НТИ-1 и пульта управления ПУ. Кроме основных функциональных блоков,

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

в комплектацию входят токопроводы сечением 35 мм<sup>2</sup>, питающий кабель для подключения к сети и провода секундомера с зажимами типа «крокодил», а также сопроводительные документы. Функциональная электрическая схема комплекта показана на рис. 3.28.

Обеспечиваются два режима работы — кратковременный (импульсный) с диапазоном длительности протекания тока 0,02 ... 1,6 с и длительный и три режима индикации:

- ровное свечение индикаторов соответствует нормальному измерению;
- мигающий свет соответствует переполнению счетчиков в канале измерения и требует перехода на более высокий предел;
- отсутствие индикации свидетельствует о наличии в испытательном токе аperiодической составляющей и указывает на необходимость уменьшения тока.

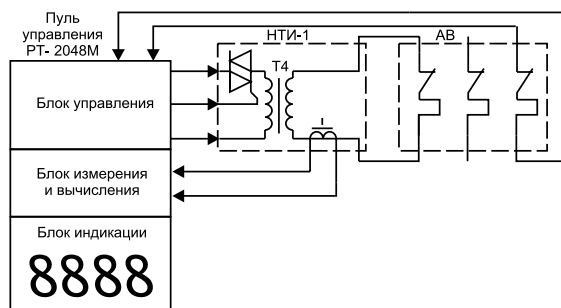


Рис. 3.28. Функциональная схема комплекта: АВ — испытуемый автоматический выключатель; Т1 — нагрузочный трансформатор; Т2 — измерительный трансформатор тока

Основные технические характеристики:

Максимальный испытательный ток (действующее значение) в импульсном режиме (ПВ = 2%), А .....	1000
Ток, потребляемый из сети при максимальном испытательном токе, А.....	23
Максимальный испытательный ток в длительном режиме (1мин), А.....	500
Диапазон регулирования и измерения силы тока, А.....	10—1000
Приведенная погрешность измерения тока, не более, % .....	5

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

Масса силового блока, не более, кг .....7

Стоимость устройства — около 30 тыс. руб.

Когда производится испытание трехфазного автомата пропусканьем тока через один из его полюсов, останова схемы может производиться одним из его свободных силовых контактов, как на рис. 3.27. При испытании однофазных АВ и отсутствии у него вспомогательных контактов гнезда секундомера соединяют накоротко. При этом, однако, измеряется не время до момента разрыва контактов выключателя, а время спада тока к нулю, и, кроме того, измеренное значение времени в памяти измерителя не остается.

Перед выполнением испытаний устройство необходимо заземлить.

Набор тока рекомендуется начинать при питающем напряжении 220 В, а если необходимого значения тока достичь не удастся, перейти на напряжение 380 В. Нарастание испытательного тока обеспечивается ступенями, причем скорость его зависит от напряжения, которое, в свою очередь, определяется выбором напряжения питания (220 или 380 В) и схемы подключения автомата к вторичной обмотке нагрузочного трансформатора (на всю обмотку или на ее половину). Независимо от требуемого конечного значения тока набор его следует начинать на пределе измерения 100 А ввиду нелинейности начальной части шкалы.

В связи с несинусоидальной формой тока проверку правильности измерения его действующего значения необходимо проводить только амперметром соответствующей системы.

Начальное действующее значение тока должно быть не более 10 А. Набор тока осуществляется до срабатывания электромагнитного расцепителя или до достижения уставки срабатывания теплового элемента. По достижении током значения 200 А начинает мигать индикатор, и тогда переключатель пределов измерения следует установить на 1000 А.

При наборе тока возможно незначительное падение тока каждой ступени вместо его возрастания, что обусловлено нестабильностью питающего напряжения и сопротивления переходных контактов.

Подключение комплекта к питающей сети должно производиться через автоматический выключатель с номинальным током расцепителя 25...40 А. Во время работы необходимо следить за тем, чтобы не превысить допустимую длительность протекания

### 3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ)

тока во избежание пробоя тиристорov и перегрева трансформаторов. Запрещается работа трансформатора в длительном режиме при разомкнутой вторичной обмотке и напряжении питания 380 В, за исключением проверки электромагнитного расцепителя в продолжение не более 1,6 с.

Аналогичный по устройству комплект с более мощным нагрузочным трансформатором НТИ-12, индуктивным датчиком тока ДИ и пультом управления ПУ (рис. 3.29,а) обеспечивает в кратковременном режиме максимальный ток до 12 кА, в длительном — до 7 кА (1,5 мин). Масса силового блока — не более 28 кг.

Этот комплект подключают к сети через вводной автомат на 100 А с расцепителем в зоне КЗ на ток 700 А. Набор тока рекомендуется начинать при питающем напряжении 220 В, на пределе 2 кА. Если необходимого значения тока достичь не удастся, следует перейти на напряжение 380 В. По достижении током значения 2 кА переключатель пределов переводят в положение 20 кА.

Ток, потребляемый от сети при максимальном значении испытательного тока, достигает 300 А.

**Комплекты типа СИНУС** представляют собой серию испытательных средств более высокого уровня. Силовая часть комплекта выполнена на IGBT-транзисторах, что позволило упростить схему управления вентилями, осуществить регулирование испытательного тока по принципу широтно-импульсной модуляции и обеспечить практически синусоидальную форму тока. Управление схемой регулирования производится программными средствами с помощью микроконтроллера фирмы МИКРОЧИП. Цифровая индикация значения испытательного тока и времени срабатывания выключателя отображается на жидкокристаллическом дисплее. Выпускаются четыре модификации комплекта, в зависимости от максимального значения испытательного тока: 200, 1600, 3600 и 7000 А. Конструктивно комплекты выполнены в корпусе системного блока РС (рис. 3.29,б).

Основные технические характеристики комплекта СИНУС-200  
Диапазон регулирования тока, А.....2—200

Длительность протекания тока

в кратковременном режиме, с....0,02—2,54

Максимальный ток, потребляемый из сети, А.....0

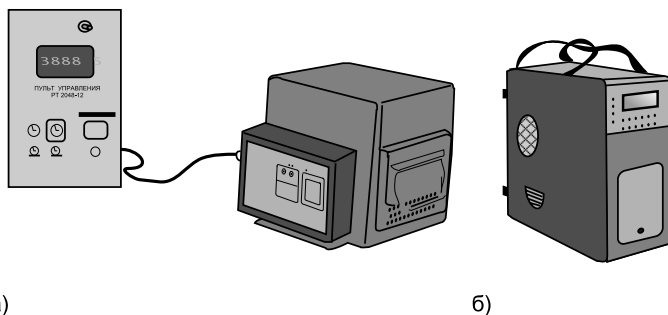
Погрешность измерения, %, не более.....3

Масса комплекта, кг.....18

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

Основные технические характеристики комплекта СИНУС-7000	
Диапазон регулирования тока, А.....	100—7000
Максимальный ток, потребляемый из сети, А.....	160
Масса комплекта, кг.....	36



а) б)  
*Рис. 3.29. Внешний вид нагрузочных комплектов фирмы «ИнтерМикс»: а — с регулятором РТ-2048-12; б — СИНУС-200*

## 3.2. Измерение сопротивления заземления

### 3.2.1. Основные понятия

#### 3.2.1.1. Основные определения

Требования к заземлению, основные понятия и терминология, приводимые ниже, содержатся в Правилах устройства электроустановок, электроустановок потребителей 7-го изд. Конкретные примеры рассматриваются применительно к низковольтным (до 1 кВ) трехфазным системам с глухозаземленной нейтралью.

*Заземление* — это преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством. *Защитное заземление* выполняется в целях электробезопасности, *рабочее (функциональное)* — для обеспечения работы электроустановки (не в целях электробезопасности).

*Защитное зануление* — преднамеренное соединение открытых проводящих частей (металлических корпусов) электрооборудования с глухозаземленной нейтралью, выполняемое в целях электробезопасности. При однофазном замыкании на корпус (на «землю») образуется цепь («петля» фаза-нуль) тока однофазного КЗ, значение которого должно быть достаточно велико для срабатывания максимальной токовой защиты и автоматического отключения аварийной электроустановки за время, не превышающее норм ПУЭ.

*Заземляющее устройство* представляет собой совокупность заземлителя и заземляющих проводников. *Заземлители* — проводящие части, находящиеся в электрическом контакте с землей. В качестве *естественных* заземлителей могут служить металлические части различного назначения, находящиеся в земле. *Искусственные* заземлители выполняются в виде металлических электродов (труб, уголков, полос), располагаемых в земле. *Заземляющие проводники* соединяют заземляемую часть (точку) с заземлителем. Для целей электробезопасности предназначены *защитные проводники* («РЕ» — от англ. protective earth): заземляющий проводник, нулевой защитный проводник, защитный проводник системы уравнивания потенциалов. Частью заземляющего устройства является также *главная заземляющая шина* (ГЗШ), предназначенная для присоединения нескольких проводников с целью заземления и уравнивания потенциалов.

*Уравнивание потенциалов* — это электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов и исключения тем самым опасности электропоражения при одновременном прикосновении к двум проводящим частям, оказавшимся под напряжением. *Выравнивание потенциалов* — снижение разности потенциалов на поверхности земли или пола с помощью защитных проводников или специальных покрытий.

#### 3.2.1.2. Назначение

Характеристики заземляющего устройства должны обеспечивать безопасность людей и животных при авариях, с одной стороны, и эксплуатационные функции электроустановки, с другой стороны. К последним относятся, в частности: действие релейных защит; отвод в грунт токов молнии; защита изоляции низковольтных цепей; снижение электромагнитных помех; обеспечение взрыво- и пожаробезопасности и др.

Для территориально сближенных электроустановок разных назначений и напряжений применяют, как правило, одно общее заземляющее устройство, которое в первую очередь должно удовлетворять требованиям к защитному заземлению (1.7.55).

Как источники питания, так и электроприемники содержат *проводящие части*, которые проводят или могут проводить электрический ток, и электроизоляцию, которая ток не проводит (не считая тока утечки). *Токоведущие* проводящие части в процессе эксплуатации электроустановки находятся под рабочим напряжением (например, жилы кабелей, шины, обмотки электрических машин, выводы и др.). Они не должны быть доступны для случайного прикосновения. Применение электроизоляции является одной из основных защитных мер для предотвращения *прямого* (непосредственного) прикосновения к ним. Доступны прикосновению *открытые проводящие части* (ОПЧ), которые нормально под напряжением не находятся, но при повреждении изоляции могут оказаться под напряжением (например, корпуса электродвигателей, кожуха электронагревательных приборов и т. п.). Защитой при таком *косвенном* прикосновении к токоведущим частям и служит защитное заземление. Различают еще *сторонние проводящие части* (СПЧ), не являющиеся частью электроустановки (например, металлоконструкции зданий и сооружений, трубы водо- и газоснабжения и др.).

Заземление осуществляется путем соединения ОПЧ либо непосредственно с заземлителем, либо с заземленной нейтралью ис-

точника питания. Глухозаземленная нейтраль трансформатора присоединена непосредственно к заземляющему устройству.

#### 3.2.1.3. Системы заземления

В зависимости от заземления токоведущей части источника питания и ОПЧ потребителя установлено пять типов заземления систем электроснабжения и их буквенных обозначений. Первая буква — состояние нейтрали источника питания относительно земли:

**T** (terra) — одна точка токоведущих частей источника питания, обычно нейтраль, заземлена;

**I** (isolate) — все токоведущие части источника питания изолированы от земли или одна их точка (нейтраль трансформатора) связана с землей через большое сопротивление (приборов сигнализации, измерения, защиты и т. п.), разрядник или воздушный промежуток.

Вторая буква — состояние ОПЧ электроустановки относительно земли:

**T** — непосредственная связь ОПЧ с землей, независимо от отношения к земле какой-либо точки питающей сети;

**N** — непосредственная связь ОПЧ с глухозаземленной нейтралью источника питания.

Последующие (после N) буквы — совмещение в одном проводнике или разделение функций нулевого рабочего и нулевого защитного проводников:

**S** — нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники разделены на всем протяжении системы (от заземленной нейтрали до ОПЧ);

**C** — функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном (PEN) проводнике на всем протяжении системы;

**C-S** — в головной части системы (от источника питания до потребителя) используется PEN-проводник, а у потребителя (в части здания, цеха) — раздельно два проводника (PE и N).

В системе **TN-C** нейтраль источника питания (трансформатора) глухо заземлена, а все ОПЧ связаны с ней посредством PEN-проводника (рис. 3.30). Эта система получила широкое распространение. Недостаток ее состоит в том, что по объединенному проводнику протекает рабочий ток, который может привести к ухудше-



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

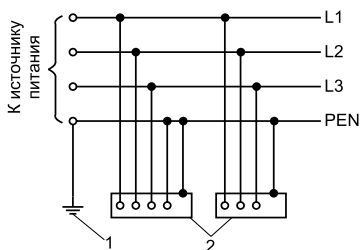


Рис. 3.30. Система TN-C: 1 — заземлитель нейтрали источника питания; 2 — открытые проводящие части

нию качества контактных соединений и даже к потере контакта, а, следовательно, и функции защиты.

Система TN-S, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении (рис. 3.31), обеспечивает более высокий уровень электробезопасности благодаря тому, что в отдельном нулевом защитном проводнике в нормальном режиме протекает небольшой ток. Однако используется эта система редко, так как требует одним проводником больше.

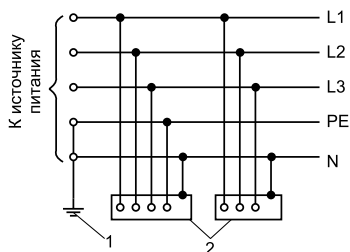


Рис. 3.31. Система TN-S: обозначения те же, что на рис. 3.30

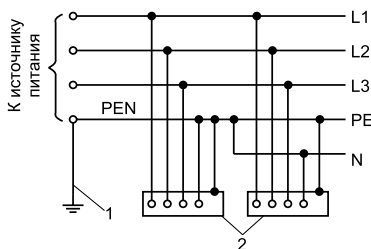


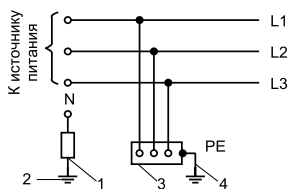
Рис. 3.32. Система TN-C-S: обозначения те же, что на рис. 3.30

В системе **TN-C-S** (рис. 3.32) нулевые защитный и рабочий проводники совмещены в головной и распределительной части системы, а в какой-либо точке электроустановки потребителя (в цехе предприятия, жилом доме и др.) PEN-проводник разделяется на два. Такой точкой может быть вводной зажим здания, нулевая защитная шина ВРУ или вводной зажим РЕ распределительного щитка, питаемого от ВРУ. В результате эта система позволяет сократить затраты на сооружение линии, обеспечивая вместе с тем достаточный уровень электробезопасности у потребителя.

Система **IT**: нейтраль источника питания изолирована от земли или связана с ней через большое сопротивление, а открытые проводящие части заземлены посредством собственного заземляющего устройства, независимого от заземлителя источника питания (рис. 3.33). Такой тип заземления применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить повышенный уровень безопасности, например для наружных электроустановок, питающихся от сети метрополитена.

Система **TT** отличается от IT тем, что нейтраль источника питания глухо заземлена (рис. 3.34). Преимущество системы состоит в том, что электрический потенциал на металлических ОПЧ и СПЧ в нормальном режиме электроустановки всегда равен потенциалу земли.

Электроустановки напряжением до 1 кВ жилых, общественных и промышленных зданий и наружных электроустановок должны, как правило, получать питание от источника с глухозаземленной нейтралью с применением системы TN (1.7.57). Система IT применяется, как правило, при недопустимости перерыва питания при первом замыкании на землю (1.7.58). Применение системы TT допускается только в тех случаях, когда условия безопасности в системе TN не могут быть обеспечены (1.7.59).



*Рис. 3.33. Система IT: 1 — сопротивление заземления источника питания (если имеется); 2 — заземлитель; 3 — открытые проводящие части; 4 — заземляющее устройство электроустановки*

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

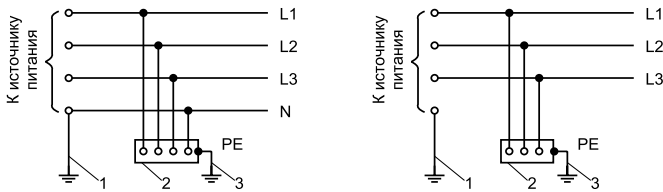


Рис. 3.34. Система ТТ: 1 — заземлитель источника питания; 2 — открытые проводящие части (ОПЧ) электроустановки; 3 — заземлитель ОПЧ

## 3.2.2. Конструктивное выполнение заземляющих устройств

### 3.2.2.1. Обозначения

Защитные РЕ-проводники могут быть проложены без изоляции. Нулевые рабочие (N) и совмещенные (PEN) проводники прокладываются с изоляцией (4.1.17). Внутри шкафа НКУ эти проводники либо выбираются с той же изоляцией, что и фазные, либо монтируются на изоляторах.

Для визуального отличия отдельных изолированных и неизолированных проводников защитного заземления используются цвета и цифры. Нулевые защитные проводники, в т.ч. шины, должны иметь буквенное обозначение РЕ и цветовое обозначение чередующимися продольными и поперечными полосами желтого и зеленого цветов. В отдельных случаях такое обозначение выполняется лишь на отдельных участках проводника, тогда как остальные обозначаются другим (черным) цветом. Нулевые рабочие проводники обозначаются буквой N и голубым цветом, совмещенные — буквами PEN, голубым цветом по всей длине и желто-зелеными полосами на концах (1.1.29). Цветовое обозначение рабочего (функционального) заземления не нормируется. Располагаются шины заземления после фазных шин в порядке N-РЕ (PEN), при горизонтальном их размещении — справа, при вертикальном — снизу. При таком расположении нулевая шина, имеющая много ответвлений, более доступна для обслуживания и создает меньшую опасность при падении, чем фазные.

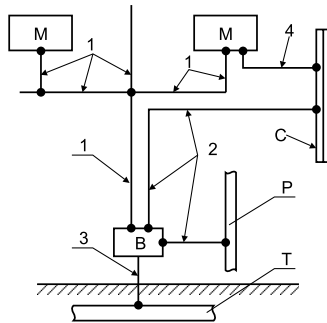
### 3.2.2.2. Расположение и соединение элементов

Нейтраль трансформатора должна быть присоединена к заземлителю с помощью заземляющего проводника. Искусственный за-

землитель нейтрали должен быть расположен, как правило, вблизи трансформатора, для внутрицеховых подстанций допускается располагать его около стены здания. Если фундамент этого здания используется в качестве естественного заземлителя, нейтраль должна быть присоединена не менее чем к двум металлическим колоннам или к арматуре не менее двух железобетонных фундаментов. Во всех случаях должны быть обеспечены непрерывность цепи заземления и защита заземляющих проводников от механических повреждений.

Использование нулевого рабочего проводника, идущего от нейтрали на щит распределительного устройства, в качестве заземляющего проводника не допускается. Вывод этого проводника от нейтрали на щит РУ выполняется шиной на изоляторе или жилой кабеля (провода).

Если в PEN-проводнике установлен трансформатор тока, то заземляющий проводник должен быть присоединен не к нейтрали трансформатора непосредственно, а к PEN-проводнику за трансформатором тока, как можно ближе к выводу нейтрали. Также за трансформатором тока должно быть выполнено разделение PEN-проводника на PE- и N-проводники в системе TN-S (1.7.100).



*Рис. 3.35. Заземляющие и защитные проводники в здании:*

- 1 — защитный проводник; 2 — главный проводник системы уравнивания потенциалов; 3 — заземляющий проводник;*
- 4 — дополнительный проводник системы уравнивания потенциалов;*
- В — главная заземляющая шина; М — заземляемая часть оборудования (ОПЧ); С — металлоконструкция здания (СПЧ);*
- Р — металлический стоек (труба) водопровода; Т — заземлитель*

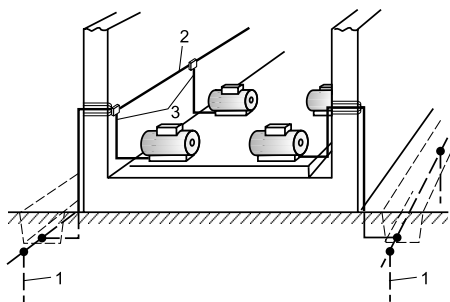


Рис. 3.36. Присоединение ОПЧ (корпусов электродвигателей) к магистрали заземления

На рис. 3.35 в качестве примера показана схема соединения и присоединения заземляющих и защитных проводников внутри здания.

Присоединение каждой ОПЧ электроустановки к защитному заземляющему проводнику должно быть выполнено с помощью отдельного ответвления. В производственных помещениях защитный заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями образует магистраль заземления (рис. 3.36).

### 3.2.3. Сопротивление растеканию

#### 3.2.3.1. Общие понятия

Если на электрод, погруженный в землю, подать напряжение относительно земли, то через него пойдет ток, который будет растекаться по всем направлениям — в стороны от электрода и в глубину земли. По мере удаления от заземлителя сечение массива земли, через которое проходит ток, увеличивается, а плотность тока и электрический потенциал соответственно уменьшаются, достигая нулевого значения на расстоянии около 20 м и более. Часть земли, электрический потенциал которой принимается равным нулю, называется *зоной нулевого потенциала*. *Сопротивление растеканию* — это сопротивление, которое оказывает току земля. Сопротивление растеканию заземлителя численно равно отношению напряжения на нем относительно земли (т. е. точки нулевого потенциала) к току, стекающему с заземлителя в землю:  $R_3 = U_3/I_3$ . Термин «сопротивление растеканию заземлителя» часто заменяют сокращенным «сопротивление заземлителя». Его не надо смешивать с сопротивлением заземлителя как проводника —

в отличие от последнего, сопротивление растеканию не зависит от материала заземлителя, а определяется только его конфигурацией и удельным сопротивлением грунта. Аналогично, *сопротивление заземляющего устройства* — это отношение напряжения на нем (напряжения между заземляющей шиной и землей) к току, стекающему с заземлителя в землю.

В общем случае, чем меньше сопротивление заземляющего устройства, тем лучше оно выполняет свои защитные и эксплуатационные функции. Однако снижение сопротивления заземлителя удорожает его сооружение, а в некоторых случаях затруднено по характеристикам грунта. Для осуществления защитных функций заземлитель и заземляющее устройство в целом должны иметь сопротивление, не превышающее определенных нормированных значений.

#### 3.2.3.2. Нормирование

Сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль трансформатора с линейным напряжением 380 В, в любое время года должно быть не более 4 Ом. Это значение должно быть обеспечено с учетом использования естественных заземлителей, а также повторных заземлений PEN- или PE-проводника ВЛ до 1 кВ при количестве отходящих линий не менее двух. Сопротивление отдельного заземлителя, расположенного в непосредственной близости от трансформатора, не должно превышать 30 Ом. При удельном сопротивлении земли  $\rho > 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  допускается увеличивать эти нормы в  $0,01\rho$  раз, но не более чем в десять (1.7.101).

На вводе в электроустановку выполняется повторное заземление PE- и PEN-проводников. Для этой цели прежде всего используются естественные заземлители. Заземлитель повторного заземления должен быть присоединен к главной заземляющей шине (ГЗШ). Сопротивление его ПУЭ не нормируется (1.7.61).

Заземляющие устройства на опорах ВЛ предназначены для повторного заземления, защиты от грозových перенапряжений, заземления электрооборудования, установленного на опорах. Сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 30 Ом (2.4.38). Металлические элементы опор, подлежащее заземлению, присоединяются к PEN-проводнику. Соединения заземляющих проводников между собой и с другими элементами должны быть

выполнены сваркой или болтовыми соединениями. Оттяжки опор ВЛ должны быть присоединены к заземляющему проводнику.

На концах ВЛ (или ответвлений от них длиной более 200 м), а также на вводах ВЛ к электроустановкам, снабженным УЗО, должны быть выполнены повторные заземления PEN-проводника (1.7.102). Минимальные размеры проводников для этих заземлений приведены в табл. 3.12 (1.7.103).

Общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений PEN-проводника каждой ВЛ должно быть не более 10 Ом, а заземлителя каждого из повторных заземлений — не более 30 Ом. При удельном сопротивлении земли  $\rho > 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  допускается увеличивать указанные нормы в  $0,01\rho$  раз, но не более чем в 10 раз. (1.7.103).

При определении удельного сопротивления земли следует принимать его сезонное значение, соответствующее наиболее неблагоприятным условиям (1.7.56). Согласно ПТЭЭП, п. 2.7.13 измерение должно выполняться в период наибольшего высыхания (промерзания) грунта. Но в связи с тем, что фактически измерения производятся в любую погоду, документ РД 153-34.0-20.525-00 (РАО «ЕЭС России») рекомендует использовать сезонные коэффициенты (табл. 3.13.). Сезонные коэффициенты применяются и в тех случаях, когда они указаны в проекте, а также по требованию владельца электроустановки или надзорного органа.

Для уменьшения сопротивления растеканию искусственных заземлителей в районах с большим удельным сопротивлением земли рекомендуются следующие мероприятия:

- устройство углубленных заземлителей;
- устройство выносных (до 2 км) заземлителей;
- искусственная обработка грунта (1.7.106).

Способы искусственного увеличения проводимости грунта: насыщение грунта легко растворимыми в воде солями; замена части грунта материалами с пониженным удельным сопротивлением; введение в грунт слаборастворимых в воде соединений. Соль (поваренная соль, медный купорос, сода) понижает температуру застывания почвенного раствора и удельное сопротивление грунта при низких температурах. Недостатки этого способа — усиленная коррозия электродов и необходимость повторных обработок грунта через 1—2 года, так как за это время соль растворяется и уносится почвенными водами.

### 3.2. Измерение сопротивления заземления

При замене части грунта электрод окружается достаточно мощным слоем вещества повышенной проводимости, как правило, с использованием суспензии из глины или природного глиноподобного вещества — бентонита. В этом случае частая повторная обработка не требуется, но приходится производить большой объем земляных работ. К слаборастворимым веществам с низким удельным сопротивлением относится, например, гипс; применяются также различные проводящие синтетические полимеры и гели. Общим недостатком этих веществ является их дороговизна, а у некоторых — повышенная коррозионная активность или токсичность.

Магистралы заземления или зануления и ответвления от них в закрытых помещениях и в наружных установках должны быть доступны для осмотра. Это требование не распространяется на нулевые жилы и оболочки кабелей, на арматуру железобетонных конструкций, а также на проводники, проложенные в трубах, коробах и внутри строительных конструкций.

Таблица 3.12

*Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводов, проложенных в земле*

Материал	Профиль сечения	Диаметр, мм	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Толщина стенки, мм
Сталь черная	Круглый: для вертикальных заземлителей	16	—	—
	для горизонтальных заземлителей	10	—	—
	Прямоугольный	—	100	4
	Угловой	—	100	4
	Трубный	32	—	3,5
Сталь оцинкованная	Круглый: для вертикальных заземлителей	12	—	—
	для горизонтальных заземлителей	10	—	—
	Прямоугольный	—	75	3
	Трубный	25	—	2
Медь	Круглый	12	—	—
	Прямоугольный	—	50	2
	Трубный	20	—	2
	Канат многопроволочный (каждая проволока)	1,8	35	—



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

В 2006 году Ассоциация «Росэлектромонтаж» выпустила технический циркуляр № 11/2006, расширяющий и уточняющий содержание табл. 3.12 в соответствии с международным стандартом МЭК 60364-5-54. Здесь же указывается, что при использовании заземляющего устройства для электроустановки выше 1 кВ с изолированной нейтралью и одновременно для установки до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью сечение заземляющего проводника, соединяющего СПЧ с заземлителем, следует принимать с учетом тока замыкания в электроустановке выше 1 кВ.

Таблица 3.13

Сезонные коэффициенты удельного сопротивления грунта

Тип грунта	Влажность		
	нормативная	ниже нормы	выше нормы
Глина	3	2	10
Супесь, суглинок	5	3	20
Песок	10	3	50

#### 3.2.4. Заземлители

##### 3.2.4.1. Удельное сопротивление грунта

Сопротивление растеканию тока с заземлителя в грунт зависит, с одной стороны, от его геометрических размеров и расположения в земле, с другой — от свойств грунта, которые численно характеризуются его *удельным сопротивлением*. За эту величину принимается сопротивление между противоположными сторонами куба земли единичного объема, точнее — куба, длина ребра и площадь стороны которого имеют единичные значения.

Как известно из электротехники, сопротивление проводника длиной  $l$  м с удельным сопротивлением  $\rho$  и площадью поперечного сечения  $S$  равно  $R = \rho l/S$ , откуда  $\rho = RS/l$ , а единицей удельного сопротивления в системе СИ будет  $\text{Ом}\cdot\text{м}^2/\text{м} = \text{Ом}\cdot\text{м}$ . Иногда встречается размерность  $\text{Ом}\cdot\text{см}$ , что соответствует кубу с ребрами длиной 1 см, причем  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = \text{Ом}\cdot 100 \text{ см} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . В отличие от земли, удельное сопротивление проводниковых материалов, металлов в системе СИ выражается очень малыми числами, и поэтому предпочитают иногда, измеряя сечение проводника в квадратных миллиметрах, использовать более удобную единицу  $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , причем  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Если, например, сравнить удельное сопротивление земли и стали, приняв соответствующие значения равными  $20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $0,2 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , то оказывается, что удельное сопротивление земли в 100 млн. раз больше. Этим объясняется, что при расчетах сопротивления растеканию учитывают только сопротивление земли, пренебрегая сопротивлением заземлителя как проводника. Так, например, активное сопротивление стального стержня диаметром 16 мм и длиной 3 м составляет около  $0,003 \text{ Ом}$ , а сопротивление растеканию для этого стержня в земле может быть порядка  $10 \text{ Ом}$ . Таким образом, сопротивление растеканию заземлителя является основной составляющей сопротивления всего заземляющего устройства, поскольку сопротивление остальных его элементов как проводников из цветного металла сравнительно невелико.

Определение реального значения удельного сопротивления грунта затрудняется неоднородным строением земли, наличием в ней проводящих или непроводящих примесей, зависимостью от температуры и влажности, времени года и пр. Удельное сопротивление примесей может различаться в самых широких пределах — от значений порядка  $10^{-7}$  (металлы),  $10^{-5}$  (графит),  $10^{-2}$  (уголь) до  $10^3$  (песчаник),  $10^5$  (каменная соль) и  $10^9$ – $10^{16}$   $\text{Ом}\cdot\text{м}$  (нефть), а присутствие тех или иных примесей в грунте существенно влияют на его удельное сопротивление. Так, добавление в сухой песок всего 3% нефти увеличивает его удельное сопротивление втрое, а 10% — в несколько тысяч раз. Удельное сопротивление воды может быть от нескольких сотых (морская) до тысяч  $\text{Ом}\cdot\text{м}$  (дождевая). Влияние температуры тоже очень заметно: так, например, удельное сопротивление песчаника при температуре  $-12^\circ\text{C}$  составляет 184, а при  $20^\circ\text{C}$  только 80  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ . Воздействием тех или иных факторов объясняется широкий разброс значений удельного сопротивления грунта в конкретных условиях испытаний (табл. 3.14).

Таблица 3.14

*Ориентировочные значения удельного электрического сопротивления земли и воды при температуре выше  $0^\circ\text{C}$*

Род земли и воды	Сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}$
Песок	
сухой	1500–4000
влажный	130–400

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

Род земли и воды	Сопротивление, Ом • м
Суглинок	40–150
Глина	8–70
Садовая земля	40
Торф	20
Щебень	3000–5000
Гранит	22000
Морская вода	0,2
Речная вода	10–80

Различают *стационарное* сопротивление заземлителя, отводящего в землю ток частотой 50 Гц, и *импульсное* сопротивление, характерное для заземлителей грозозащиты. Последнее определяется как импульсным характером тока, так и физико-химическими процессами и искрообразованием в грунте при ударе молнии. Импульсный характер тока молнии отличают его высокая амплитуда (до 200 кА, в среднем 25 кА) и большая скорость изменения во времени (10–40 кА/мкс), в связи чем проявляется индуктивность, а в плохо проводящих грунтах и емкость заземлителя. При некотором значении напряженности поля в грунте начинают происходить сложные физико-химические процессы, вплоть до пробоя грунта, в результате которых его удельное сопротивление уменьшается. В зависимости от преобладания искровых процессов и емкости или индуктивности импульсное сопротивление может быть как больше, так и меньше стационарного, и прямой, непосредственной связи между ними не существует. Поэтому импульсное сопротивление ПУЭ не нормируется и в наладочной практике не измеряется, а пригодность заземлителей как молниеотводов оценивается по соответствию их типовым решениям, приведенным в инструкциях по устройству молниезащиты (РД 34.27.122-87, СО 153-3421-122-2003). В геодезической практике импульсное сопротивление измеряется специальными приборами.

#### 3.2.4.2. Естественные заземлители

Это — находящиеся в непосредственном контакте с землей металлические части, которые могут быть использованы и для целей заземления. В качестве естественных заземлителей используются:

- металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений;

- металлические трубы водопровода;
- обсадные трубы буровых скважин;
- металлические части гидротехнических сооружений;
- рельсовые пути неэлектрифицированных железных дорог;
- другие находящиеся в земле металлические конструкции и сооружения;
- металлические (кроме алюминиевых) оболочки бронированных кабелей при количестве их не менее двух (1.7.109).

Не допускается использовать в качестве заземлителей трубопроводы горючих или взрывоопасных материалов, центрального отопления и канализации, что не исключает необходимости присоединения их к заземляющему устройству с целью уравнивания потенциалов (1.7.110).

Протяженные естественные заземлители (водопроводные трубы, металлические оболочки кабелей и т. п.) имеют малое сопротивление растеканию и в ряде случаев позволяют выполнить требования ПУЭ, не прибегая к сооружению искусственных заземлителей.

Хорошими естественными заземлителями могут служить металлические и железобетонные *конструкции зданий и сооружений*. Так, сопротивление растеканию железобетонного фундамента производственного здания, рассчитанное по формуле

$$R = 0,5 \rho / \sqrt{S},$$

где  $S$  — площадь здания, например, при  $S = 20 \times 30$  м и  $\rho = 50$  Ом•м, будет  $R = 1,1$  Ом. У железобетонных сооружений, находящихся в воде, сопротивление растеканию наиболее низкое.

*Металлические трубы* в земле имеют, как правило, малое сопротивление, даже если они покрыты изоляцией. Для сохранения электрической цепи при ремонтах трубопроводов, на водомерах и задвижках должны быть установлены металлические перемычки. Присоединять заземляющие проводники к линии водопровода надо за водомером (в направлении от потребителя). При использовании протяженных заземлителей приходится считаться с падением напряжения на них, из-за чего потенциал протяженного заземлителя и ток, стекающий с него в землю, снижаются по его длине. По этой причине водопроводные трубы могут быть эффективно использованы в качестве заземлителей на расстоянии не бо-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

лее 1,5—2 км. Далее потенциал заземлителя приближается к потенциалу земли и стекание тока в землю прекращается.

То же относится и к использованию металлических оболочек кабелей. Свинцовые оболочки их могут иметь достаточно низкое сопротивление растеканию. Конкретные значения его зависят от числа кабелей, их длины, состояния покровов и удельного сопротивления грунта. Средние значения сопротивления растеканию (Ом) металлических труб и свинцовых оболочек кабелей в грунте с удельным сопротивлением  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  приведены в табл. 3.15а и табл. 3.15б.

Таблица 3.15а

*Сопротивление растеканию металлических трубопроводов на глубине 2 м*

Длина подземного участка трубы, м	Диаметр трубы, мм		
	75	100	150
100	0,35	0,28	0,13
1000	0,25	0,20	0,17
2000	0,20	0,17	0,15

Таблица 3.15б

*Сопротивление растеканию свинцовых оболочек кабелей на глубине 0,7 м*

Длина подземного участка кабеля, м	Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>		
	16...35	50...95	120 и выше
100	2	1,5	1,1
200	1,8	1,4	1,0
500	1,4	1,1	0,8
1000	1,2	0,9	0,7

Большой эффект может дать использование *обсадных труб* (артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. п.), сопротивление растеканию которых не превышает обычно нескольких Ом.

Заземляющие свойства рельсовой сети определяются переходным сопротивлением рельсы — шпалы — балласт — земляное полотно — земля. Наиболее характерный диапазон значений переходного сопротивления на длине 1 км составляет в летних услови-

ях 0,4—2,5, в зимних 1,5—17,5 Ом•км. Как правило, 90% этого значения приходится на долю шпал и балласта.

### 3.2.4.3. Искусственные заземлители

Это — заземлители, специально выполняемые для целей заземления, обычно — в виде стержней, уголков, полос, труб. Искусственные заземлители не должны иметь окраски, а их материал и размеры должны соответствовать табл. 3.12. В качестве материала заземлителей преимущественно применяется черновая сталь, а также оцинкованная сталь и медь. Однако медь значительно дороже стали и, кроме того, образует с другими металлами гальванические пары, вызывая их коррозию. Стальные стержни дешевле угловой стали и тем более труб.

Заземлитель может представлять собой один проводник-электрод или группу (два и более) таких проводников, соединенных между собой. В первом случае он называется *простым*, во втором — *сложным*, а если электроды образуют замкнутый контур, то такой заземлитель называют *заземляющим контуром* (рис. 3.37).

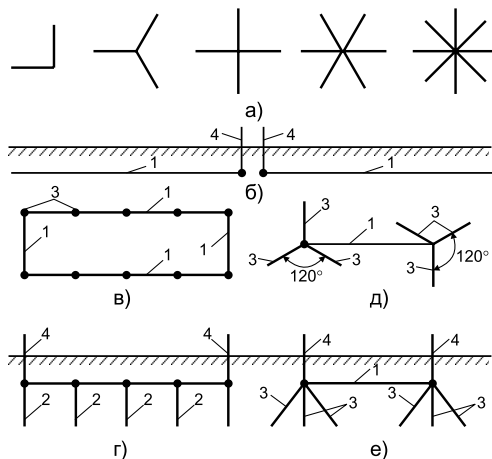


Рис. 3.37. Расположение искусственных заземлителей: а — сложные горизонтальные заземлители; б — одиночные горизонтальные заземлители с выводами; в, г — сложный заземлитель (контур) в плане и в разрезе; д, е — сложный наклонный заземлитель в плане и в разрезе; 1, 2, 3 — горизонтальный, вертикальный и наклонный электроды; 4 — вывод от заземлителя

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

Увеличение диаметра электрода не дает существенного уменьшения сопротивления растеканию, гораздо более эффективно увеличение длины. Наиболее употребительны *вертикальные заземлители*, в частности стержни длиной 2,5—5 м и более. Чтобы уменьшить влияние температуры на сопротивление растеканию, электроды располагаются ниже уровня земли не менее чем на 0,5—0,8 м. Для ориентировочных расчетов сопротивление растеканию вертикального электрода можно принять равным

$$r_{\text{в}} \approx 0,8 \rho / l,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление земли,  $l$  — длина электрода. Например, при значениях  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  и  $l = 3 \text{ м}$  сопротивление растеканию такого заземлителя будет около  $r_{\text{в}} \approx 0,8 \cdot 100 / 3 \approx 27 \text{ Ом}$ .

*Горизонтальные* электроды из полос или круглой стали применяются как самостоятельные заземлители для грозозащиты, в электроустановках индивидуальных жилых домов и др., так и для связи вертикальных электродов между собой. Сопротивление растеканию горизонтального электрода будет несколько больше, чем вертикального той же длины. Одинаковые сопротивления имеют круглый стальной стержень и полоса шириной вдвое больше диаметра стержня. Зависимость сопротивления электродов от их длины в действительности оказывается несколько меньшей, чем следует из приведенной выше формулы

*Пластины* применяются в качестве заземлителей сравнительно редко, большей частью в сельской местности, так как при одинаковом сопротивлении растеканию масса их оказывается в несколько раз больше, чем у электродов удлиненного профиля. Целесообразно располагать пластины в земле вертикально, чтобы избежать нарушения контакта их с землей при возможной усадке грунта. Сопротивление растеканию такого электрода прямоугольной формы может быть приблизительно подсчитано по выражению

$$r_{\text{пл}} \approx \rho / 4 \sqrt{ab},$$

где  $a$  и  $b$  — длины сторон прямоугольника. Если, например, пластина имеет размеры  $a = b = 1 \text{ м}$ , то при  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  ее сопротивление будет  $r_{\text{пл}} \approx 100 / 4 \cdot 1 = 25 \text{ Ом}$ .

Сопротивление *системы трос—опора* при числе опор больше 15 можно вычислить по упрощенной формуле

$$R_{\text{т-о}} = \sqrt{R_{\text{тр}} R_{\text{оп}}},$$

где  $R_{тр}$  — сопротивление троса в одном пролете,  $R_{оп}$  — сопротивление заземляющего устройства одной опоры. Пусть, например, удельное сопротивление троса составляет 2,5 Ом/км, длина пролета 100 м, сопротивление заземлителя каждой опоры 10 Ом; тогда сопротивление трос—опора будет  $R_{т-о} = \sqrt{0,1 \cdot 2,5 \cdot 10} = 1,6$  Ом.

Сопротивление системы *нулевой провод — повторные заземления* можно рассчитать по аналогичной формуле, только заменив сопротивление троса в пролете сопротивлением участка нулевого провода между повторными заземлителями, а сопротивление опоры — сопротивлением повторного заземлителя.

Приведенные выше формулы для расчета сопротивления одиночных заземлителей предполагают отсутствие вблизи других электродов. Проводимость сложного заземлителя будет меньше, чем сумма проводимостей составляющих его электродов, из-за их взаимного влияния, или экранирования. Физически эффект экранирования заключается в том, что электрические поля близко расположенных электродов накладываются друг на друга, в результате чего напряженность поля вблизи электрода уменьшается, а его сопротивление растеканию возрастает. Это влияние численно характеризуется так наз. *коэффициентом использования*, на который при расчете следует поделить сопротивление одиночного заземлителя.

Пусть, например, требуется рассчитать сопротивление растеканию контура из 10 вертикальных стержней, сопротивление растеканию каждого из которых равно 27 Ом, и 10 соединительных полос сопротивлением 35 Ом каждая; по справочным данным, коэффициент использования вертикальных заземлителей в этом случае  $\eta_{в} = 0,69$ , горизонтальных —  $\eta_{г} = 0,40$ . Тогда сопротивление вертикальных заземлителей составит  $R_{в} = 27/10 \cdot 0,69 = 3,9$  Ом, горизонтальных  $R_{г} = 35/10 \cdot 0,40 = 8,8$  Ом, а общее сопротивление растеканию контура заземления

$$R_{к} = \frac{R_{в} R_{г}}{R_{в} + R_{г}} = \frac{3,9 \cdot 8,8}{3,9 + 8,8} = 2,7 \text{ Ом.}$$

Приведенные выше упрощенные выражения для расчета сопротивления растеканию заземлителей различного вида могут оказаться полезными при оценочном определении параметров заземляющих устройств, когда результаты их измерения вызывают сомнения или не удовлетворяют нормам, в связи с чем принятые ранее решения требуют доработки.



### 3.2.5. Защитные функции заземления и зануления

#### 3.2.5.1. Заземление

Заземление выполняет защитную функцию, поскольку при замыкании на корпус потенциал поврежденной фазы относительно земли снижается до значения  $U_{\phi}$ , равного падению напряжения на заземлителе. Вместе с тем появление напряжения на заземлителе и соединенных с ним металлических частях оборудования, а также на поверхности грунта создает опасность для людей и животных. При этом потенциал поверхности грунта по мере удаления от заземлителя уменьшается и на расстоянии  $l \geq 20$  м от него приближается к нулю (рис. 3.38). Область, в пределах которой электрический потенциал, обусловленный токами замыкания на землю, не равен нулю, называют *зоной растекания тока*. Зону *нулевого потенциала* обыкновенно называют *землей*. Закон изменения потенциала поверхности грунта (или, что то же самое, напряжения относительно точки нулевого потенциала) описывается выражением

$$U_3 = \frac{r}{1 + r},$$

где  $r$  — радиус заземлителя (при упрощенных расчетах принимают, что заземлитель имеют форму полусферы);  $l$  — расстояние от заземлителя до данной точки на поверхности грунта.

Ноги человека, стоящего на поверхности грунта, приобретают потенциал данной точки поверхности. Коснувшись рукой ка-

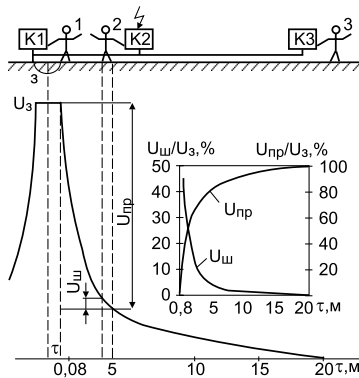


Рис. 3.38. Распределение потенциала на поверхности грунта

кой-либо точки на ОПЧ (или СПЧ), он окажется под действием разности потенциалов между этими двумя точками. Напряжение между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного называется *напряжением прикосновения* ( $U_{\text{пр}}$ ).

Когда человек делает шаг, ноги его приобретают разные потенциалы, в зависимости от расстояния до заземлителя и длины шага. Согласно ПУЭ, длина шага человека принимается равной 1 м, а напряжение между двумя точками на поверхности земли на расстоянии 1 м одна от другой называется *напряжением шага* (1.7.25), или *шаговым напряжением* ( $U_{\text{ш}}$ ).

Как видно из рис. 3.38, вблизи заземлителя потенциал грунта изменяется наиболее резко, и здесь напряжение шага имеет максимальное значение, а напряжение прикосновения — наименьшее (поз.1). При сравнительно небольшом удалении от заземлителя напряжение прикосновения быстро возрастает, а напряжение шага уменьшается (поз. 2). Вне зоны растекания (поз.3) напряжение прикосновения  $U_{\text{пр}} = U_3$  максимально, а напряжение шага равно нулю.

#### 3.2.6. Зануление

Защитное заземление само по себе не может еще обеспечить достаточную степень безопасности. Действительно, в сетях с заземленной нейтралью с уменьшением сопротивления  $R_3$  возрастает и ток  $I_3$ , вследствие чего произведение  $I_3 R_3 = U_3$  уменьшается незначительно. Пусть, например, нейтраль питающего трансформатора заземлена через сопротивление 4 Ом, а электроприемники — через сопротивление 8 Ом. Тогда ток замыкания через суммарное сопротивление  $4 + 8 = 12$  Ом составит  $220/12 = 18,3$  А, а напряжение по отношению к земле  $U_3 = 18,3 \cdot 8 = 146,4$  В, что безусловно опасно. Пусть, далее, сопротивление заземления электроприемника снижено вдвое, тогда ток замыкания будет  $220/8 = 27,5$  А, а напряжение прикосновения  $27,5 \cdot 4 = 110$  В, что тоже опасно. Для уменьшения опасности нужно еще снизить время существования опасного напряжения, т. е. время протекания тока замыкания. С этой целью выполняют металлическое соединение корпусов электрооборудования с заземленной нейтралью трансформатора (*зануление*). При этом создается замкнутая металлическая цепь фаза-нуль, ток в которой не зависит от сопротивле-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

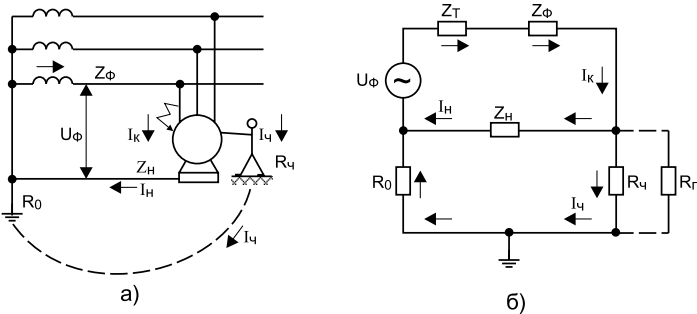


Рис. 3.39. Зануление: а) схема прикосновения; б) эквивалентная схема

ния заземления нейтрали или электроприемника и отключается максимальной защитой.

Но во время существования однофазного КЗ на всех ОПЧ и СПЧ, соединенных с сетью зануления, остается опасное напряжение, и если в это время к ним прикоснется человек, то он окажется под напряжением прикосновения, максимальное значение которого равно падению напряжения в зануляющем проводнике (рис. 3.39).

Как видно из эквивалентной электрической схемы рис. 3.39,б, при отсутствии нулевого провода или его обрыве напряжение прикосновения (падение напряжения на теле человека) может достигать фазного:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{а}} + R_{\text{з}} + R_{\text{ч}}} \approx U_{\text{ф}},$$

где  $R_{\text{ф}}$ ,  $R_{\text{з}}$  и  $R_{\text{ч}}$  — активные сопротивления фазного провода, заземлителя и тела человека, причем  $R_{\text{ф}} + R_{\text{з}} \ll R_{\text{ч}}$ .

При наличии зануления напряжение прикосновения снижается и будет равно примерно падению напряжения на нулевом проводе:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{ф}} + R_{\text{н}}}.$$

Если принять, что сопротивления фазного и нулевого проводов одинаковы, то напряжение прикосновения будет равно половине фазного:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} R_{\text{н}} / 2R_{\text{н}} = U_{\text{ф}} / 2 = 220 / 2 = 110 \text{ В при } U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}.$$

Это напряжение может быть значительно снижено путем устройства *повторных заземлений* нулевого провода: тогда к чело-

веку будет приложено падение напряжения только на участке до ближайшего заземлителя. Сопротивление  $R_{\Pi}$  повторного заземления (на рис. 3.39,б показано пунктиром) оказывается включенным параллельно сопротивлению тела человека  $R_{ч}$ , и если принять  $R_{\Pi} \approx R_0$ , то напряжение прикосновения должно уменьшиться вдвое, т. е. до 55 В. В действительности по ряду причин (в расчете не приняты во внимание сопротивление трансформатора, индуктивное сопротивление проводов, наличие металлоконструкций в земле и др.) эта величина бывает еще меньше. Роль повторного заземления тем более велика, что при его отсутствии обрыв нулевого провода ведет к появлению на металлических частях оборудования полного фазного напряжения. Обрывы происходят наиболее часто на воздушных линиях, на вводе в здания.

На линиях нулевой провод должен быть расположен под фазными проводами. В этом случае обрыв фазного провода с падением его на нулевой вызовет отключение линии. В противном случае падение его на фазный со стороны питания также вызвало бы короткое замыкание и отключение линии. Падение же за местом обрыва при отсутствии повторного заземления привело бы к появлению на корпусах оборудования фазного напряжения, а при наличии повторного заземления — меньшего, но тоже опасного напряжения.

#### 3.2.7. Измерения

##### 3.2.7.1. Измерение удельного сопротивления грунта

Удельное сопротивление грунта  $\rho$  определяется расчетным путем по известному сопротивлению заземлителей. В практике наладочных работ применяются два метода измерений: метод простого пробного (контрольного) одиночного электрода и метод четырех электродов. В качестве электродов применяют обычно вертикальные стальные стержни, трубы, уголки. Чтобы создать плотное соприкосновение с грунтом и избежать ошибки, которую может внести переходное сопротивление электрод — грунт, электроды рекомендуется погружать прямыми ударами или вдавливанием, не раскачивая их. Ввертывание стержней допускается как исключение только в песчаном грунте. Стержни или трубы диаметром не менее 5 мм погружаются в грунт на глубину не менее 0,5 м. В местах забивки электродов растительный или засыпной слой удаляют.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

Согласно методу пробного электрода удельное сопротивление определяется по формуле

$$\rho = 2,73Rl/lg(4l/d),$$

где  $R$  — сопротивление растеканию;  $l$  — длина погруженной части электрода;  $d$  — диаметр электрода. Если в качестве электрода применяется угловая сталь, то принимают  $d = 0,95b$ , где  $b$  — ширина уголка. Пусть, например, измерено сопротивление растеканию  $R = 100$  Ом электрода в виде уголка, ширина стороны которого  $b = 40$  мм, погруженного в землю на глубину 600 мм. Тогда удельное сопротивление грунта будет

$$\rho = 2,73 \cdot 100 \cdot 0,6 / lg(4 \cdot 0,6 / 0,95 \cdot 0,04) = 163,8 / lg(2,4 / 0,038) = 91 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Следует иметь в виду, что таким способом получают среднее (эквивалентное, эффективное) удельное сопротивление, без учета неоднородности грунта по глубине: как правило, электропроводность грунта увеличивается с глубиной. Кроме того, не учитывается и возможное изменение удельного сопротивления грунта в горизонтальном направлении.

Более полное представление о характере грунта может дать метод четырех электродов. Расположение их и расчетные соотношения могут быть различными; в налаженной практике принят наиболее простой вариант (симметричная схема Веннера) — располагать электроды по одной прямой на одинаковом расстоянии между ними (рис. 3.40). В этом случае упрощается и выражение для удельного сопротивления:

$$\rho = 2\pi aR,$$

где  $a$  — расстояние между электродами,  $R$  — сопротивление растеканию, измеренное методом амперметра — вольтметра (рис. 3.40,а) или специальным прибором (рис. 3.40,б).

Внешние электроды  $T1$  и  $T2$ , к которым подключается источник питания  $G$  (рис. 3.40,а) или выводы  $T1$ ,  $T2$  измерителя (рис. 3.40,б), называются питающими, или токовыми, внутренние  $П1$  и  $П2$  — измерительными, или потенциальными. Значение сопротивления  $R$ , полученное как отношение напряжения, измеренного на потенциальных электродах, к току через питающие электроды, называется кажущимся сопротивлением растеканию. Оно представляет собой среднее сопротивление объема грунта, примыкающего к электродам. Чем больше значение  $a$ , тем больше будет

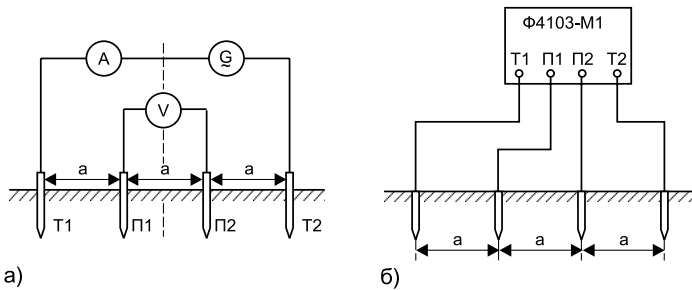


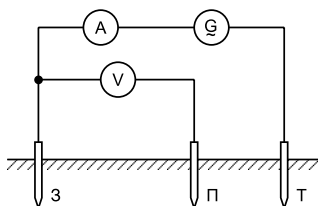
Рис. 3.40. Измерение удельного сопротивления грунта: *a* — методом амперметра-вольтметра с питанием от постороннего источника переменного тока; *б* — с помощью специального прибора для измерения сопротивления заземления

этот объем. Если грунт (слой) однородный, то удельное сопротивление с изменением расстояния *a* изменяться не будет (значения *a* и *R* изменяются в обратной пропорции), при неоднородном же грунте оно зависит от разности электродов и называется *кажущимся удельным сопротивлением*.

### 3.2.7.2. Измерение сопротивления растеканию заземлителя

**Общие сведения.** Измерение методом амперметра-вольтметра (рис. 3.41). При измерениях используется метод амперметра-вольтметра, как непосредственно, так и в специальных приборах, а также компенсационный метод. Для создания цепи измерительного тока в землю забивается вспомогательный (токовый) электрод. Вне зоны растекания тока забивается потенциальный электрод (зонд), относительно которого измеряется падение напряжения. В качестве электродов обычно используются неокрашенные заостренные стальные стержни диаметром 10...20 мм, длиной 0,8...1,5 м, снабженные рукояткой и барашком для подсоединения проводов. Размещаются электроды либо по *однолучевой* схеме, когда все три заземлителя З, П и Т расположены на одной прямой, либо по *двухлучевой*, когда линии, соединяющие вспомогательные электроды П и Т с рабочим заземлителем З, являются сторонами угла. В обоих вариантах потенциальный электрод должен находиться вне зоны влияния поля тока через заземлитель или токовый электрод.

Измерения проводятся на переменном токе, чтобы избежать влияния ЭДС поляризации при постоянном токе. Для отстройки от блуждающих токов, имеющих по преимуществу частоту 50 Гц, в



*Рис. 3.41. Принципиальная схема измерения сопротивления заземлителя методом амперметра — вольтметра: З — заземлитель; П — потенциальный электрод; Т — токовый электрод; G — источник переменного тока*

приборах генерируется напряжение частотой либо ниже (20—25 Гц), либо выше промышленной (от 200 до 1000 Гц). Сопротивление растеканию считается активным.

При измерениях методом амперметра — вольтметра сопротивление заземлителя рассчитывается по закону Ома:

$$R_3 = U_3/I,$$

где  $U_3$  — падение напряжения на заземлителе при прохождении через него тока  $I$ . Значение тока должно быть возможно больше, чтобы напряжение можно было измерить с достаточной точностью. Кроме того, использование тока порядка 10 А и более позволяет избежать влияния блуждающих токов на результаты измерения.

При малых значениях сопротивления заземлителя  $R_3$  сопротивление электрода Т также должно быть малым, желательно до 10 Ом.

В качестве источника питания можно применять понижающие трансформаторы небольшой мощности с питанием их от сети 220 В. Это позволяет, во-первых, изолировать измерительную цепь от общей сети, имеющей связь с землей, и исключить тем самым возможность замыкания между ними. Во-вторых, улучшаются условия электробезопасности, что имеет особое значение при работе в наружных электроустановках. В этой связи желательно выбирать питающие трансформаторы с вторичным напряжением 12—36 В. Когда для получения необходимой силы тока этого напряжения оказывается недостаточно, используют сварочные трансформаторы, напряжение холостого хода которых составляет 65...70 В, принимая при этом необходимые меры безопасности. Наконец, при пониженном напряжении облегчается и выполне-

ние требований, предъявляемых к термической стойкости токового электрода: длительное протекание тока не должно вызывать подсушивания грунта и, как следствие, возрастания сопротивления электрода. С этой точки зрения падение напряжения на электроде должно быть ограничено; принимают  $U_{\text{э}} = \leq 14\sqrt{\rho}$ , т. е., например, не более 42 В при удельном сопротивлении грунта  $\rho = 10$  Ом·м. Учитывая, что в обычных условиях большая часть падения напряжения в измерительной цепи приходится на токовый электрод, с этим фактором приходится считаться.

Снизить сопротивление токового электрода можно увеличением глубины его погружения либо параллельным включением нескольких электродов, расположив их не ближе 1,0—1,5 м друг от друга, либо увлажнением грунта вокруг электрода. Рекомендуется по возможности размещать электроды в зонах повышенной влажности грунта. Кроме того, токовый электрод следует располагать на достаточном удалении от испытуемого заземлителя, с тем чтобы ток растекания электрода не искажал потенциал заземлителя. Рекомендуемое расположение электродов указывается в паспорте конкретного измерительного прибора. Измерения следует производить в местах, где нет протяженных металлических коммуникаций (труб, кабелей т. п.), так как при этом зона нулевого потенциала удаляется от места измерения.

Однако поставленные условия не всегда выполнимы, особенно на территориях городов и промышленных предприятий с большим количеством подземных коммуникаций и наземных сооружений. Близкое к истинному значение сопротивления растеканию заземлителя  $R_{\text{з}}$  и может быть получено путем измерений сопротивления  $R_{\text{з}}$  при различных расстояниях  $l_{\text{зп}}$  и  $l_{\text{зт}}$  от края заземлителя  $Z$  до потенциального  $\Pi$  и до токового  $T$  электродов (рис. 3.42) соответственно. С этой целью электроды размещаются по однолучевой схеме и выполняется серия измерений при разных значениях  $l_{\text{зп}}$  от  $0,2l_{\text{зт}}$  до  $l_{\text{зт}}$  ступенями через  $0,1l_{\text{зт}}$  и при фиксированном расстоянии  $l_{\text{зт}} = D$ , где  $D$  — наибольший линейный размер заземлителя (для лучевого заземлителя — длина луча, для заземлителя в виде многоугольника — наибольшая диагональ). По данным этих измерений строится кривая зависимости полученных значений сопротивления  $R_{\text{з}}$  от отношения  $l_{\text{зп}}/l_{\text{зт}}$  (рис. 3.43). Если эта кривая будет монотонной, с пологой средней частью, то за истинное  $R_{\text{зи}}$  принимается значение сопротивления при  $l_{\text{зп}}/l_{\text{зт}} = 0,5$ .



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

Согласно рекомендациям АО «Фирма ОРГРЭС», такое решение допустимо, когда разница сопротивлений  $\Delta R_z$ , измеренных при  $l_{зп}/l_{зт} = 0,4$  и  $l_{зп}/l_{зт} = 0,6$ , не превышает более чем на 10% значение сопротивления  $R_{зи}$ , измеренное при  $l_{зп}/l_{зт} = 0,5$ :  $\Delta R_z/R_{зи} \leq 10\%$  (рис. 3.43,а). Если это условие не соблюдается, то серия измерений повторяется при  $l_{зт} = 2D$ , и точка пересечения обеих кривых принимается за истинное значение сопротивления, а если кривые не пересекаются, то повторяют измерения при  $l = 3D$  и т. д. При этом обеспечивается погрешность измерения не более 10%. Если из-за влияния различных коммуникаций какая-либо кривая оказывается немонотонной, измерения повторяют, расположив электроды в другом направлении от заземлителя З. Указанные рекомендации носят общий характер и в документах фирм-изготовителей конкретных приборов они варьируются.

В некоторых случаях измерение можно упростить. Так, на опорах ВЛ обычно применяются заземляющие устройства с небольшими размерами в плане. При этом условии удовлетворительные результаты можно получить, расположив электроды в соответствии с соотношением

$$L_{зп} = l_{зт} = 1,5D,$$

причем для двухлучевой схемы дополнительно должно соблюдаться условие

$$l_{тп} = D.$$

Расстояние  $l_{зп}$  необходимо отмерять от края заземляющего устройства; оно должно составлять не менее 30 м от тела опоры.

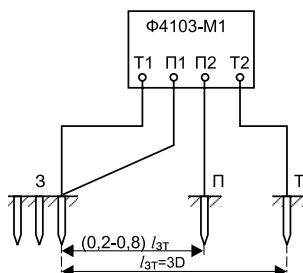
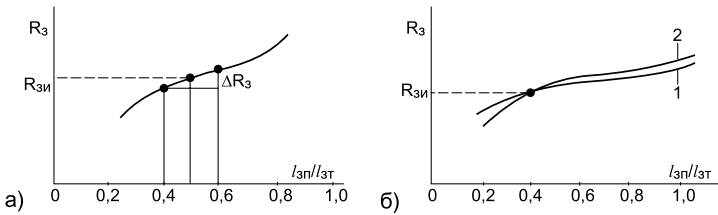


Рис. 3.42. Измерение сопротивления заземлителя при различных расстояниях до измерительных электродов



*Рис. 3.43. Зависимость измеренного сопротивления растеканию заземлителя от расстояния до потенциального и токового электродов: а — при большом удалении электродов; б — при недостаточно большом удалении электродов; 1 — кривая при  $l_{3т} = 2 D$ ; 2 — кривая при  $l_{3т} = 3 D$*

Схемы с питанием от отдельных понижающих трансформаторов, наряду с несомненными достоинствами (помехоустойчивость, точность, чувствительность), требуют громоздкого оборудования и повышенных трудозатрат. Поэтому в наладочной практике они применяются чрезвычайно редко, только в тех случаях, когда при измерении специальными приборами не удастся отстроиться от влияния посторонних токов или когда такие приборы отсутствуют.

### 3.2.7.3. Измерительные приборы

**Измеритель сопротивления заземления М 416.** Изготовитель этого прибора — завод «Мегомметр» (г. Умань, Украина), ранее выпускавший измерители типа МС-08. Источником питания в них служил электромашинный генератор постоянного тока с ручным приводом и механическим коммутатором для преобразования постоянного тока в переменный. Измерительная часть была выполнена в виде логометра постоянного тока с токовой и потенциальной рамками, т. е. использовался метод амперметра — вольтметра. Главный недостаток прибора — чрезмерно большая масса (13,5 кг).

Прибор М 416 — портативный (масса не более 3 кг) и более чувствительный. Питание прибора — от сухих элементов; описание см. 3.3.3.3.

Для проведения измерений заземлитель 3 и вспомогательные электроды Т и П подключаются к зажимам 1, 2, 3 и 4 прибора (рис. 3.44). При измерениях по схеме рис. 3.44,а в результате измерений входит сопротивление провода, соединяющего зажим 1 с заземлителем 3. Поэтому такое включение допустимо при измерении сопротивлений выше 5 Ом.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

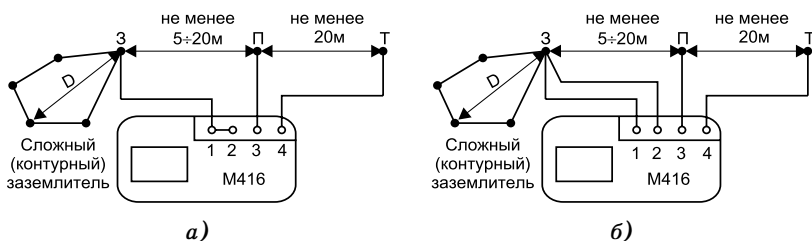


Рис. 3.44. Подключение прибора М 416 к сложному (контурному) заземлителю: а — по трехзажимной схеме; б — по четырехзажимной схеме

При меньших значениях измеряемого сопротивления применяют включение по четырехзажимной схеме (рис. 3.44,б).

Измерение удельного сопротивления грунта производится аналогично, но к зажимам 1 и 2 вместо контура присоединяется дополнительный электрод в виде стержня или трубы диаметром не менее 5 мм. Удельное сопротивление определяется по методу пробного электрода или по методу четырех электродов (п. 3.2.6.1).

Этим прибором можно измерять также активные сопротивления по двух- и четырехзажимной схеме.

Основной недостаток прибора М 416 состоит в том, что он подвержен влиянию блуждающих токов и в ряде случаев дает большую погрешность. Прибор снят с производства, но еще эксплуатируется в ряде электрохозяйств.

**Измеритель сопротивления заземления Ф4103-М1.** Превосходит прибор М 416 по многим показателям: выше разрешающая способность и входное сопротивление (в 2 тыс. раз), защищен от помех и др. Класс точности 4,0 на диапазоне 0—0,3 Ом и 2,5 на остальных диапазонах (до 15 кОм). Частота измерительного тока в пределах 265—310 Гц. Переменное напряжение на токовых зажимах при разомкнутой внешней цепи 36 В.

Измеритель содержит генератор переменного измерительного тока с зажимами Т1 и Т2 и избирательный вольтметр с зажимами П1 и П2 для подключения соответственно токовых и потенциальных электродов. Генератор вырабатывает стабилизированный переменный ток прямоугольной формы. Избирательный вольтметр выделяет полезный сигнал на фоне помех, пропорциональный измеряемому сопротивлению. При превышении допустимого уровня помех загорается сигнальная лампа. Полезный сигнал усиливает-

ся, выпрямляется и поступает на измерительный прибор, шкала которого градуирована в единицах сопротивления. Имеется встроенный контроль напряжения питания, уровня помех и сопротивления вспомогательных электродов.

Измерение сопротивления заземлителей выполняют по схеме рис. 3.42. Направление разноса электродов П и Т выбирают так, чтобы соединительные провода не проходили вблизи металлоконструкций или параллельно трассе ЛЭП. Расстояние между токовым и потенциальным электродами должно быть не менее 1 м. Присоединение проводов к сложному заземлителю выполняют на одном из электродов на расстоянии 0,2—0,4 м друг от друга. Измерительные электроды размещают по однолучевой или двухлучевой схеме, устанавливая потенциальный электрод на разных расстояниях от токового.

Перед началом измерений следует оценить уровень помех в проверяемой цепи, подключив к ней зажимы П1 и П2 прибора. Если напряжение помех превышает допустимый для предела 0,3 Ом уровень 3 В, необходимо перейти на диапазон 0—1 Ом, где допускается уровень 7 В. Превышение допустимого уровня определяется по загоранию сигнальной лампы. Далее следует измерить сопротивление потенциального электрода П по двухзажимной схеме. Если это сопротивление окажется выше допустимого значения, указанного в паспорте прибора для выбранного диапазона измерения, его необходимо уменьшить. После этого собирают схему рис. 3.40,б и производят калибровку прибора. Если при этом обнаруживается, что сопротивление токового электрода выше допустимого, то следует либо уменьшить его, либо провести измерения при повышенном сопротивлении с учетом возникающей в этой связи дополнительной погрешности. Измерения сопротивления точечного заземлителя производят при удалении токового электрода на расстояние  $l_{\text{ст}} \geq 30$  м.

Измерение удельного сопротивления грунта проводят методом четырех электродов (по схеме Веннера), предварительно проверив сопротивление потенциальных электродов. Расстояние  $a$  (рис. 3.40,б) принимается не менее чем в 5 раз больше глубины погружения электродов.

Измерение активных сопротивлений производится так же, как и прибором М 416.

**Измерители сопротивления заземляющих устройств серии MRU-100** (Польша). Цифровые измерители MRU-100, MRU-101

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

предназначены для измерения сопротивления заземляющих устройств, сопротивления соединительных проводников и удельного сопротивления грунта. Основные возможности измерителей:

- измерение сопротивления растеканию заземлителей по трех- или четырехзажимной схеме;
- измерение удельного сопротивления грунта с учетом расстояния между электродами;
- измерение активного сопротивления по двух- или четырехзажимной схеме;
- проверка напряжения помех и блокирование измерений при превышении допустимого уровня помех (40 В);
- память данных 300 измерений и передача их в компьютер (в измерителе MRU-101).

Прибор снабжен измерительными щупами и гнездами Н и Е — для коммутации цепи измерительного тока, ES и S — для соединения с потенциальными электродами, а также разъемами для подключения измерительных клещей и порта интерфейса. (MRU-101). Поворотный переключатель обеспечивает выбор функций измерения сопротивления заземлителя, удельного сопротивления грунта, а также калибровки измерительных клещей. Инициация функций производится клавишами. Питание измерителя MRU-100 осуществляется от сухих батарей, измерителя MRU-101 — от никель-кадмиевых аккумуляторов. Измерительный ток 225 мА, частота 128 Гц.

Измерение сопротивления заземлителя (рис. 3.45) обычно производится по трехзажимной схеме (рис. 3.45,а). При этом следует обратить внимание на качество соединения заземлителя с подводными проводами, очистить место контакта от краски, грязи и т. п. Если сопротивление потенциальных электродов очень велико по сравнению с заземлителем, есть возможность оценить возникающую дополнительную погрешность.

В случае, когда измеряемое сопротивление мало и требуется исключить влияние соединительных проводов и контактов, используют четырехзажимную схему (рис. 3.45,б).

Измерение удельного сопротивления грунта производится по схеме Веннера. Эта функция отличается от измерения по схеме рис. 3.45,б тем, что в прибор дополнительно вводится расстояние *a* между электродами, а результат вычисляется автоматически.

### 3.2. Измерение сопротивления заземления

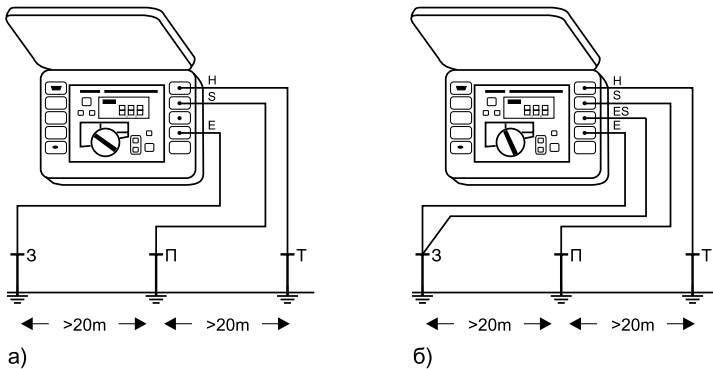


Рис. 3.45. Измерение сопротивления заземлителя прибором MRU-100: а — по трехзажимной схеме; б — по четырехзажимной схеме

Измерение активного сопротивления производится по двухзажимной или четырехзажимной схеме (рис. 3.46). Наиболее часто используется двухзажимная схема (рис. 3.46,а). Влияние подводящих проводов может быть исключено путем вычитания сопротивления измерительных проводов из показаний прибора. В четырехпроводной схеме (рис. 3.46,б) это сопротивление в измерительной цепи не содержится.

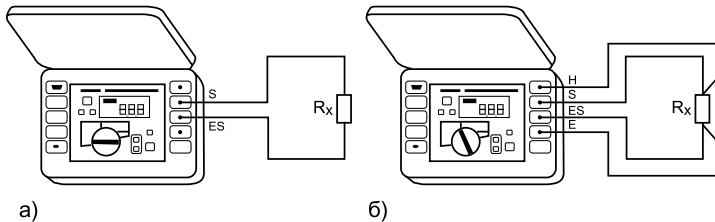


Рис. 3.46. Измерение активного сопротивления: а — по двухзажимной схеме; б — по четырехзажимной схеме

#### Современные приборы других фирм

1) Цифровые измерители сопротивления земли и удельного сопротивления грунта GEOTEST 2016 HT- Italia. Эти приборы позволяют измерять сопротивление заземления в диапазоне 0,01...1999 Ом с точностью  $\pm 2\% + 3$  ед.сч., а также удельное сопротивление грунта в диапазоне 0,6...199,9 Ом·м с той же точно-

стью. Измеритель позволяет вычислять результаты измерений и запоминать их. Питание осуществляется от батареек или от сети через адаптер. Тестовые значения тока не более 10 мА, напряжения — до 80 В. Масса прибора 1 кг.

2) Измерители сопротивления заземления и грунта ИСЗ 2016. Диапазоны измерения сопротивления 0.1...1999 Ом, удельного сопротивления грунта 0,6...199,9 Ом·м; погрешность 2%  $\pm 3$  ед.сч. Измеритель имеет внутреннюю память 999 ячеек, интерфейс с оптическим выходом и вывод на печать. Масса прибора 1 кг.

3) Многофункциональные тестеры Fluke 1650. Отличаются простотой и безопасностью тестирования электроустановок и управления прибором, большим дисплеем с широким углом обзора. Обладая высокой механической прочностью, могут работать в полевых условиях. Имеют внутреннюю память и интерфейс для работы с РС. Функции измерения сопротивления заземления выполняет модель 1653. Масса (с батареями) 1,2 кг.

4) Измеритель сопротивления заземления и удельного сопротивления грунта DET4TD («MEGGER», Великобритания). Выбор режима измерения производится поворотным переключателем. Большой легко читаемый дисплей и большая отдельно стоящая кнопка TEST облегчают пользование прибором даже в плохо освещенных местах.

Перед началом измерений прибор выполняет автоматическую диагностику и выдает информацию о наличии неисправностей или помех в измерительной цепи. Схема прибора позволяет осуществить отстройку от помех напряжением до 40 В. Диапазон измерения сопротивления от 0,01 Ом до 2 кОм, выходное напряжение 25 или 50 В.

5) Измеритель сопротивления заземляющих устройств, удельного сопротивления грунта и металlosвязи ИС-10 (НПФ «Радио-Сервис», Россия). Микропроцессорная схема прибора обеспечивает автоматический выбор диапазона измерения, учет сопротивления соединительных проводов произвольной длины, вычисление удельного сопротивления грунта. Имеет встроенную память на 40 измерений, защиту от неправильного включения.

6) Широкую гамму современных цифровых приборов для измерения параметров безопасности электроустановок предлагает дистрибьютер ООО «ПАРМА» (производитель Metrel DD). Приборы снабжены встроенным источником питания, ЖК дисплеем. Для измерения сопротивления заземлителей и удельного сопротивле-

ния грунта может служить измеритель типа М12124. Измерение производится по 4-х проводной схеме, расстояние между электродами — до 30 м. Диапазон измерения сопротивления — от 0,11 Ом с разрешением 0,01 Ом до 20 кОм, удельного сопротивления от 0 до 2000 Ом·м; память 1000 тестов; масса 1,3 кг.

#### 3.2.7.4. Измерение сопротивления пола и стен

Измеряется сопротивление участка пола или стены относительно земли. Площадь такого участка принимается равной или близкой площади двух ступней человека. Сопротивление измеряется между испытательным электродом и защитным проводником электроустановки, обычно с помощью мегаомметра (рис. 3.47). В качестве испытательного электрода применяется металлическая пластина или сетка.

Согласно документам РАО «ЕЭС России» (РД 153-34.0-20.525) собирается схема рис. 3.47,а. Измерение производится мегаомметром 1 с помощью конструкции, состоящей из доски 2, поролоновой пластины 3, медной сетки 4 и влажной ткани 5. Конструкция прижимается к полу грузом Р.

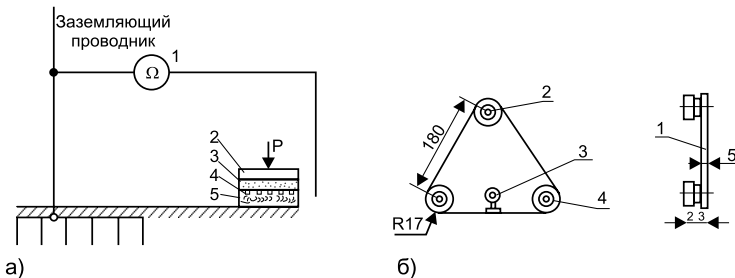


Рис. 3.47. К измерению сопротивления пола и стен: а — схема измерения; б — вариант конструкции испытательного электрода

Согласно рекомендациям ГОСТ Р 50571.16-99 испытательные электроды могут быть одного из двух типов. Электрод первого типа состоит из квадратной металлической пластины со стороной 250 мм и квадратной влажной водопоглощающей бумаги или материи со стороной примерно 270 мм, помещаемой между металлической пластиной и поверхностью пола (стены).

Электрод второго типа (рис. 3.47,б) представляет собой треножник, ножки которого образуют вершины равностороннего треуго-



льника. Каждая ножка имеет эластичное основание, обеспечивающее при нагрузке плотный контакт с поверхностью пола (стены) площадью примерно  $900 \text{ мм}^2$  и сопротивление менее  $5000 \text{ Ом}$ . Перед измерением поверхность смачивают или покрывают влажной материей. Конструкция показанного на рис. 3.47,б треножника содержит: алюминиевую пластину 1, винт 2 с шайбой и гайкой, клемму 3 для подключения провода от измерителя и контактной ножки 4 из проводящей резины.

Во время измерений электроды прижимают к поверхности пола или стены с усилием, равным  $750$  или  $250 \text{ Н}$  ( $75$  или  $25 \text{ кгс}$ ) соответственно.

Опыт показывает, что значения сопротивления зависят не столько от материала пола, сколько от состояния поверхности и связи ее с землей, а также от контакта между пластиной и полом. Особенно велика эта зависимость у сухих полов, а у влажных и сырых разница невелика. Надо также иметь в виду, что часть измерительного тока растекается по поверхности пола к ОПЧ и СПЧ, связанным с системой заземления, из-за чего значения поверхностного сопротивления мокрого и сухого пола могут различаться на несколько порядков. Поэтому испытательный электрод следует располагать по возможности дальше от зануленных частей оборудования. В общем случае при влажных и проводящих полах измеренная величина является суммой сопротивления собственно пола и сопротивления прохождению тока по поверхности пола.

#### 3.2.7.5. Определение напряжения прикосновения

**Значение напряжения.** При однофазном КЗ в системе TN на открытых проводящих частях (ОПЧ), а также на сторонних проводящих частях (СПЧ), связанных с системой зануления, возникает напряжение по отношению к земле. Это напряжение имеет наибольшее значение в месте замыкания и создает опасность для человека или животных, если напряжение прикосновения  $U_{\text{пр}}$  превысит предельно допустимое значение. В нормативных документах указываются предельно допустимые значения напряжения прикосновения и тока через человека, а также сопротивление тела человека.

Электрическое сопротивление тела человека нелинейно и зависит от многих факторов. Его расчетная электрическая схема может быть представлена сочетанием параллельно и последовательно соединенных сопротивлений и емкостей, как, например, на рис. 3.48. Здесь принято:  $R_1$  — активное сопротивление кожи;

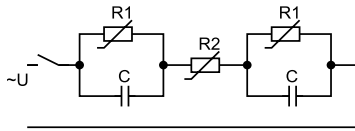


Рис. 3.48. Эквивалентная схема электрического сопротивления тела человека

$R_2$  — активное сопротивление внутренних органов;  $C$  — емкость между поверхностью кожи и мышечной тканью. На постоянном токе сопротивление человека  $R_{\text{ч}} = 2 R_1 + R_2$ , при небольших значениях переменного напряжения промышленной частоты находится в пределах 6...100 кОм, при больших (пробой кожи) составляет порядка 1 кОм.

Эквивалентная электрическая схема замещения цепи однофазного КЗ представлена на рис. 3.39 б. Поскольку в исправной сети сопротивление тела человека  $R_{\text{ч}}$  более чем на порядок превышает сопротивление  $Z_{\text{н}}$  (<10 Ом) и  $R_0$  (<30 Ом), можно считать, что напряжение прикосновения  $U_{\text{ПР}}$  примерно равно падению напряжения на нулевом проводнике:

$$U_{\text{ПР}} = I_{\text{ч}} R_{\text{ч}} \approx I_{\text{н}} Z_{\text{н}}.$$

Следовательно, снижения напряжения прикосновения можно достичь уменьшением полного сопротивления  $Z_{\text{н}}$  нулевого проводника. Сокращением длины проводника достигается пропорциональное уменьшение  $Z_{\text{н}}$ , сближением фазных и нулевого проводников — уменьшение внешнего индуктивного сопротивления цепи фаза — нуль, повышением сечения нулевого проводника — уменьшение активной составляющей сопротивления  $Z_{\text{н}}$ ; на практике последнее обычно наиболее доступно.

Если пренебречь сопротивлением трансформатора (например, при мощности 1000 кВА и более), т. е. принять, что  $Z_{\text{T}} = 0$ , и считать, что проводимость защитного проводника равна проводимости фазного (ПУЭ, изд.7-е, п. 1.7.161), то фазное напряжение при ОКЗ распределится поровну между фазным и нулевым проводниками, так что

$$U_{\text{ПР}} = \frac{U_{\phi}}{2} = \frac{220}{2} = 110 \text{ В}.$$

Когда проводимость нулевого проводника меньше фазного, напряжение прикосновения может быть больше 110 В и в пределе

достигать фазного при обрыве нулевого провода. Фактически же напряжение  $U_{\text{ПР}}$  оказывается значительно ниже благодаря наличию повторных заземлителей и системы уравнивания потенциалов, и в большинстве случаев находится в пределах 1—100 В.

#### Основные принципы измерения напряжения прикосновения

В связи с опасностью длительного протекания тока ОКЗ и высоких значений возможного напряжения прикосновения, режим замыкания на землю (на корпус) при измерении должен быть ограничен либо по значению тока и напряжения прикосновения, либо по времени. Соответственно замыкание производят следующими способами: с питанием цепи от постороннего источника пониженного напряжения; с введением в цепь фазы — нуль добавочного сопротивления; в импульсном режиме. Во всех случаях, когда измерительный ток  $I_{\text{ИЗ}}$  отличается от значения  $I_{\text{К}}$  тока реального ОКЗ, измеренное значение  $U_{\text{ПР.ИЗ}}$  следует умножить на отношение  $I_{\text{К}}/I_{\text{ИЗ}}$ :

$$U_{\text{ПР}} = U_{\text{ПР.ИЗ}} I_{\text{К}} / I_{\text{ИЗ}}.$$

Напряжение измеряется между двумя точками, одна из которых выбирается в месте возможного прикосновения к металлической поверхности ОПЧ или СПЧ, а другая — на металлической пластине, имитирующей ступни ног человека. Пластины располагают на расстоянии 0,8—1 м от оборудования. Для удобства подключения к корпусу оборудования один из проводов вольтметра присоединяют к напильнику, которым непосредственно перед измерением делают надпил. Выводы вольтметра шунтируют резистором, моделирующим сопротивление тела человека. В некоторых специализированных приборах этот резистор встроен; если сопротивление встроенного резистора не равно требуемому, следует его заменить или подключить наружные резисторы. Отклонения от требуемых значений допускаются в пределах до Систематическая погрешность измерения до 5% обеспечивается при условии, что внутреннее сопротивление вольтметра составляет не менее 20 кОм/В; в электронных и цифровых приборах это условие выполняется всегда. Класс точности измерительных приборов не ниже 2,5.

#### Способы измерения

1) Применение пониженного напряжения. В качестве источника питания применяется понижающий трансформатор с вторичным напряжением 12—25 В, подключаемый к проверяемой цепи

вместо силового трансформатора в непосредственной близости от него. Измеряются напряжение прикосновения и ток замыкания на корпус, вводится соответствующая поправка ( $I_K/I_{из}$ ).

**Преимущества:** заведомо безопасное значение напряжение прикосновения; отсутствие необходимости применения специализированных приборов.

**Недостатки:** нарушение электроснабжения потребителей; трудоемкость; сложность измерения малых значений напряжения прикосновения, в 10 — 20 раз меньших, чем в режиме естественного КЗ на корпус.

2) Введение добавочного сопротивления.

При замыкании цепи фаза — нуль на добавочное сопротивление  $R_d$  (рис. 3.39) ток в ней составит

$$I_d \approx \frac{220}{Z_{ц} + R_d}$$

а напряжение прикосновения  $U_{пр} = I_d Z_H$ . Положив, например, что это напряжение не должно превышать 12 В, а сопротивление  $Z_{ц} = 2Z_H$ , получим из этих выражений условие для выбора минимального значения сопротивления  $R_d \geq 8Z_{ц}$ . Для большинства электроустановок сопротивление  $Z_{ц}$  не превышает 2 Ом, и можно принять минимальное значение  $R_{d \text{ мин}} = 16$  Ом. Поскольку все же остается опасность повышенного сопротивления цепи фаза-нуль  $Z_{ц}$  или даже обрыва нулевого провода, сопротивление  $Z_{ц}$  должно быть предварительно измерено. Если  $Z_{ц}$  менее 2 Ом или допускается напряжение прикосновения более 12 В, например 25 или 50 В, то с точки зрения электробезопасности можно принимать и меньшие значения сопротивления  $R_d$ , но надо иметь в виду, что при этом выделяемая на резисторе мощность составит несколько киловатт. Обычно стремятся проводить измерения при токе  $I_d = 20\text{—}40$  А, хотя допускаются и меньшие значения, если выбор резисторов требуемой мощности встречает серьезные затруднения. Можно рекомендовать применение резисторов распространенных типов (например ПЭВ) с номинальной мощностью на порядок меньше расчетной при условии, что замыкание будет ограничено временем, необходимым лишь для считывания показаний измерительных приборов.

Результат измерения должен быть скорректирован умножением полученного значения  $U_{пр.и}$  на отношение  $I_K/I_d$  или  $(Z_{ц} + R_d)/Z_{ц}$ .

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

**Преимущества:** не требуется специализированных приборов; измерение производится без нарушения электроснабжения потребителей.

**Недостатки:** трудность выбора резисторов большой мощности; сложность измерения малых значений напряжения прикосновения, обусловленных уменьшенным током замыкания.

3) Импульсный режим. В цепь фаза — нуль вводится бесконтактный (обычно тиристорный) замыкатель, который обеспечивает одиночные или повторяющиеся кратковременные импульсы тока замыкания и, соответственно, напряжения прикосновения. Измерения производятся импульсными приборами. В повторно — кратковременном режиме подаются импульсы длительностью 0,05—0,10 с с паузами 5—10 с. Более удобно и безопасно использовать одиночные импульсы длительностью 0,01—0,02 с, как например в приборах Щ 41160 или ЭК 0200. Первый из них предназначен для измерения тока в цепи фаза — нуль, а для измерения напряжения прикосновения требуется отдельный вольтметр или осциллограф с запоминанием, второй же представляет собой специализированный комплект со встроенными амперметром и вольтметром. Находят применение геофизические, а также импортные приборы соответствующего назначения.

Измерение напряжения прикосновения с помощью прибора ЭК 0200 поясняется рис. 3.50. Измерения производят два оператора, один из которых управляет блоком короткозамыкателя БКЗ, а другой подключает блок измерения БИ к объекту и счи-

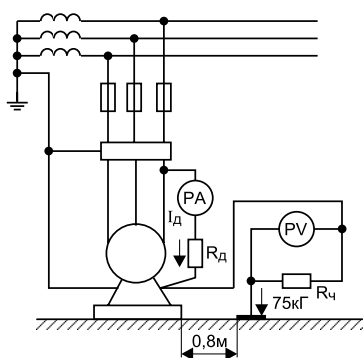


Рис. 3.49. Введение добавочного сопротивления

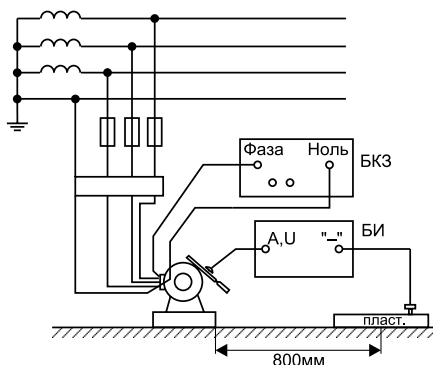


Рис. 3.50. Измерение с помощью прибора ЭК0200

тывает результат измерения. Проводом с зажимами соединяют клемму «—» прибора с пластиной, имитирующей ступни ног человека, а провод с напильником подключают свободным концом к клемме «кА, V» прибора. Прижимая напильник к проводящей части объекта измерения, включают кнопками ПИТАНИЕ блоки БКЗ и БИ, устанавливают предел измерений 250 В и нажимают кнопку СБРОС; при необходимости предел измерений уменьшают. При нажатии кнопки ИЗМЕРЕНИЕ блока БК происходит замыкание и загорается индикатор; если он не загорелся, кнопку ИЗМЕРЕНИЕ нажимают повторно. В режиме закорачивания сети замыкатель включается при значениях угла запаздывания 90 и 270° эл. Для учета индуктивного характера цепи фаза — нуль и уточнения тем самым результата измерения переключатель ПАМЯТЬ следует установить в положение ВКЛ. Когда результат измерения существенно отличается от предельно допустимого значения, такое уточнение можно не производить, поскольку разница составит не более 10—15%. Интервал между измерениями должен быть не менее 15 с.

**Предельно допустимые значения напряжений прикосновения** регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 с изменениями, введенными 01.07.88, в системе ССБТ (Система стандартов безопасности труда). Эти значения установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам (как наиболее опасных) и в зависимости от продолжительности воздействия напряжения на человека. Ниже приводятся данные для электроустановок переменного тока частотой 50 Гц, различающихся по назначению и режиму.

#### 1) Нормальный режим.

Напряжение прикосновения при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки не должно превышать 2 В при продолжительности воздействия не более 10 мин в сутки. Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 20 °С) и влажности (относительная влажность более 75%) напряжения прикосновения должны быть уменьшены в три раза.

Сопротивление резистора, моделирующего сопротивление тела человека, принимается равным 6,7 кОм.

#### 2) Аварийный режим производственных электроустановок

Предельно допустимые напряжения прикосновения не должны превышать значений, указанных в табл. 3.16.

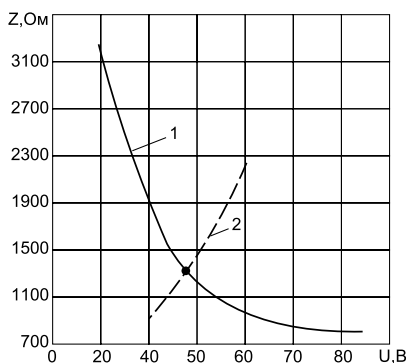
Таблица 3.16

*Зависимость предельно допустимых значений напряжений прикосновения от продолжительности воздействия в производственных электроустановках*

Продолж. возд., с	0,01–0,06	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Напряж., В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20

Сопротивление тела человека должно моделироваться резистором сопротивлением 0,85 кОм при времени воздействия до 0,5 с, а более 0,5 с — сопротивлением, имеющим зависимость от напряжения согласно рис. 3.51.

Однако это требование ГОСТ содержит неопределенность: значение моделирующего сопротивления поставлено в зависимость от приложенного напряжения, тогда как последнее, в свою очередь, зависит от выбора сопротивления. Реализовать такое сопротивление достаточно простыми техническими средствами на практике не представляется возможным. Можно рекомендовать следующее решение: зная время отключения КЗ, найти из табл. 3.16 допустимое значение напряжения прикосновения, по кривой рис. 3.51 предварительно принять для него соответствующее значение моделирующего сопротивления  $R'_M$  и измерить напряжение прикосновения  $U'_{ПР}$ ; если оно окажется больше допустимого,



*Рис. 3.51. К выбору моделирующего резистора: 1 — зависимость сопротивления тела человека от приложенного напряжения (по ГОСТ); 2 — падение напряжения на моделирующем резисторе (к примеру 2)*

цепь бракуется. Если измеренное напряжение будет ниже допустимого, окончательные значения моделирующего сопротивления  $R_M$ , а также напряжения прикосновения  $U_{\text{ПР}}$  найдем, исходя из следующих соображений.

Сопротивление  $R_M = Z$  является одной из составляющих сопротивления цепи тока через человека  $R_{\text{ч}} = Z + R_{\text{ОП}} = R_M + R_{\text{ОП}}$ , где  $Z$  — сопротивление тела человека, зависящее в данном случае от приложенного напряжения согласно рис. 3.51, а  $R_{\text{ОП}}$  — сопротивление опоры под ногами человека. При измерении падение напряжения на сопротивлении  $R_M$  (напряжение прикосновения) будет

$$U_{\text{ПР}} = U_{\text{Ф}} \frac{R_M}{R_M + R_{\text{ОП}}},$$

откуда сопротивление опоры

$$R_{\text{ОП}} = R_M \frac{U_{\text{Ф}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}}.$$

Подставив в эту формулу значения  $U_{\text{ПР}} = U'_{\text{ПР}}$  и  $R_M = R'_M$ , полученные из опыта, найдем значение  $R_{\text{ОП}}$  и далее

$$R_M = R_{\text{ОП}} \frac{U_{\text{ПР}}}{U_{\text{Ф}} - U_{\text{ПР}}}.$$

Поскольку параметры  $U_{\text{П}}$  и  $R_M$  связаны между собой как этой зависимостью, так и установленной ГОСТ, искомые значения  $R_{\text{И}}$  и  $U_{\text{П}}$  определяются точкой пересечения кривых 1 и 2 на рис. 3.51.

Для времени свыше 1 с можно принять сопротивление  $R_M = 4\text{--}6$  кОм.

Пример 1. Продолжительность воздействия 0,3 с. Измерение производится прибором со встроенным резистором сопротивлением  $R_{\text{ВС}} = 1$  кОм. Выбрать сопротивление  $R_{\text{НР}}$  резистора, который следует подключить снаружи к зажимам измерительного прибора (вольтметра) параллельно встроенному для получения требуемого значения моделирующего сопротивления  $R_M = 0,85$  кОм. Найдим:

$$R_{\text{НР}} = \frac{R_{\text{ВС}}}{R_{\text{ВС}} - R_M} = \frac{0,85 \cdot 1,0}{1 - 0,85} = 5,7 \text{ кОм}.$$

Можно применить резистор с номинальным сопротивлением  $R_{\text{Н}} = 6$  кОм.



### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

Пример 2. Продолжительность воздействия 0,65 с. Предельно допустимое значение напряжения прикосновения в производственных электроустановках 90 В (табл.16), сопротивление  $R'_M = 0,9 \text{ кОм}$  (рис. 3.51).

Пусть в результате измерения получено падение напряжения на этом сопротивлении  $U'_{\text{ПР}} = 40 \text{ В}$ . Тогда, согласно сказанному выше и положив  $U_{\text{Ф}} = 220 \text{ В}$ , имеем:

$$R_{\text{ОП}} = 0,9 \frac{220 - 40}{40} = 4,05 \text{ кОм}$$

и далее

$$R_M = 4,05 \frac{U_{\text{ПР}}}{220 - U_{\text{ПР}}}.$$

По этому выражению строим кривую  $R_M(U_{\text{ПР}})$ , изображенную на рис. 3.51 пунктиром, точка пересечения которой с кривой  $Z(U)$  дает окончательно:  $R_M = 1350 \text{ кОм}$ ,  $U_{\text{ПР}} = 55 \text{ В}$ .

При большом количестве подобных измерений целесообразно автоматизировать выполнение необходимых расчетов с помощью компьютера. Зависимость  $Z(U)$  оцифровывается (программа Get Data Graph Digitizer) и таблица с данными заносится в программу Excel; загружается также функциональная зависимость  $R_M(U_{\text{ПР}})$ . Теперь достаточно будет только задавать в РС измеренные значения напряжения прикосновения, после чего компьютер вычислит значения  $R_{\text{ОП}}$ , сравнит функции  $Z(U)$  и  $R_M(U_{\text{ПР}})$  и найдет координаты их общей точки  $U_{\text{ПР}}$  и  $R_M$ .

#### 3) Аварийный режим бытовых электроустановок

Предельно допустимые напряжения прикосновения не должны превышать значений, указанных в табл. 3.17.

Таблица 3.17

*Зависимость предельно допустимых значений напряжений прикосновения от продолжительности воздействия в бытовых электроустановках*

Продолж. возд., с	0,01–0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
U, В	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	12

Сопротивление тела человека должно моделироваться резистором сопротивлением 1 кОм при времени воздействия до 1 с, а более 1с — сопротивлением 6 кОм.

### 3.3. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами

#### 3.3.1. Виды защитных проводников и требования к ним

##### 3.3.1.1. Назначение и использование

Цепь металлической связи между заземлителями и заземляемыми элементами осуществляется с помощью защитных проводников и является частью систем защитного заземления (зануления) и уравнивания потенциалов, предназначенных для защиты людей и животных от поражения электрическим током (рис. 3.35).

В качестве РЕ-проводников могут использоваться: 1) специально предусмотренные проводники; 2) открытые проводящие части (ОПЧ) электроустановок; 3) некоторые сторонние проводящие части (СПЧ) электроустановок (1.7.121).

Использование ОПЧ и СПЧ допускается, если они отвечают требованиям к проводимости и непрерывности электрической цепи, а СПЧ, кроме того, при условии, что их демонтаж невозможен, если не предусмотрены меры по сохранению непрерывности цепи и ее проводимости (1.7.122).

Не допускается использовать в качестве РЕ-проводников:

- металлические оболочки изоляционных трубок, несущие тросы электропроводки, металлорукава, а также свинцовые оболочки проводов и кабелей;
- трубопроводы горючих и взрывоопасных веществ, канализации и центрального отопления;
- водопроводные трубы при наличии в них изолирующих вставок.

##### 3.3.1.2. Выбор сечения

В качестве материала защитных проводников используют медь, алюминий, сталь. Наименьшие площади поперечного сечения защитных проводников выбираются в зависимости от сечения фазных проводников линии, питающей данную электроустановку, мм<sup>2</sup>:

Фазные проводники	Защитные проводники
$S \leq 16$	$S$
$16 < S < 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Площади сечений приведены для случая, когда защитные проводники изготовлены из того же материала, что и фазные провод-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

ники. Сечения защитных проводников из других материалов должны быть эквивалентны по проводимости приведенным (1.7.126), т. е. для меди, алюминия и стали выбираться в соотношении примерно 1 : 1,6 : 8 соответственно. В электромонтажной технологии такой выбор осуществляется согласно табл. 3.18.

ПУЭ-7 допускается в необходимых случаях принимать сечения защитного проводника менее требуемых, но с условием, чтобы при прохождении тока КЗ температура его за время срабатывания защитного аппарата не превысила допустимых максимальных значений. В этих случаях сечение проводника рассчитывается по формуле

$$S \geq I\sqrt{t}/k,$$

где  $I$  — ток КЗ, обеспечивающий время отключения поврежденной цепи защитным аппаратом в соответствии с требованиями ПУЭ, но не более 5 с (1.7.79, 1.7.81), А;  $t$  — время срабатывания защитного аппарата, с;  $k$  — коэффициент, значение которого принимается по ПУЭ-7 в зависимости от материала защитного проводника, его изоляции, начальной и конечной температур (1.7.126).

Необходимо, чтобы сечение, рассчитанное таким образом, соответствовало условиям, определяемым сопротивлением цепи фаза-ноль (ГОСТ Р 50571.10 — 96).

Во всех случаях сечение медных защитных проводников, не входящих в состав кабеля или проложенных не в общей оболочке (трубе, коробе, на одном лотке) с фазными проводниками, должны быть не менее:

2,5 мм<sup>2</sup> — при наличии механической защиты;

4 мм<sup>2</sup> — при отсутствии механической защиты.

Сечение отдельно проложенных защитных алюминиевых проводников должно быть не менее 16 мм<sup>2</sup> (1.7.127).

Пусть, например, в стояке здания проложены медные фазные проводники сечением 10 мм<sup>2</sup>, изоляция — поливинилхлорид (ПВХ); ток однофазного замыкания  $I_k = 700$  А, продолжительность  $t = 1$  с. В этом случае требуется сечение медного защитного проводника 16 мм<sup>2</sup>, тогда как при ПВХ с конечной температурой 160°C и коэффициенте  $k = 143$  (ПУЭ-7, 1.7.126, табл. 1.7.6) можно ограничиться сечением  $S \geq 700\sqrt{1}/143 = 4,9$  мм<sup>2</sup>, а с конечной температурой 250 °С и коэффициенте  $k = 176$  — значением

$S \geq 700\sqrt{I}/176 = 4,0 \text{ мм}^2$ , и принять ближайшие большие стандартные сечения 6 и 4 мм<sup>2</sup> соответственно.

Таблица 3.18

*Проводники равной активной проводимости при плотности тока до 2 А/мм<sup>2</sup>*

Алюминиевые проводники сечением, мм <sup>2</sup>	Стальные проводники		
	круглые диаметром, мм	полоса размером, мм	труба внутренним диаметром, мм (дюйм)
2,5	6	—	—
4	10	20 × 3	6,3 (1/4)
6	14	25 × 3	9,4 (3/8)
10	22	40 × 3	19 (3/4)
16	32	70 × 4	32 (5/4)

### 3.3.1.3. Особенности стальных проводников

Как видно из таблицы 3.18, сечение стального проводника, эквивалентного по проводимости алюминиевому, принято здесь с большим запасом в 2,5—3 раза по сравнению с отношением удельных проводимостей этих металлов, приведенным выше. Объясняется это, главным образом, тем, что соотношение 1:5 соответствует значению удельного сопротивления стали при постоянном токе, равному 0,13—0,14 Ом·мм<sup>2</sup>/м. На переменном токе сопротивление стали значительно выше и при неизменной частоте зависит от плотности тока в проводнике. Зависимость эта имеет нелинейный характер с резко выраженным максимумом сопротивления в области сравнительно небольшой плотности тока 0,25—0,5 А/мм<sup>2</sup>, который может превышать сопротивление постоянному току в 3 — 5 раз. С повышением плотности тока до 1—2 А/мм<sup>2</sup> сопротивление плавно снижается до двукратного, а свыше 30 А/мм<sup>2</sup> — остается постоянным, превышая сопротивление постоянному току не более чем на 10%. В качестве примера на рис. 3.52 приведены кривые зависимости удельных значений активного ( $R_{\text{с}}$ ), внутреннего индуктивного ( $X$ ), полного ( $Z$ ) и омического ( $R_{\text{н}}$ ) сопротивления стальной полосы 40 × 3 мм от плотности тока частотой 50 Гц. Расчетное значение внутреннего индуктивного сопротивления стальных проводников  $X = 0,6 R_{\text{с}}$ , а полное сопротивление  $Z = R_{\text{н}} \sqrt{1^2 + 0,6^2} = 1,17 R_{\text{н}}$ .

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

В связи с нелинейностью стальных проводников их сопротивление желательно определять при том значении плотности тока, которое характерно для данного режима. Если, например, требуется рассчитать сопротивление стальной полосы  $40 \times 3$  мм (площадь сечения  $120 \text{ мм}^2$ ), длиной 50 м при рабочем токе 25 А (плотность тока  $25 : 120 = 0,21 \text{ А/мм}^2$ ), то согласно рис. 3.52 следует принять сопротивление  $5,0 \times 0,05 = 0,25 \text{ Ом}$ , если же определяется сопротивление цепи фаза — нуль при токе КЗ порядка 300 А (плотность тока  $2,5 \text{ А/мм}^2$ ), то следует считать сопротивление того же проводника равным  $2,0 \times 0,05 = 0,10 \text{ Ом}$ . В последнем случае можно принять в расчет и большее значение сопротивления, с тем, чтобы обеспечить запас по току КЗ. С другой стороны, если при проектировании или контрольном расчете цепи фаза — нуль определяется сопротивление такого заземляющего проводника и ошибочно вместо  $0,10 \text{ Ом}$  принято значение  $0,25 \text{ Ом}$ , то может возникнуть ложное представление о непригодности этого проводника и вопрос о его замене. Аналогичное заключение может быть сделано и на основе результатов измерения сопротивления при токе 25—30 А.

Надо иметь в виду еще и то, что при замене сечения на большее проводимость стального проводника возрастает не пропорци-

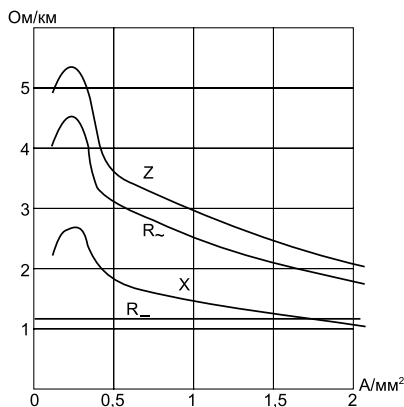


Рис. 3.52. Зависимость сопротивления стальной полосы  $40 \times 3$  мм от плотности тока:  $R_$  и  $X$  — активная и индуктивная составляющие полного сопротивления  $Z$ ;  $R_$  — сопротивление постоянному току (омическое)

онально отношению площадей сечения, а в значительно меньшей степени ввиду того, что при уменьшении плотности тока удельное сопротивление стали увеличивается. Так, например, при замене стальных шин сечением  $30 \times 4$  на шины  $50 \times 4$  мм (площадь сечения  $200 \text{ мм}^2$ ) сопротивление проводника уменьшится не в  $200 : 120 = 1,66$  раза, т. е. на 66%, а лишь в  $2,0 : 1,7 = 1,18$  раза, т. е. только на 18% (удельное сопротивление полосы  $50 \times 4$  мм при плотности тока  $300 : 200 = 1,5 \text{ А/мм}^2$  составляет  $1,7 \text{ Ом/км}$ ).

Нулевые защитные проводники в электроустановках напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью должны иметь буквенное обозначение PE и цветовое обозначение чередующимися продольными или поперечными полосами желтого и зеленого цветов. Совмещенные нулевые проводники должны иметь буквенное обозначение PEN и цветовое обозначение: голубой цвет по всей длине и желто — зеленые полосы на концах (1.1.29).

#### 3.3.1.4. Проводники системы уравнивания потенциалов

В качестве проводников системы уравнивания потенциалов могут быть использованы открытые и сторонние проводящие части, специально проложенные проводники или их сочетание (1.7.136). Сечение проводников *основной* системы уравнивания потенциалов должно быть не менее половины наибольшего сечения защитного проводника электроустановки. Сечение более  $25 \text{ мм}^2$  по меди, как правило, не требуется, но в любом случае оно должно быть не менее: медных проводников — 6, алюминиевых — 16, стальных  $50 \text{ мм}^2$  (1.7.137). Сечение проводников *дополнительной* системы уравнивания потенциалов должно быть не менее: при соединении двух ОПЧ — наименьшего из сечений проводников, подключенных к ним; при соединении ОПЧ и СПЧ — половины сечения защитного проводника, подключенного к ОПЧ (1.7.138).

#### 3.3.1.5. Соединения и присоединения защитных проводников и проводников уравнивания потенциалов

Соединения должны быть защищены от коррозии и механических повреждений. Присоединения к ОПЧ должны выполняться при помощи болтовых соединений или сварки (1.7.139, 1.7.142).

Присоединение каждой ОПЧ электроустановки к защитному заземляющему проводнику должно быть выполнено при помощи отдельного ответвления. Общим заземляющим проводником служит *главная заземляющая шина*, к которой присоединяются несколько проводников с целью заземления и уравнивания потенциа-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

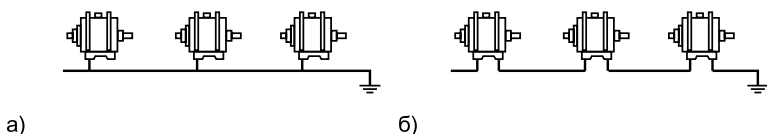


Рис. 3.53. Присоединение заземляемого оборудования к заземляющему проводнику: а — правильно; б — неправильно

лов. В производственных помещениях заземляющий защитный проводник с двумя или более ответвлениями образует магистраль заземления, к которой и присоединяются ОПЧ.

Последовательное включение в цепь защитного проводника открытых проводящих частей не допускается (рис. 3.53).

Присоединение проводящих частей к основной системе уравнивания потенциалов должно быть выполнено также при помощи отдельных ответвлений. Присоединение проводящих частей к дополнительной системе уравнивания потенциалов может быть выполнено как при помощи отдельных ответвлений, так и путем присоединения к одному общему неразъемному проводнику (1.7.144).

РЕ-проводник, присоединяемый к корпусу переносного электроприемника, должен быть медным, гибким и иметь сечение не меньше, чем у фазных проводников (1.7.149). В передвижных электроустановках защитные проводники и проводники уравнивания потенциалов также должны быть медными, гибкими и, как правило, находиться в общей оболочке с фазными проводниками (1.7.167).

#### 3.3.2. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами

##### 3.3.2.1. Нормативные требования

Согласно ПУЭ, следует проверить сечения, целостность и прочность проводников цепи, их соединений и присоединений. Не должно быть обрывов и видимых дефектов в заземляющих проводниках, соединяющих аппараты с заземлителем. Надежность сварки проверяется ударом молотка (1.8.39.2).

«Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» предусматривают, кроме того, инструментальную проверку соединений заземлителей с заземляемыми элементами путем измерения переходных сопротивлений (Приложение 3,

п. 26.1). Аналогичное измерение может производиться и согласно Нормам РАО «ЕЭС России» («Объем и нормы испытаний электрооборудования», п. 28.2). При этом считается, что сопротивление исправного соединения не превышает 0,05 Ом. Известно, что переходное сопротивление надежно выполненного сварного или болтового соединения близко по значению к сопротивлению целого проводника на отрезке той же длины. Результаты одного из обследований показали, что хорошо затянутые стыки стальных труб имели сопротивление порядка 0,0001 Ом, плохо затянутые — от 0,01 Ом и выше.

Директивные документы не устанавливают отдельных норм на сопротивление цепи металlosвязи. Главным и общим требованием к заземляющему проводнику, как части цепи фаза — нуль и устройства защитного заземления, является соответствие условиям, определяемым сопротивлением этих цепей. В сложившейся практике производства наладочных работ обычно измеряется сопротивление всей цепи металlosвязи, и в том случае, если его значение превосходит допустимое по указанным условиям, измеряют переходное сопротивление контактов и (или) решают вопрос о замене заземляющих проводников. Тем не менее в некоторых регионах надзорные службы требуют измерять сопротивление всех переходных контактов в цепи металlosвязи, и это их требование следует выполнять. Для измерения переходного сопротивления контактов можно использовать любой род тока, сопротивление цепи металlosвязи, особенно содержащей участки со сталью, рекомендуется измерять на переменном токе промышленной частоты.

#### 3.3.2.2. Визуальный контроль

- Убедиться в том, что окраска проводников по всей длине соответствует ПУЭ.
- Проверить соответствие материала и размеров проводников проектным документам и требованиям ПУЭ.
- Путем осмотра убедиться в исправности электрической изоляции проводников и защитного покрытия неизолированных проводников.
- Проверить правильность монтажа контактных соединений.
- Путем осмотра и простукивания молотком (масса до 1 кг) выявить видимые дефекты и обрывы в цепи металлической связи заземлителей с заземляемыми элементами.



#### 3.3.3. Измерение сопротивления заземляющих проводников. Методика измерений

##### 3.3.3.1. Методика измерений

В сетях простой конфигурации непосредственно измеряют сопротивление цепи между заземлителем и каждым заземляемым элементом. В сложных, разветвленных сетях (например, в цехах производственных предприятий) сначала измеряют сопротивление между заземлителем и магистралью заземления, а затем между нею и заземляемыми элементами. В жилых и общественных зданиях измеряется сопротивление участка цепи от главной заземляющей шины до этажного (квартирного) щитка и от него до металлических корпусов электроаппаратов (например, электроплит) или защитных зажимов (например, штепсельных розеток).

Перед началом измерений следует убедиться в отсутствии напряжения на элементах проверяемой цепи. Измерения могут проводиться по методу амперметра — вольтметра или специальными приборами серийного производства: мостами, омметрами (миллиомметрами, микроомметрами), измерителями заземления. Для присоединения соединительного провода от измерительной цепи к металлическим корпусам оборудования с окрашенной или ржавой поверхностью удобно пользоваться трехгранным напильником, рукоятка и конец которого обмотаны изоляционной лентой. Вблизи рукоятки приваривается контактный зажим для соединительного провода, а другой провод снабжается струбциной для присоединения к заземлителю или к магистрали заземления. В этом случае работу выполняют два человека: один прижимает напильник к металлическому корпусу, другой производит измерения непосредственно.

Поскольку высокой точности таких измерений не требуется, можно использовать приборы классов 2,5—4. Для персонала, проводящего измерения, квалификационная группа III по электробезопасности считается достаточной.

В качестве соединительных проводов рекомендуется использовать гибкие многожильные проводники сечением 2,5—4 мм<sup>2</sup>, длиной до 100 м. При этом надо иметь в виду, что сопротивление соединительных проводов сопоставимо с измеряемым: сопротивление заземляющего проводника не превышает обычно нескольких десятых долей ома, тогда как, к примеру, сопротивление медных соединительных проводов сечением 2,5 мм<sup>2</sup> достигает 0,1 Ом всего

лишь на длине около 7 м. Для учета этого сопротивления либо производят калибровку измерительного прибора (если такая коррекция в нем предусмотрена), либо измеряют сопротивление соединительных проводов и вычитают полученное значение из общего результата измерения.

### 3.3.3.2. Измерение методом амперметра — вольтметра

Схема измерения показана на рис. 3.54. Питание на схему подается от понижающего трансформатора с вторичным напряжением 12—25 В, мощностью от 100 до 300—500 В·А. Ток в измерительной цепи устанавливают в пределах 10—30 А посредством автотрансформатора или переменного резистора на первичной стороне питающего трансформатора. Протекание сравнительно больших токов вызывает выгорание случайных перемычек малого сечения, нагрев или искрение в плохих контактах и позволяет таким образом выявить скрытые дефекты. Отсутствие тока, колебание стрелки амперметра или слишком малое значение тока указывают на разрыв или ослабленный контакт.

Метод амперметра-вольтметра неудобен тем, что отсчет надо производить по двум приборам и вычислять сопротивление как частное от деления напряжения на силу тока. Некоторое упрощение достигается видоизменениями этого метода, предусматривающими либо стабилизацию напряжения или тока и тем самым исключающими необходимость использования одного из измерительных приборов, либо применением градуированного в омах амперметра. В последнем случае амперметр шунтируется ползунковым реостатом. Перед измерением струбину и шуп-напильник соединяют вместе и реостатом устанавливают стрелку амперметра на нуль, что позволяет автоматически учесть сопротивление про-

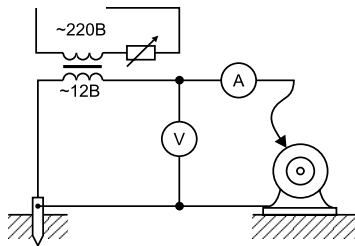


Рис. 3.54. Принципиальная схема измерения сопротивления заземляющих проводников методом амперметра-вольтметра

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

водов и фактическое значение напряжения сети. Полное отклонение стрелки должно соответствовать заданному значению тока, например, 10 А.

ГОСТ Р 50571.16-99, «Электроустановки зданий», ч.6, гл. 61 указывает: «... должны быть выполнены ... испытания защитных проводников, включая проводники главной и дополнительной систем уравнивания потенциалов» (612.1). «Рекомендуется, чтобы это испытание выполнялось с использованием источника питания, имеющего напряжение холостого хода от 4 до 24 В постоянного или переменного тока при испытательном токе не менее 0,2 А» (612.2). Надо еще учитывать, что измерение на переменном токе частотой выше 50 Гц дает завышенные значения сопротивления из-за увеличения внешнего индуктивного сопротивления проводов. Следует заметить, что не все приборы серийного исполнения могут обеспечить указанные параметры измерительного тока, но применение их допустимо. Устройство для измерения сопротивления металlosвязи, удовлетворяющее рекомендациям ГОСТа, можно собрать по схеме рис. 3.55.

Значение тока поддерживается неизменным на уровне 0,3 А с помощью последовательного стабилизатора с регулирующим транзистором VT. Источник питания содержит гальванические элементы  $4 \times 1,5$  В и конденсаторы, позволяющие компенсировать падение напряжения во время измерения в течение 5—6 с (цепи питания на рис. 3.55 не показаны). Измерение осуществляется цифровым 3,5-разрядным милливольтметром mV с жидкокристаллическим индикатором (тип РМ-138, Германия), показания которого считываются в единицах сопротивления. Для защиты изме-

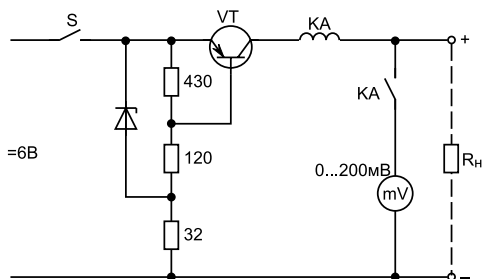


Рис. 3.55. Принципиальная схема устройства для измерения сопротивления защитных проводников

рительной части прибора служит токовое реле КА, которое исключает возможность подачи напряжения на прибор, если цепь нагрузки разорвана или ее сопротивление  $R_n$  чрезмерно велико.

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев измерения производятся специальными сертифицированными приборами, наиболее употребительные из которых описываются ниже.

### 3.3.3.3. Измерения сопротивления заземляющих проводников серийными приборами

**Омметр типа М372.** Прибор предназначен для измерения сопротивления заземляющих проводников, установления факта обрыва их, а также для обнаружения аварийного напряжения на оборудовании. Конечное значение диапазона показаний 50 Ом, диапазон измерений от 0,1 до 20 Ом. Ток потребления 3,7 мА, система прибора магнитоэлектрическая. Отсчетное устройство — стрелочный указатель. Основная приведенная погрешность прибора  $\pm 1,5\%$  от длины шкалы; масса 1,3 кг. Основной недостаток прибора — трудность измерения малых сопротивлений ниже 0,1 Ом, в частности, переходных сопротивлений контактов.

**Измерители заземления МС-08 (07), М-1103.** В измерителях МС-08 (07) использован метод амперметра — вольтметра. Эти приборы громоздки, тяжелы (масса 13,5 кг); с производства сняты и практически вышли из употребления.

Значительно меньшие габариты и массу (5,8 кг) имеет искробезопасный прибор **М-1103**, предназначенный для измерения сопротивления заземляющих устройств в помещениях, опасных по газу и пыли. Отличается применением генератора переменного тока и стабилизатора напряжения, что исключает необходимость использования коммутатора и логометра. Погрешность прибора на пределе 0,1—10 В составляет  $\pm(5 + 10/R_x)\%$ , т. е. при  $R_x = 0,1$  Ом, например, достигает 105%, что неприемлемо. Применение прибора ограничено.

#### **Измеритель сопротивления заземления М416.**

Действие измерителя основано на компенсационном принципе: падение напряжения на измеряемом сопротивлении уравновешивается напряжением на калиброванном резисторе. Нижний предел измерения 0,1—10 Ом. Источником питания служат сухие элементы общим напряжением 4,5 В; потребляемый ток не более 90 мА. Прибор содержит транзисторный преобразователь UV постоянного напряжения в переменное частотой 1100 Гц и измери-

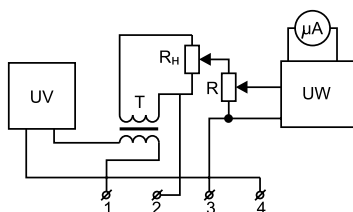


Рис. 3.56. Упрощенная структурная схема измерителя М416

тельное устройство, состоящее из реохорда  $R_k$  со шкалой и усилителя переменного тока  $UW$  (рис. 3.56). Выходное напряжение усилителя выпрямляется и поступает на индикаторный прибор, в качестве которого служит гальванометр (микроамперметр  $\mu A$ ) магнитоэлектрической системы. Нагрузку подключают с одной стороны к зажимам 1 и 2, с другой — к зажимам 3 и 4. Переменный ток от преобразователя  $UV$ , протекая через первичную обмотку трансформатора  $T$  во внешнюю цепь, создает в ней падение напряжения, которое поступает на резистор  $R$  и сравнивается с напряжением на резисторе  $R_k$  во вторичной цепи трансформатора. Разность напряжений подается на усилитель  $UW$  и индикатор. Движок реохорда устанавливают в такое положение, чтобы ток в цепи индикатора стал равным нулю. Значение измеряемого сопротивления отсчитывается непосредственно по шкале реохорда, проградуированной в омах. Погрешность измерения на нижнем пределе достигает  $\pm (4 + 10/R_x)\%$ , т. е. может превысить допустимые значения.

#### Измеритель сопротивления заземления Ф 4103 — М1.

Электронный измеритель типа Ф 4103 превосходит прибор М416 по всем основным показателям. Он обладает повышенной чувствительностью, высоким входным сопротивлением (в 2 тыс. раз больше, чем у М416), защищен от помех. Нижние диапазоны измерений 0—0,3; 0—1 Ом. Пределы допускаемой основной приведенной погрешности  $\pm 4\%$  на диапазоне 0—0,3 Ом и  $\pm 2,5\%$  на остальных диапазонах измерения.

Измеритель представляет собой четырехзажимный омметр переменного тока и содержит генератор измерительного тока с зажимами Т1 и Т2 и избирательный вольтметр, выделяющий полезный сигнал на фоне помех, с зажимами П1 и П2. Измерительный ток — стабилизированный, прямоугольной формы, частотой 265—310 Гц. Переменное напряжение на зажимах Т1 и Т2 при ра-

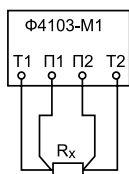


Рис. 3.57. Подключение прибора Ф4103-М1

замкнутой внешней цепи не более 36 В. Электропитание измерителя осуществляется либо от встроенных сухих элементов, либо от внешнего источника постоянного тока напряжением 11,5—15 В, ток потребления не более 160 мА. Габаритные размеры измерителя 305 × 125 × 155 мм, масса — не более 2,2 кг. Схема подключения прибора показана на рис. 3.57.

Прибор следует устанавливать на ровной горизонтальной поверхности, вдали от мощных силовых трансформаторов, так как уже при наклоне на 10° или под воздействием переменного магнитного поля частотой 50 Гц напряженностью до 400 А/м дополнительная погрешность может достигать основной. После включения питания выбирают диапазон измерения, производят корректировку нуля и калибровку прибора. Далее переводят переключатель рода работ в положение «измерение» и считывают показание прибора. При переходе на более высокий предел измерения установка нуля и калибровка производятся заново. После измерения переключатель устанавливают в положение «отключено» для предотвращения разряда батарей. Для блокировки включения измерителя необходимо закрыть крышку.

При измерении сопротивления со значительной индуктивной составляющей результаты могут отличаться от полученных на промышленной частоте или на постоянном токе в связи с повышенной частотой измерительного тока прибора. Пределы допускаемой дополнительной погрешности, вызванной индуктивной составляющей измеряемого сопротивления с постоянной времени  $10^{-4}$  с, равны удвоенным значениям допускаемой основной погрешности. Такой постоянной времени на частоте 50 Гц соответствует соотношение  $X \approx 0,03 R$ , т. е. весьма малой доле индуктивной составляющей, тогда как в ряде случаев (в цепях со сталью, с разнесенными проводниками) она может быть гораздо больше.

#### **Прибор «Вымпел» для измерения комплексного сопротивления цепи**

Прибор представляет собой омметр для измерения малых комплексных (полных) сопротивлений. Встроенный генератор синусоидального переменного тока частотой 50 Гц позволяет измерять активную и реактивную составляющие сопротивления участка цепи и фазный угол между током и напряжением. Результаты измерения выводятся на жидкокристаллический индикатор. Параметры омметра:

Тестирующий ток, мА, не менее.....	50—150
Диапазон измеряемых модулей полных сопротивлений, Ом.....	0,05—5,00
Диапазон измеряемых углов сдвига фаз, град.эл.....	—90...+90
Напряжение питания, В.....	6—9,5

Прибор снабжен микроконтроллером, который управляет процессом измерения и позволяет реализовать ряд дополнительных функций:

- электронную калибровку установку «0»;
- защиту и индикацию при случайном подключении к сети 220 В;
- индикацию обрыва цепи;
- индикацию состояния батарей;
- экономичное управление электропитанием (режим ожидания);
- таймер автоматического отключения;
- подачу звукового сигнала при разряде батарей, обрыве цепи, наличии в цепи напряжения 220 В.

**Измеритель сопротивления ИС-10** (НПФ «Радио-Сервис») имеет микропроцессорное управление, ЖК дисплей, встроенную память на 40 измерений, возможность калибровки с учетом сопротивления соединительных проводов произвольной длины. Измерение производится током свыше 200 мА с разрешением 1 мОм.

#### **Приборы фирмы «SONEL»**

Ряд многофункциональных приборов польской фирмы позволяет, в частности, осуществить контроль целостности нулевых защитных проводников и измерить их сопротивление. Приборы снабжены жидкокристаллическим дисплеем.

1) Измеритель **MZC-300 (MZC-303E)**. Контроль целостности защитных проводников и уравнительных соединений проводится

в течение 20 мс током 15 мА, порог срабатывания блокировки измерений сопротивления 3 кОм. Превышение этого порога и нарушение целостности проверяемой цепи сигнализируется световым и звуковым сигналами. В качестве источника питания используется одна из фаз сети 220 В, 50 Гц. Измерение может производиться в режиме измерения сопротивления цепи фаза — нуль или в режиме автокалибровки. Диапазон измерения сопротивления 0—0,5 Ом, разрешение 0,001 Ом, основная погрешность  $\pm(5\% + 3 \text{ ед. мл. разряда})$ . Размеры 230 × 67 × 35 мм, масса измерителя с элементами питания ок. 0,4 кг, цена ок. \$600.

2) Измеритель **MRU-100 (MRU-101)**. Прибор со встроенным микропроцессором, обе модификации различаются только комплектацией элементов питания и памятью. Измерения можно производить по двухзажимной схеме или, если требуется исключить сопротивление соединительных проводов, по четырехзажимной схеме (рис. 3.58).

Рис. 3.58. Измерение сопротивления прибором MRU по двухзажимной (а) и четырехзажимной (б) схеме

Измерительный ток 225 мА, частота 128 Гц, нижний предел измерения 0,52 Ом, разрешение 0,01 Ом. Размеры прибора 295 × 222 × 95 мм, масса 1,6 кг, цена ок. \$1300.

3) Микроомметр **MMR-600 (MMR-610)**. Это — специализированный портативный прибор для измерения малых сопротивлений, в частности, переходных сопротивлений сварных, болтовых, паяных соединений и присоединений защитных проводников. Рабочий ток — от 0,1 мА до 10 А, диапазон (верхний предел) от 2 мОм до 200 Ом, разрешение — до 1 мкОм, точность  $\pm(0,25\% R_x + 0,1\% R_{в.п})$ , где  $R_x$  — измеряемое сопротивление,  $R_{в.п}$  — верхний предел измерения. Прибор MMR-610 обеспечивает более высокие разрешение (на порядок) и точность. Имеются возможность ручной и автоматической калибровки, собственная память (990 измерений) и возможность передачи результатов измерения в память компьютера, а также защита от попадания внешнего напряжения до 440 В. Размеры прибора 295 × 222 × 95 мм, масса ок. 1,7 кг, цена ок. \$3600. Использование постоянного измерительного тока несколько ограничивает возможности прибора при определении полного сопротивления цепей с индуктивностью.

4) Измеритель МІС-3. Цифровой многофункциональный прибор, предназначенный для измерения сопротивления изоляции,



проводников присоединения к земле и выравнивания потенциалов, контактных соединений. Измерительный ток — не менее 200 мА, напряжение от 4 до 24 В.

Измерение активного сопротивления защитных и уравнительных соединений производится на диапазоне 0,00...19,99 Ом с разрешением 0,01 Ом, что вполне достаточно; основная погрешность  $\pm(2\% + 3 \text{ ед. мл. раз.})$ . Максимальное напряжение на разомкнутых зажимах 5 В, ток при замкнутых зажимах более 200 мА (батарея 2,4 В); дисплей жидкокристаллический. Размеры измерителя 230 × 67 × 35 мм, масса 0,3 кг, цена ок. \$500.

#### Тестеры фирмы HT Italia

Широкую номенклатуру итальянских тестеров для проверки заземляющих устройств предлагает компания «Теккноу» (Tek Know Holding).

1) Тестер **CombiTest 2019**. В режиме проверки целостности защитных проводов нижний диапазон измерения сопротивления составляет 0,01—9,99 Ом, разрешение 0,01 Ом, точность  $\pm 2\% R_x + 2 \text{ ед. сч.}$ . Тестовый ток постоянный >200 мА, масса прибора 1,0 кг.

2) Цифровой измеритель сопротивления земли **GEOTEST 2016**. Нижний диапазон измерения сопротивления 0,01—19,99 Ом, разрешение 0,01 Ом, точность  $\pm 2\% R_x + 3 \text{ ед. сч.}$ . Тестовый ток до 10 мА, частотой 125/75/41,6 Гц, синусоидальный, масса прибора 1 кг.

3) Комплексный многофункциональный тестер для измерений параметров безопасности сетей **GSC53 и GSC57**. Одна из функций — проверка целостности и измерение сопротивления защитных проводников. У обеих модификаций нижний диапазон 0,01—9,99 Ом, разрешение 0,01 Ом. Для GSC53 точность  $\pm 2\% R_x + 2 \text{ ед. сч.}$ , тестовый ток 200 мА постоянный, масса прибора 1,2; для GSC57 (измерение сопротивления заземляющих проводников мед. учреждений) точность  $\pm 1\% + 2 \text{ ед. сч.}$ , тестовый ток более 10 А переменный, масса прибора 1,7 кг.

4) Близкие характеристики имеют и другие аналогичные по назначению тестеры этой фирмы. Кроме того, измеритель сопротивления и изоляции защитных проводников **ISOTEST 2010** содержит встроенный оптический интерфейс, тестер **MACROTEST 5035** — микропроцессор и встроенный интерфейс, что позволяет

производить автоматическую запись результатов измерения и передавать данные на компьютер.

При выборе приборов различных фирм следует обращать внимание на следующие технические характеристики:

- параметры измерительного тока. Напряжение должно быть безопасным и во всяком случае не выше 50 В в помещениях без повышенной опасности. Проверку проводников со значительной индуктивностью предпочтительно проводить на переменном токе частотой 50 Гц. В электроустановках зданий рекомендуется обеспечивать силу тока не менее 200 мА.
- порог чувствительности. Ряд отечественных приборов имеет порог чувствительности 0,1 Ом, что недостаточно для оценки сопротивления контактов.
- разрешающая способность. При измерении сопротивления контактов разрешение должно быть не хуже 0,01 Ом.

### 3.4. Проверка цепи фаза-ноль

Цепь фаза-ноль в электроустановках с системой заземления типа TN (с глухозаземленной нейтралью на трансформаторной подстанции) образуется при замыкании фазы питающей сети на открытую проводящую часть (корпус) электрооборудования, обычно — при повреждении изоляции между ними. В случае такой аварии максимальная защита должна отключить электроустановку в кратчайшее время, обеспечивающее условия электробезопасности. Время срабатывания аппаратов максимальной защиты (автоматических выключателей, предохранителей) зависит от значения тока однофазного короткого замыкания  $I_{к1}$ , точнее — от отношения (кратности) тока  $I_{к1}$  к номинальному току  $I_n$  предохранителя или расцепителя автоматического выключателя:  $I_{к1}/I_n$ .

Значение тока  $I_{к1}$  можно измерить или рассчитать по формуле

$$I_{к1} = U_0/Z_{ц},$$

где  $Z_{ц}$  — полное (комплексное) сопротивление цепи фаза-ноль.

#### 3.4.1. Сопротивление цепи фаза-ноль

Полное сопротивление цепи фаза-ноль состоит из активных и реактивных (индуктивных) сопротивлений: а)  $R_T$  и  $X_T$  питающего трансформатора в режиме однофазного КЗ; б)  $R_{\phi}$  и  $X_{\phi}$  фазного провода линии; в)  $R_n$  и  $X_n$  нулевого защитного проводника (PE) линии, а также сопротивлений в месте замыкания, в контактах аппаратов и других элементов цепи.

Значения сопротивлений трансформатора приводятся в документах на аппарат, в справочной литературе. Иногда указываются не сопротивления  $R_T$  и  $X_T$  в несимметричном режиме однофазного КЗ, а их симметричные составляющие: прямой  $R_{1T}$ ,  $X_{1T}$ ; обратной  $R_{2T}$ ,  $X_{2T}$  и нулевой  $R_{0T}$ ,  $X_{0T}$  последовательности, и тогда сопротивления трансформатора в несимметричном режиме подсчитываются следующим образом:

активное  $R_T = R_{1T} + R_{2T} + R_{0T}$ ,

индуктивное  $X_T = X_{1T} + X_{2T} + X_{0T}$

и полное сопротивление  $Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$ .

Пусть, например, для масляного трансформатора мощностью 250 кВ·А, напряжением первичным 6—10 кВ, вторичным —

400/230 В, со схемой соединения звезда — звезда симметричные составляющие сопротивлений имеют следующие значения (Ом):

$$R_{1T} = R_{2T} = 0,009; R_{0T} = 0,097; X_{1T} = X_{2T} = 0,027; X_{0T} = 0,235.$$

Тогда активное сопротивление трансформатора будет  $R_T = 0,009 + 0,009 + 0,097 = 0,115$  Ом, индуктивное  $X_T = 0,027 + 0,027 + 0,235 = 0,289$  Ом, а полное сопротивление в режиме однофазного замыкания

$$Z_T = \sqrt{0,115^2 + 0,289^2} = 0,311 \text{ Ом.}$$

При этом надо иметь в виду, что определение сопротивлений трансформатора методом симметричных составляющих дает их угловые значения, и для расчетов токов КЗ получаемые этим методом результаты надо поделить на 3. В приведенном примере расчетные сопротивления трансформатора будут, таким образом:  $R_T = 0,115 : 3 = 0,038$  Ом,  $X_T = 0,289 : 3 = 0,096$  Ом,  $Z_T = 0,311 : 3 = 0,104$  Ом, а ток однофазного КЗ на зажимах трансформатора  $I_{K1} = 220 : 0,104 = 2115$  А. Ориентировочные расчетные значения полного сопротивления некоторых типоразмеров трансформаторов приведены в табл. 3.19. Сопротивлением трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и выше можно пренебречь.

Таблица 3.19

*Усредненные расчетные значения полного сопротивления трансформаторов 6-10/0,4 кВ при однофазном КЗ на стороне 0,4 кВ*

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединений обмоток	Полное сопротивление, мОм
<b>Масляные трансформаторы</b>		
20	Звезда — звезда с нулем	1390
50	То же	540
100	««	260
250	««	104
400	««	65
400	Треугольник — звезда с нулем	22
630	Звезда — звезда с нулем	43
630	Треугольник — звезда с нулем	14
750	Звезда — звезда с нулем	36

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединений обмоток	Полное сопротивление, мОм
<b>Сухие трансформаторы</b>		
160	Треугольник – звезда с нулем	55
250	То же	35
320	Звезда – звезда с нулем	85
750	То же	36

*Примечания.* 1. При отсутствии данных для какого — либо типа обмотки можно ориентировочно принимать, что сопротивление  $Z_T$  трансформатора данной мощности при схеме звезда — звезда примерно втрое больше, чем при схеме треугольник — звезда. 2. Значения сопротивлений трансформатора при однофазном и симметричном трехфазном КЗ прямой связи между собой не имеют и так однофазного замыкания  $I_{к1}$  *нельзя* вычислить по напряжению короткого замыкания  $u_k$ , %.

Активное сопротивление медных и алюминиевых проводников на частоте 50 Гц считается равным сопротивлению постоянному току (омическому) и рассчитывается по известной формуле

$$R = \rho l/S,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление,  $l$  — длина,  $S$  — площадь поперечного сечения проводника.

Различают внутреннее  $X_{вн}$  и внешнее  $X_{внш}$  индуктивные сопротивления проводников. Внутреннее сопротивление  $X_{вн}$  определяется свойствами проводника и имеет существенное значение для стальных (сталеалюминиевых) проводов. Следует учитывать и нелинейный характер активного и внутреннего индуктивного сопротивлений таких проводников, зависящих от плотности тока, и принимать их значения при токе, близком к ожидаемому значению тока КЗ. Разница может быть существенной: так, например, удельное сопротивление (полное) стальной полосы 40×4 мм составляет 3,3 Ом/км при плотности тока 0,5 А/мм<sup>2</sup> и почти вдвое меньше — 1,8 Ом/км при плотности тока 2 А/мм<sup>2</sup>.

Внешнее сопротивление  $X_{внш}$  зависит от конфигурации контура, образуемого прямым и обратным проводниками, и тем выше, чем дальше они расположены друг от друга. При грубой оценке удельное индуктивное сопротивление контура с отдельно проложенными прямым и обратным проводниками можно принять равным

0,6 Ом/км. Для кабельной линии этим сопротивлением часто пренебрегают ввиду его малости.

Суммарные сопротивления проводников линии, питающей данное присоединение, будут:

$$\text{активное} \quad R_{\text{л}} = R_{\text{ф}} + R_{\text{н}},$$

$$\text{индуктивное} \quad X_{\text{л}} = X_{\text{ф}} + X_{\text{н}},$$

$$\text{полное} \quad Z_{\text{л}} = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2}.$$

Таким образом, сопротивления цепи фаза-нуль можно рассчитать по формулам:

$$\text{активное} \quad R_{\text{ц}} = R_{\text{т}} + R_{\text{л}},$$

$$\text{индуктивное} \quad X_{\text{ц}} = X_{\text{т}} + X_{\text{л}},$$

$$\text{а полное сопротивление} \quad Z_{\text{ц}} = \sqrt{R_{\text{ц}}^2 + X_{\text{ц}}^2}.$$

При наладочных работах значения полного сопротивления цепи фаза-нуль, выходящие за пределы  $0,05 < Z_{\text{ц}} < 5,0$  Ом, встречаются очень редко.

Углы фазного сдвига можно вычислить из соотношений:

$$\text{для трансформатора} \quad \cos\varphi_{\text{т}} = R_{\text{т}}/Z_{\text{т}};$$

$$\text{для линии} \quad \cos\varphi_{\text{л}} = R_{\text{л}}/Z_{\text{л}};$$

$$\text{для всей цепи фаза-нуль:} \quad \cos\varphi_{\text{ц}} = R_{\text{ц}}/Z_{\text{ц}}.$$

Значения углов обычно находятся в пределах:  $50 < \varphi_{\text{т}} < 75$ ;  $5 < \varphi_{\text{л}} < 45$ ;  $10 < \varphi_{\text{ц}} < 40$  град. эл., хотя последнее может быть и выше (вблизи трансформатора).

**Пример.** Трансформатор по п. 3.4.1 питает воздушную линию длиной 300 м, провода круглые стальные ПС-50.

Удельные сопротивления провода: активное 3,7 Ом/км, внутреннее индуктивное 1,2 Ом/км, внешнее индуктивное 0,6 Ом/км.

Сопротивление проводов линии: активное  $R_{\text{л}} = 2 \cdot 0,3 \cdot 3,7 = 2,22$  Ом, внутреннее индуктивное  $X_{\text{вн}} = 2 \cdot 0,3 \cdot 1,2 = 0,72$  Ом, внешнее индуктивное  $X_{\text{вн}} = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18$  Ом, общее индуктивное  $X_{\text{л}} = 0,72 + 0,18 = 0,90$  Ом, полное  $Z_{\text{л}} = \sqrt{2,22^2 + 0,90^2} = 2,4$  Ом.

Общее сопротивление цепи фаза-нуль:

$$\text{активное} \quad R_{\text{ц}} = 0,038 + 2,22 = 2,258;$$

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

индуктивное  $X_{ц} = 0,096 + 0,90 = 0,998;$

полное  $Z_{ц} = 2,47 \text{ Ом},$

а ток однофазного КЗ будет  $I_{к1} = 220 : 2,47 = 89 \text{ А}$ . Иногда расчетное или измеренное значение тока принимают с коэффициентом запаса 0,85, учитывающим возможность падения напряжения в сети, нестабильность переходного сопротивления контактов, нелинейность сопротивления цепи фаза-нуль, а также погрешности приборов и влияние предвключенной нагрузки при измерениях. Если теперь с учетом коэффициента запаса принять  $I_{к1} = 0,85 \cdot 89 = 76 \text{ А}$ , то для потребителей в конце линии требуемое ПУЭ время отключения до 5 с может быть обеспечено, например, автоматическим выключателем серии ВА 47-63 с номинальным током 10 А (кратность  $I_{к1}/I_n > 7,6$ ) и характеристикой расцепления типа С.

Дополнительно можно рассчитать угловые параметры:

$$\cos\varphi_T = 0,115 : 0,311 = 0,37; \cos\varphi_L = 2,22 : 2,4 = 0,93;$$

$$\cos\varphi_{ц} = 2,26 : 2,50 = 0,90$$

и соответственно углы  $\varphi_T = 68^\circ$ ,  $\varphi_L = 22^\circ$  и  $\varphi_{ц} = 26^\circ$ .

При необходимости результаты расчета могут быть скорректированы за счет уточнения значений внутреннего индуктивного сопротивления при фактической плотности тока ( $89 : 50 \approx 1,8 \text{ А/мм}^2$ ) и внешнего индуктивного сопротивления при учете конкретного расстояния между проводами.

Подобные расчеты производятся при проектировании, а также при проверке результатов измерения, если они вызывают сомнения.

#### 3.4.2. Проверка цепи фаза-нуль и условия обеспечения безопасности в электроустановках

Проверка осуществляется согласно требованиям ПУЭ-7 одним из следующих способов:

- непосредственным измерением тока однофазного замыкания на корпус или нулевой защитный проводник;
- измерением полного сопротивления цепи фаза — нулевой защитный проводник с последующим вычислением тока однофазного замыкания (1.8.39.4).

Надежное отключение поврежденного участка сети обеспечивается, если кратность тока КЗ будет достаточно велика для того, чтобы время автоматического отключения питания не превышало указанных ниже значений:

Номинальное фазное напряжение, В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	30,2
Более 380	0,1

Эти значения времени считаются достаточными для обеспечения электробезопасности, в том числе, в групповых цепях, питающих передвижные и переносные электроприемники. В цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с.

Допускаются значения времени отключения более указанных выше, но не более 5 с в цепях, питающих только стационарные электроприемники от распределительных щитов или щитков при выполнении одного из следующих условий:

1) полное сопротивление защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком не превышает значения  $50/I_{к1}$  (Ом), где 50 — предельно допустимое значение напряжения (В), возникающего на участке защитного проводника между главной заземляющей шиной и распределительным щитом или щитком при повреждении изоляции (в помещении без повышенной опасности);

2) к шине РЕ распределительного щита или щитка присоединена дополнительная система уравнивания потенциалов, охватывающая те же сторонние проводящие части, что и основная система уравнивания потенциалов (1.7.79, ПУЭ-7).

Если время автоматического отключения питания не удовлетворяет указанным требованиям, то защита может быть выполнена применением двойной или усиленной изоляции, сверхнизкого напряжения, электрического разделения цепей (1.7.62).

В помещениях для содержания животных, а также в помещениях, связанных с ними при помощи сторонних проводящих частей, меры защиты при косвенном прикосновении регламентируются более жесткими нормами:

Номинальное линейное напряжение, В	Время отключения, с
127	0,35
220	0,20
380	0,05



Если указанное время отключения не может быть гарантировано, необходимы дополнительные защитные меры, например, дополнительное уравнивание потенциалов (1.7.171). В помещениях для содержания животных должна быть выполнена дополнительная система уравнивания потенциалов, соединяющая все открытые и сторонние проводящие части, доступные одновременному прикосновению (1.7.173).

#### 3.4.3. Ток КЗ и характеристики защитных аппаратов

Для выполнения требований ПУЭ-7 необходимо одним из указанных выше способов определить значение тока однофазного замыкания и по время-токовой характеристике защитного аппарата проверить, обеспечивается ли при данной кратности тока необходимое время срабатывания аппарата согласно нормам п. 3.4.2. Если время-токовые характеристики соответствующих защитных аппаратов отсутствуют, их следует снять при выполнении пусконаладочных работ. Характеристики всех производимых автоматических выключателей располагаются в зоне между двумя граничными время-токовыми характеристиками (standard time-current zone по терминологии МЭК). Время срабатывания защиты оценивают по верхней кривой время — токовой зоны, что создает известный запас.

Когда в главной цепи автоматического выключателя протекает ток, значение которого равно нижней границе диапазонов отсечки, в частности, типов В, С или D ( $3I_n$ ,  $5I_n$  или  $10I_n$  соответственно), то расцепитель должен сработать за время от 0,1 до 45 или 90 с (тип В), 15 или 30 с (тип С) и 4 или 8 с (тип D). При токе, равном верхней границе диапазона ( $5I_n$ ,  $10I_n$  или  $20I_n$ ), расцепитель должен сработать за время менее 0,1 с. У выключателей производства различных фирм эти границы выдерживаются строго, но в зависимой части характеристики срабатывания расцепителей могут заметно различаться.

Помимо обеспечения допустимого времени срабатывания при однофазном КЗ согласно требованиям ПУЭ-7, защита должна еще удовлетворять условиям гл. 3.1 ПУЭ-6. В частности, ток  $I_{к1}$  должен превышать номинальный ток  $I_n$  расцепителя автоматического выключателя с обратно зависимой характеристикой не менее чем в 3 раза (1.7.79), а во взрывоопасных зонах — не менее чем в 6 раз (7.3.139). И если, например, при кратности тока КЗ, равной 5, время срабатывания автомата, питающего распределительный

щит, будет 4 с, то во взрывоопасном помещении такой результат по ПУЭ-6 следует считать неудовлетворительным ( $I_{к1}/I_n < 6$ ), хотя требованию ПУЭ-7 он отвечает.

#### 3.4.4. Проводники в цепи фаза-нуль

В качестве РЕ-проводников в цепи фаза-нуль могут использоваться специально предусмотренные проводники, открытые проводящие части электроустановок, некоторые сторонние проводящие части (1.7.21—1.7.23).

Нулевые защитные проводники цепи не допускается использовать в качестве нулевых защитных проводников электрооборудования, питающегося по другим цепям (1.7.124). Не допускается также использование специально предусмотренных защитных проводников для иных целей (1.7.125). Площади поперечного сечения защитных проводников должны соответствовать условиям п. 1.7.126 ПУЭ (см. 3.3.1.2).

Следует иметь в виду, что при прокладке защитных нулевых проводников совместно или в непосредственной близости с фазными внешнее индуктивное сопротивление цепи фаза-нуль будет минимальным и обеспечить требования ПУЭ легче, особенно для проводников большого сечения.

Не допускается включать коммутационные аппараты в цепи РЕ- и PEN-проводников, за исключением штепсельных соединителей. Допускается одновременное отключение всех проводников на вводе в электроустановки индивидуальных жилых домов и аналогичных объектов, питающихся по однофазным ответвлениям от ВЛ (1.7.145).

Нулевой защитный проводник, к которому присоединяются металлические корпуса *переносных* электроприемников, должен быть расположен в одной оболочке с фазными проводниками, медным, гибким, сечением не менее сечения фазного проводника. Использование для этой цели нулевого рабочего провода не допускается (1.7.149). К переносным относятся электроприемники, которые могут находиться в руках человека в процессе их эксплуатации (ручной электроинструмент, бытовые электроприборы, радиоэлектронная аппаратура). В штепсельных соединителях переносных электроприемников проводник со стороны источника питания должен быть присоединен к розетке, а со стороны электроприемника — к вилке (1.7.152).

Объединение функций нулевого защитного проводника РЕ и нулевого рабочего проводника N в одном общем проводнике PEN внутри *передвижной* электроустановки не допускается. Разделение PEN- проводника питающей линии на РЕ- и N- проводники должно быть выполнено в точке подключения установки к источнику питания (1.7.157). Времена отключения защиты от сверхтоков, приведенные выше (п. 3.4.2), должны быть уменьшены вдвое или в дополнение к этой защите должно быть применено устройство защитного отключения (1.7.159). Защитные и заземляющие проводники и проводники уравнивания потенциалов должны быть медными, гибкими и, как правило, находиться в общей оболочке с фазными проводниками. Допускается одновременное отключение всех проводников линии, питающих передвижную электроустановку, с помощью одного коммутационного аппарата (разъема).

#### 3.4.5. Методы измерения сопротивления цепи фаза-нуль и тока однофазного замыкания

##### Измерения без снятия напряжения

##### 3.4.5.1. Измерение в режиме кратковременного замыкания цепи

Наиболее точно значение сопротивления цепи фаза-нуль и тока однофазного замыкания можно экспериментально определить путем кратковременной имитации однофазного КЗ и осциллографирования процесса. Однако на практике этот способ применяется только в исследовательских целях, так как требует больших трудозатрат, вызывает отключение других электроприемников и осложняет обеспечение электробезопасности. Те же недостатки присущи и измерительным приборам, использующим режим «глухого» короткого замыкания.

По этим причинам измерительный ток стремятся ограничить с помощью добавочного сопротивления  $R_{огр}$  либо до относительно больших значений (1–2 кА), либо до сравнительно малых (10–20 А) и даже до 10–20 мА. Измеренное при этом значение тока зависит от суммы сопротивлений  $Z_{ц}$  и  $R_{огр}$ , и для определения  $Z_{ц}$  надо из этой суммы вычесть сопротивление  $R_{ц}$ . Преимуществом первого варианта является то, что измерительный ток близок по значению к току естественного КЗ, благодаря чему обеспечиваются учет нелинейности цепи, влияние контактов и пр., а также возможность получения достаточно достоверного ре-

зультата при вычитании  $R_{огр}$ , так как сопротивления  $Z_{ц}$  и  $R_{огр}$  — величины одного порядка.

Однако реализуется такая возможность только при геометрическом, векторном (с учетом углов фазного сдвига) вычитании. Простое арифметическое, численное вычитание вызывает методическую погрешность, которая будет тем больше, чем меньше сопротивление цепи фаза-нуль и чем больше ее индуктивность. Если, например, при угле  $\varphi_{ц} = 60^\circ$  и отношении  $R_{огр}/Z_{ц} = 0,1$  эта погрешность составит 5%, то при  $Z_{ц} \ll R_{огр}$  может достигнуть нескольких десятков процентов. В выпускавшемся ранее (до 1985 г.) серийном приборе М-417 сопротивление  $R_{огр} = 12$  Ом; автоматическое ограничение времени включения отсутствует и резистор перегревается; нормированная погрешность — 10% от длины шкалы.

В приборах с большим измерительным током сопротивление  $R_{огр}$  мало, так что чаще всего  $0,1 < R_{огр}/Z_{ц} < 5$ , и при средних значениях угла  $\varphi_{ц}$  ошибка не превысит 10—15%. Однако включение прибора может вызвать срабатывание максимальной защиты и отключение ею работающего электрооборудования меньшей (чем проверяемое) мощности, что особенно нежелательно для ответственных электроприемников, а также при защите предохранителями, когда возможно перегорание плавкой вставки. Кроме того, такие приборы имеют значительные габариты и массу. Их целесообразно использовать для получения более точных результатов при измерении малых сопротивлений и в цепях со сталью, а приборы с малым током замыкания — в тех случаях, когда протекание большого измерительного тока может вызвать нарушение нормальной работы электроустановок. Для цепей с малой индуктивностью (например, в протяженных кабельных сетях) возможно применение приборов, в которых осуществляется арифметическое вычитание, как наиболее простых и дешевых. В современных приборах с геометрическим вычитанием необходимые операции осуществляются, как правило, с помощью микропроцессоров.

#### 3.4.5.2. Измерения в режиме дополнительной нагрузки

Эти методы основаны на том, что при подключении к одной из фаз дополнительной нагрузки соответствующее фазное напряжение изменяется на величину падения напряжения в цепи. Дополнительная нагрузка может быть активной или смешанной, ток нагрузки 20—40 А.

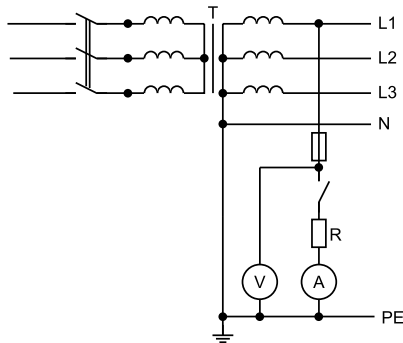


Рис. 3.59. Измерение сопротивления цепи фаза-ноль способом дополнительной активной нагрузки

Измерение таким методом с использованием нагрузочного резистора рекомендовано ГОСТ Р 50571.16-99, ч. 6, гл. 61 (рис. 3.59). Измеряют напряжение с отключенным ( $U_1$ ) и включенным ( $U_2$ ) нагрузочным резистором R и ток нагрузки  $I_n$  и рассчитывают сопротивление цепи фаза-ноль как

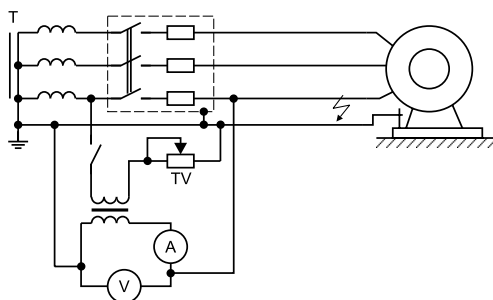
$$Z_{ц} = \frac{U_1 - U_2}{I_n}.$$

Разница между  $U_1$  и  $U_2$  должна быть значительной. Вследствие арифметического вычитания напряжений может возникать большая погрешность. Широкого практического применения при наладке методы дополнительной нагрузки не находят.

### Измерения со снятием напряжения

#### 3.4.5.3. Измерение методом амперметра-вольтметра с питанием от понижающего трансформатора (рис. 3.60)

Согласно этому принципу измеряется сопротивление  $Z_{л}$  линии (т. е. фазного и нулевого защитного проводников) от питающего силового трансформатора Т до данного электроприемника. Измерение производится методом амперметра и вольтметра с помощью понижающего трансформатора TV (сварочного, котельного), который питается от того же силового трансформатора Т и устанавливается возможно ближе к нему. Для создания замкнутой цепи фазный провод соединяют с корпусом электроприемника и посредством регулировочного резистора или автотрансформатора



*Рис. 3.60. Измерение сопротивления цепи фаза-ноль методом амперметра-вольтметра с питанием от понижающего трансформатора*

устанавливают в ней ток не менее 10—20 А. Далее измеряются ток  $I_{из}$  и напряжение  $U_{из}$  и вычисляется сопротивление линии  $Z_{л} = U_{из}/I_{из}$ , а общее сопротивление цепи фаза-ноль находят как арифметическую сумму полных сопротивлений линии и силового трансформатора  $Z_{ц} = Z_{л} + Z_{т}$ .

Основной недостаток метода, кроме необходимости отключения оборудования, состоит в появлении дополнительной погрешности из-за того, что сопротивления суммируются арифметически и при этом сопротивление трансформатора принимается по справочным данным. Погрешность суммирования тем больше, чем больше разность фазных углов трансформатора  $\varphi_{т}$  и линии  $\varphi_{л}$ , и максимальна, когда их сопротивления  $Z_{т}$  и  $Z_{л}$  одинаковы. Расчет показывает, что при  $(\varphi_{т} - \varphi_{л}) \geq 60^\circ$  и равенстве  $Z_{т} = Z_{л}$  эта погрешность превысит 15%. Однако практическое такое неблагоприятное сочетание параметров встречается редко.

Так, в приведенном в п. 3.4.1 примере расчет с учетом фазных углов (геометрическое сложение) дал значение  $Z_{ц} = 2,47$  Ом, а арифметическая сумма будет  $Z_{т} + Z_{л} = 0,104 + 2,40 = 2,50$  Ом и погрешность только 1,4%. Объясняется это тем, что сопротивление линии более чем в 20 раз превышает сопротивление трансформатора мощностью 250 кВ·А. Но если проверяются трансформатор меньшей мощности, например, 63 кВ·А и более близкое присоединение той же линии, например, на расстоянии 50 м, то при  $Z_{т} = 0,41$  Ом,  $Z_{л} = 0,40$  Ом и  $\varphi_{т} = 60^\circ$ ,  $\varphi_{л} = 22^\circ$  геометрическое сложение даст  $Z_{ц} = 0,77$  Ом, арифметическое же  $Z_{т} + Z_{л} = 0,41 + 0,40 = 0,81$  Ом, т. е. заметную погрешность около 5%.

#### 3.4.5.4. Измерение сопротивления цепи фаза-нуль методом амперметра-вольтметра с питанием от автономного источника

Метод рекомендуется ГОСТ Р 50571.16-99, ч. 6, гл. 61. Измерение выполняют при отключенной сети и закороченной первичной обмотке питающего трансформатора (рис. 3.61). Способ определения сопротивления и недостатки метода те же, что и по п. 3.4.5.3. В настоящее время оба эти метода находят лишь ограниченное применение — при отсутствии специальных приборов или сомнениях в достоверности показаний, когда их необходимо уточнить и т. п. В подавляющем большинстве случаев измерения выполняются без снятия напряжения, сертифицированными специализированными приборами, в которых непосредственно фиксируется амплитуда тока или напряжение до и после его пропускания и рассчитывается полное сопротивление и/или ожидаемый ток КЗ.

ПУЭ-7, 1.8.39.4 требуют проведения измерений только в цепи фаза — нулевой защитный проводник, цель которых — проверка обеспечения электробезопасности. Тем не менее следует иметь в виду, что аналогичным образом можно проверить и цепь фаза — нулевой рабочий проводник с целью проверки обеспечения надежной работы максимальной токовой защиты от коротких замыканий в этой цепи. То же относится и к проверке цепи фаза — фаза, если только применяемые приборы рассчитаны на линейное напряжение.

Все виды измерений без снятия напряжения должны выполняться не менее чем двумя лицами, допущенными к работам в дей-

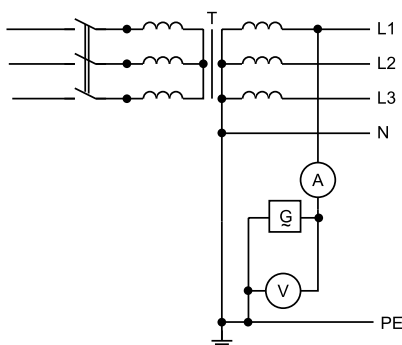


Рис. 3.61. Измерение сопротивления цепи фаза-нуль методом амперметра-вольтметра с питанием от автономного источника

ствующих электроустановках до 1000 В, одно из которых должно иметь квалификационную группу по электробезопасности не ниже IV, другие — не ниже III.

Все измерительные приборы должны иметь защиту от обрыва или недопустимо высокого сопротивления проверяемой цепи, обеспечивающую размыкание измерительной цепи и блокировку измерений при появлении на корпусе проверяемого объекта опасного напряжения.

#### **3.4.6. Измерение тока однофазного КЗ специализированными приборами**

##### **3.4.6.1. Прибор типа Щ 41160 (Украина)**

###### Назначение прибора

Цифровой прибор Щ41160 предназначен для измерения тока однофазного замыкания (КЗ) цепи фаза-нуль в сетях переменного тока 220/380 В, частотой 50 Гц, с глухозаземленной нейтралью питающего трансформатора и углом сдвига фаз в цепи  $30^\circ \pm 20^\circ$ .

###### Устройство, принцип работы и технические данные прибора

Прибор состоит из семи функциональных блоков: питания (БП), защиты (БЗ), управления (БУ), управления тиристором (БУТ), логики (БЛ), аналого — цифрового преобразования (АЦП) и индикации (БИ).

В основу работы прибора положен принцип измерения реального тока КЗ с ограничением времени его протекания. Однофазное искусственное замыкание производится через тиристор и шунт. Благодаря тому, что тиристор открывается коротким однократным импульсом, длительность протекания тока в цепи измерения не превышает 10 мс. В процессе измерения с помощью амплитудного детектора напряжения фиксируется максимальное значение падения напряжения на калиброванном сопротивлении в цепи измерительного тока.

Как известно, при включении напряжения в цепи с индуктивностью возникает апериодически затухающая составляющая тока, которая суммируется с гармонической, установившейся составляющей. Поэтому при замыкании цепи фаза-нуль амплитудный детектор зафиксирует не амплитуду установившегося тока КЗ, а наибольшее значение тока в первый полупериод, отличающееся от амплитуды установившегося тока на значение апериодической составляющей в этот момент. Начальное значение и постоянная вре-



мени апериодической составляющей зависят от фазного угла цепи  $\varphi_{ц}$ , который заранее неизвестен. Апериодическую составляющую и соответствующую погрешность можно исключить, если отпирать тиристор с углом запаздывания  $\alpha$ , равным фазному углу цепи, т. е.  $\alpha = \varphi_{ц}$ . С этой целью измерение производится в два такта: во время первого измеряется угол фазного сдвига, а затем осуществляется повторное КЗ в момент, соответствующий измеренному значению угла.

Предусмотрены два режима работы прибора — с ограничивающим резистором сопротивлением  $R_{огр} = 0,3$  Ом и без него, когда цепь фаза-нуль замыкается накоротко. Результаты измерения в режиме КЗ близки к получаемым при осциллографировании. При работе с ограничивающим резистором измерения метрологически не обеспечиваются и результаты имеют ориентировочный характер.

Органы управления и индикации измерителя выведены на лицевую панель. На задней панели расположены три зажима для подключения к объекту измерения, разъем для метрологической поверки, предохранитель для схемы управления на ток 0,25 А, зажим для заземления измерителя и отсек батарейного питания.

Диапазон измерения с нормированной погрешностью — от 10 до 1000 А.

Потребляемая мощность от сети переменного тока 220 В, 50 Гц — не более 20 В·А.

Перерыв до повторного включения — не менее 15 мин.

Время установления рабочего режима — 5 мин.

Габаритные размеры: 335 × 305 × 140 мм, масса 6,8 кг.

#### Подготовка и порядок работы

а) Подключить соединительные провода к измерителю согласно нанесенной маркировке. Если порядок значения тока КЗ заранее неизвестен, измерения следует начинать с ограничивающим резистором, для чего соединительный провод «фаза» подключают к зажиму «Фаза ч. огран.»

б) Подключить соединительные провода к объекту измерения, соблюдая маркировку. Перед началом измерений еще раз проверить надежность и правильность присоединения проводов к измерителю и объекту.

в) Нажать кнопку «ПТН» (питание). Высвечивание нулей на индикаторе свидетельствует о том, что измеритель исправен и готов к работе.

г) Нажать кнопку «ИЗМ» (измерение). Индикация гаснет, а затем высвечивается результат измерения.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Посвечивание индикаторов во время измерения в течение 5 с не отражается на результате измерения.

д) Если показания прибора при измерении с ограничивающим резистором превышают 535 А, то ориентировочное значение тока КЗ определяется по формуле:

$$I_{к1} = \frac{U_0}{\frac{U_0}{I_{изм}} - R_{огр}} = \frac{220}{\frac{220}{I_{изм}} - 0,3},$$

где  $I_{изм}$  — показания прибора.

Достоверность получаемых по этой формуле результатов тем выше, чем меньше индуктивность цепи фаза-ноль.

**ВНИМАНИЕ! Запрещается** производить измерения без ограничивающего резистора, если показания прибора при работе с введенным резистором превышают  $I_{изм} = 535$  А, что соответствует примерно току  $I_{к1} = 2000$  А реального КЗ. Превышение этого значения может привести к выходу прибора из строя вследствие повреждения шунта или тиристора.

е) если показания прибора с включенным резистором не превышают 535 А, то для получения более достоверного результата измерение следует повторить без ограничивающего резистора, отключив соединительный провод ФАЗА от зажима «ФАЗА ч. огран.» и подключив его к зажиму «ФАЗА». В этом режиме предел допускаемой погрешности измерений в диапазоне значений тока от 1000 до 2000 А не нормируется.

ж) Если во время измерения питающая сеть отключается из-за срабатывания защиты и при этом результат зафиксировать не удастся, то измерение необходимо повторить в следующем порядке:

- соблюдая полярность, установить в отсеке питания 6 элементов №316 «Уран»;
- включить сеть (автомат защиты);
- включить кнопку «ПТН» (питание);
- включить кнопку «ПМТ» (память), переведя измеритель в режим запоминания результата измерения;
- произвести измерение, нажав кнопку «ИЗМ»;

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

- повторно включить сеть, если отключение измерителя произошло вновь;
- отжать кнопку «ПМТ» и через 10—15 с снова нажать: на отсчетном устройстве должен высветиться результат предыдущего измерения;
- после окончания измерения отжать кнопку «ПМТ» для предотвращения разряда батарей.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** При отключении прибора от сети индикаторы не светятся.

#### Меры безопасности

При эксплуатации измерителя необходимо руководствоваться правилами безопасности при производстве работ в действующих электроустановках. Работа должна производиться не менее чем двумя лицами, одно из которых выполняет функции наблюдающего.

Электрическая схема прибора имеет защитное устройство, отключающее ее в случае обрыва цепи защитного зануления. Все элементы схемы заключены в кожух, предотвращающий возможность прикосновения к частям, находящимся под напряжением.

#### **3.4.6.2. Измерение тока однофазного КЗ прибором ЭК 0200 (Украина)**

##### Назначение прибора

Прибор предназначен для измерений тока КЗ в цепи фаза-нуль и напряжения прикосновения. В части, относящейся к измерению тока, аналогичен по устройству и принципу действия прибору Ш 41160.

##### Технические данные

Диапазон измерения тока, кА: 0—0,2; 0—1; 0—2.

Пределы допустимых значений основной приведенной погрешности, % от диапазона измерения,  $\pm 10$ ;

Время установления показаний — 4 с.

Электропитание:

а) блок короткозамыкателя — от сети переменного тока 220 В, 50 Гц;

б) блок измерения — от встроенного источника постоянного тока напряжением 10 — 15 В (10 элементов № 316 «Уран»).

Мощность, потребляемая блоком КЗ, не более.....80 В·А.

Сила тока, потребляемого блоком измерения,.....50 мА.

Масса измерителя с ЗИП.....10 кг.

Интервал между двумя последовательными измерениями тока КЗ, не менее.....20 с.

#### Подготовка и порядок работы

а) Измерения производятся двумя операторами, один из которых управляет блоком короткозамыкателя, а другой подключает блок измерения к объекту и считывает результаты измерений.

б) Соединить шнуром из комплекта выход «БИ» блока короткозамыкателя со входом «КА. V» и «-» блока измерения. Установить переключатели «Питание» блока БИ и «Память» блока КЗ в положение «ОТКЛ». Подключить соединительные провода к блоку короткозамыкателя и к цепи фаза-ноль, соблюдая маркировку.

в) Когда порядок значения ожидаемого тока КЗ заранее неизвестен, измерения необходимо начинать с ограничивающим резистором. Если при этом показания прибора превысят 535 А, то ориентировочное значение тока рассчитывают по формуле п. 4.3, д. В этом случае переходить к измерению без ограничивающего резистора нельзя, так как реальный ток превзойдет максимально допустимое значение и прибор может быть поврежден.

г) Последовательность операций при измерении аналогична принятой для прибора Щ41160.

#### **3.4.6.3. Приборы фирмы «SONEL» (Польша)**

**Общие сведения.** Фирма выпускает ряд типов и модификаций сертифицированных в РФ портативных цифровых приборов, позволяющих измерить сопротивление цепи фаза-ноль: MZC-200, MZC-300, MZC-303E, а также MIE-500, MRP-200, MZC-310S. Измерители MZC-200 и MRP-200 предназначены для использования в цепях, где значением индуктивного сопротивления  $X_{\text{ц}}$  можно пренебречь по сравнению с активным  $R_{\text{ц}}$  и принять последнее за полное сопротивление  $Z_{\text{ц}}$  цепи фаза-ноль:  $Z_{\text{ц}} \approx R_{\text{ц}}$ . При таком допущении погрешность прибора не выйдет за пределы допустимых значений, если угол фазного сдвига в цепи фаза-ноль не превышает  $18^\circ$ . В этом случае сопротивления этой цепи и ограничительное суммируются арифметически, а ожидаемый ток КЗ определяется в соответствии с формулой п. 2.3,д. Если при этом  $R_{\text{огр}}/Z_{\text{ц}} \leq 10$ , ошибка не превысит 5%. Такие приборы достаточно просты по устройству и сравнительно недороги — около \$ 400 (MZC — 200).

В мощных цепях с малым сопротивлением индуктивная составляющая может иметь существенное значение и пренебречь ею не-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

лзя. В этом случае используются измерители полного сопротивления MZC-300, а также MZC-303E, MZC-310S и MIE-500, однако эти последние являются многофункциональными и значительно более дорогими приборами.

#### Измеритель MZC-200

Прибор предназначен для измерения *активного* сопротивления цепи фаза- нуль в сети переменного тока 230/400 В, 45—55 Гц. Время протекания измерительного тока 10 мс. Прибор обеспечивает:

- автоматический расчет значения ожидаемого тока КЗ для номинального напряжения сети;
- возможность учета фактического сопротивления соединительных проводов при расчете;
- измерение действующего значения напряжения;
- автоматическое выключение при простое измерителя более 2 мин.;
- контроль исправности измерительной цепи;
- автоматический выбор диапазона измерений;
- память результата последнего измерения.

Основные технические данные:

- диапазон измерения сопротивления.....0,24—200 Ом;
- основная погрешность..... $\pm(2,5\% + 5 \text{ ед. мл. разр.})$ ;
- порог срабатывания блокировки измерений.....3 кОм;
- масса.....0,25 кг.

#### Измеритель MZC-300

В отличие от MZC-200, прибор позволяет измерить *полное* сопротивление цепи фаза-нуль. Сопротивление ограничительного резистора 10 Ом, время протекания измерительного тока 30 мс. При этих условиях не происходит срабатывания максимальной защиты и исключается влияние аperiodической составляющей, поскольку к концу первого периода (до 20 мс) переходный процесс практически заканчивается. Перед измерением осуществляется контроль целостности проводников током до 15 мА в течение 20 мс. Если сопротивление цепи оказывается меньше допустимого порогового значения, производится измерения большим измерительным током, если же оно выше, измерение блокируется и подается звуковой сигнал (зуммер).

Измеряется напряжение на гнездах прибора перед его включением и в процессе протекания измерительного тока. Далее, с учетом векторного характера напряжения и тока, процессор вычисляет полное сопротивление цепи фаза-нуль, его активную и индуктивную составляющие, а также фазный угол цепи. Измеритель обеспечивает:

- измерение активного, индуктивного и полного сопротивления цепи фаза-нуль;
- измерение угла между векторами тока и напряжения в момент КЗ;
- вычисление ожидаемого тока КЗ;
- контроль целостности нулевых защитных проводников;
- учет сопротивления соединительных проводов;

Основные технические данные:

- диапазон измерения сопротивления.....0,24—200 Ом;
- основная погрешность..... $\pm(2,5\% + 5 \text{ ед.мл.разр.})$ ;
- порог срабатывания блокировки измерений.....3 кОм;
- время до автоматического отключения при простое.....120 с;
- масса.....0,4 кг.

Достоверность показаний гарантируется только при использовании фирменных соединительных проводов, поставляемых с прибором. Прибор калибруется изготовителем исходя из сопротивления штатных проводов длиной 1,2 м. При переходе к проводам иной длины должна выполняться автокалибровка с помощью специального вспомогательного провода, использование которого для иных целей недопустимо. При замене элементов питания провода необходимо отсоединить.

Если в проверяемой цепи имеются выключатели дифференциального тока (УЗО), то на время измерения их следует зашунтировать.

#### 3.4.6.4. Многофункциональный тестер 6011А (Япония)

Одной из функций тестера является определение ожидаемого тока КЗ (PSC) в цепи фаза-нуль. При измерении применяется специальный комплект (мод.1733) из трех проводов черного, красного и зеленого цветов с наконечниками на одной стороне и общим разъемом на другой. Порядок работы следующий.

- 1) Выбрать диапазон 200, 2000 А или 20 кА.

2) Соединить объект проверки с зажимами ИЕС прибора проводками комплекта 1733.

3) Присоединить красный провод к фазе системы, черный к нейтрали, зеленый — к нулевому защитному проводнику.

4) Выполнить измерение.

5) Нажать кнопку проверки. Прозвучит сигнал и высветится значение тока.

6) Дождаться обнуления табло.

**Примечание.** На пределе 200 А, при сопротивлении меньше 5 Ом (ток больше ~50 А), получить точные показания невозможно. В этом случае следует перейти на пределы 2 или 20 кА.

Прибор автоматически отключается спустя примерно 10 мин. Питание включается вновь после установки поворотного переключателя в какое-либо рабочее положение.

При неисправности проверяемой цепи и наличии в ней переменного напряжения 50 В или выше загорается светодиодная индикация. Когда цепь измерения собрана правильно, излучают светодиоды РЕ и РN, если же Р и N перепутаны, загорается лампа реверса. Показания ЖК дисплея автоматически удерживаются в течение 5 с после измерения. Дисплей имеет 3,5 десятичных разряда с десятичной точкой и единицами размерности выбранных функций. При подсоединении проводов к проверяемой цепи дисплей показывает «V-PE Lo» или «V-PE Hi», если фазное напряжение оказывается менее 100 или более 260 В соответственно.

#### 3.4.6.5. Измеритель тока КЗ «Вектор» (Россия)

Измеритель представляет собой портативный прибор для определения тока КЗ в цепи фаза-нуль. Измерения производятся при небольших значениях тока (10—20 А) с последующей цифровой обработкой и индикацией значения тока в пределах 50—4000 А и угла сдвига между током и напряжением до 85°.

Использование малых небольших токов исключает возможность нежелательного срабатывания максимальной защиты работающих электроустановок и создания электромагнитных помех. Ограничение времени измерения несколькими периодами рабочего напряжения позволяет избежать влияния переходного процесса на результаты измерения и повысить их достоверность, а также отказаться от теплонагруженных элементов и уменьшить массу изделия.

#### 3.4.6.6. Прибор «Вымпел» (Россия)

Прибор представляет собой омметр, предназначенный для измерения малых комплексных сопротивлений (0,05—5 Ом) с целью определения ожидаемого тока КЗ в цепи фаза-ноль в обесточенных электроустановках. Прибор содержит автономный источник электропитания — генератор переменного тока частотой 50 Гц, как и в реальной сети. Результаты измерения в виде модуля полного комплексного сопротивления и угла сдвига фаз между током и напряжением выводятся на ЖК индикатор. На индикатор также выводится расчетное значение тока однофазного КЗ, приведенное к напряжению 220 В. Тестируемый ток от 50 до 150 мА, диапазон измеряемых углов сдвига фаз до 90°.

Изделие снабжено микроконтроллером, который управляет работой прибора и позволяет реализовать ряд функций:

- электронную калибровку и установку нуля;
- индикацию ожидаемого тока КЗ при напряжении 220 В;
- защиту и индикацию при случайном подключении к сети 220 В;
- индикацию обрыва цепи;
- индикацию состояния батарей;
- экономичный режим питания при отсутствии измерений;
- таймер автоматического отключения;
- подачу звукового сигнала при разряде батарей, обрыве цепи, наличии в цепи напряжения 220 В.

#### 3.4.6.7. Измеритель M12122 («ПАРМА»)

Обеспечивает измерение полного сопротивления цепи фаза-ноль в диапазоне 0—20 Ом и более с максимальным разрешением 0,01 Ом или предполагаемого тока КЗ в диапазоне от 0,06 до 20 кА. Существенной особенностью прибора является возможность производить измерения как при больших значениях испытательного тока, так и при малых (15 мА): первое позволяет обеспечить высокую точность, второе — не допустить срабатывания устройств защитного отключения при измерении в цепях, где такие устройства установлены. Возможно измерение сопротивления цепи фаза — фаза, фазного и линейного напряжения, частоты.



## **3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения (УЗО)**

### **3.5.1. Назначение и принцип действия устройств защитного отключения**

#### **3.5.1.1. Назначение**

*Защитное отключение* является одной из наиболее эффективных мер защиты от поражения электрическим током как в нормальном режиме работы электроустановки, так и при повреждении изоляции, пробое на корпус. В первом случае электропоражение может произойти при непосредственном, *прямом прикосновении* к открытым токоведущим частям электроустановки, во втором — также и при *косвенном прикосновении* к открытым или сторонним проводящим частям, на которых в нормальном режиме опасное напряжение отсутствует. В обоих случаях опасность электропоражения может быть устранена путем автоматического отключения питания электроустановки устройством, реагирующим на так наз. *дифференциальный ток*.

Согласно определению ПУЭ-7, защитное автоматическое отключение питания — это автоматическое размыкание цепи одного или нескольких фазных проводников (и, если требуется, нулевого рабочего проводника), выполняемое в целях электробезопасности (1.7.38). При этом должно обеспечиваться нормированное время отключения цепи защитно-коммутационным аппаратом, реагирующим на сверхтоки или на дифференциальный ток (1.7.78). Быстрое отключение питающего напряжения предотвращает не только поражение электрическим током людей и животных, но и возникновение возгораний и пожаров. В качестве защитных аппаратов, реагирующих на сверхтоки, служат автоматические выключатели и предохранители, на дифференциальный ток — специальные *устройства защитного отключения* дифференциального типа, обозначаемые УЗО-Д (далее — УЗО).

Максимальная защита от сверхтока в системе TN, получившей самое широкое распространение в распределительных сетях с глухозаземленной нейтралью напряжением 230/400 В, в ряде случаев оказывается недостаточно эффективной: при обрыве нулевого защитного проводника, малых токах замыкания на землю, при снижении уровня изоляции. УЗО служит дополнительной мерой электробезопасности при косвенном прикосновении, а при прямом

прикосновении является единственным техническим средством защиты от электротравматизма. Кроме того, УЗО способствует предотвращению возгораний и пожаров, которые могут возникнуть вследствие повреждений изоляции электропроводки и электрооборудования.

Первое устройство защитного отключения было запатентовано фирмой RWE (Австрия) в 1928 г. В дальнейшем создавались различного рода УЗО, отличающиеся видом входного сигнала (напряжение на корпусе, ток или напряжение нулевой последовательности и др.). Современные УЗО, рассматриваемые ниже, используют принцип дифференциальной токовой защиты, принятый для релейной защиты высоковольтных электроустановок. Первое действующее устройство такого типа изготовила и испытала в 1937 г. фирма Schutzapparategesellschaft. В середине 50-х годов началось массовое внедрение УЗО в Западной Европе, в 60—70-х гг. — в Японии, США и др. странах, результатом чего явилось резкое, на порядок, сокращение электротравматизма.

Принято международное название УЗО — *residual current protective device* (RCD), хотя в документах зарубежных фирм часто используются иные, национальные наименования. Слово «residual» переводится на русский язык как «разностный» или «остаточный». Правильным переводом понятия «residual current» является «разностный ток» (который к тому же точно соответствует принятому в отечественной терминологии определению «дифференциальный ток»), а названия в целом — защитное устройство по разностному (дифференциальному) току.

#### 3.5.1.2. Принцип действия и конструкция УЗО

Конструкцию абсолютного большинства УЗО можно представить в виде трех функциональных узлов:

- 1) датчик дифференциального тока;
- 2) пусковой орган;
- 3) исполнительный механизм и контактная группа.

*Датчик дифференциального тока* представляет собой трансформатор тока, с помощью которого осуществляется суммирование токов его первичной цепи. Сердечник трансформатора намагничивается током всех проводов, питающих нагрузку, включая и нейтральный провод. Эти провода в количестве от двух (в двухполюсном УЗО) до четырех (в четырехполюсном УЗО) составляют цепь первичной обмотки трансформатора тока. Суммарный маг-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

нитный поток в сердечнике трансформатора будет пропорционален векторной (т. е. с учетом фазного угла) сумме токов, протекающих в этих проводах. Следовательно, при отсутствии тока утечки магнитное поле в сердечнике также будет отсутствовать, так как в симметричной системе сумма токов равна нулю. При повреждении изоляции, прямом или косвенном прикосновении симметрия токов нарушается и в первичной цепи трансформатора появляется дифференциальный (разностный) ток, а в сердечнике — магнитное поле.

К сердечнику УЗО предъявляются высокие требования по качеству: большая чувствительность, линейность характеристики намагничивания, температурная и временная стабильность и др. Для повышения чувствительности на сердечнике размещают обмотки с небольшим количеством витков, которые включаются последовательно с токонесущими проводами.

Принцип работы датчика дифференциального тока поясняется рис. 3.62 применительно к двухполюсному УЗО. Фазный  $L$  и нулевой  $N$  провода, питающие рабочую нагрузку, пропущены сквозь окно кольцевого сердечника трансформатора. «Прямой»  $I_L$  и «обратный»  $I_N$  токи, протекающие по этим проводам, создают в сердечнике трансформатора магнитные потоки  $\Phi_L$  и  $\Phi_N$ , направленные встречно. В нормальном режиме работы сети они взаимно компенсируются, а при возникновении дифференциального тока разностный магнитный поток  $\Phi_\Delta$  наводит во вторичной обмотке

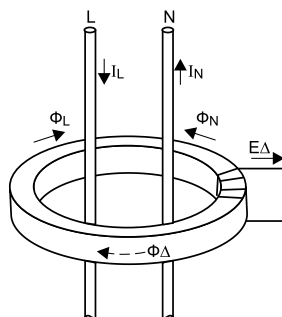


Рис. 3.62. К принципу работы датчика дифференциального тока:  $L$  и  $N$  — провода с токами  $I_L$  и  $I_N$ ;  $\Phi_L$ ,  $\Phi_N$  и  $\Phi$  — магнитные потоки;  $E$  — вторичная ЭДС трансформатора тока; стрелками показаны направления магнитных потоков в сердечнике

трансформатора ЭДС  $E_{\Delta}$ , которая является входным сигналом для порогового устройства.

*Пусковой орган* содержит поляризованное магнитоэлектрическое реле и защелку. В конструкции фирмы Сименс магнитный поток постоянного магнита замыкается через два сердечника из магнитомягкого материала и удерживает якорь реле, противодействуя усилию пружины. На одном из сердечников размещена обмотка возбуждения, соединенная с вторичной обмоткой дифференциального трансформатора. Ток в обмотке возбуждения создает магнитный поток, который в течение полуволны определенной полярности направлен встречно потоку постоянного магнита, удерживающему якорь. Когда значение дифференциального тока достигает установленного порога, действие пружины становится преобладающим, якорь отводится от поверхности полюсов и освобождает защелку, вызывая срабатывание *исполнительного механизма*. Исполнительный механизм воздействует на силовые контакты, которые размыкают цепь нагрузки и обесточивают защищаемую УЗО электроустановку.

Описанный принцип расцепления действует независимо от напряжения сети или наличия вспомогательного источника энергии, так как срабатывание УЗО происходит за счет энергии тока утечки на землю. Такие устройства, называемые *электромеханическими*, отличаются высокой надежностью благодаря минимальному числу элементов, простоте и точности исполнения, автономности действия. Вместе с тем выпускаются и так наз. *электронные УЗО*, содержащие усилитель выходного сигнала дифференциального трансформатора и/или иные электронные элементы, питающиеся от рабочей сети или от вспомогательного источника. Применение устройств этого типа требует решения проблем, которые могут возникнуть при повреждениях в цепи источника питания, наличии электромагнитных помех и др.

Помимо названных основных узлов, УЗО содержит еще цепь опробования (*тестирования*), служащую для периодического контроля этих узлов. Принцип действия ее состоит том, что искусственным путем создается несимметрия токов в первичной цепи дифференциального трансформатора, вызывающая появление дифференциального тока и срабатывание УЗО. С этой целью пропускают ток по одной из ветвей первичной обмотки трансформатора, как это показано, например, в схеме на рис. 2.63. Здесь при нажатии кнопки Т («Тест») в обмотке с проводом L возникает ток

$I_T$ , который создает в сердечнике трансформатора магнитный поток  $\Phi_T$  и вызывает в результате срабатывание пускового устройства УЗО. Значение тока ограничивается резистором  $R_T$ , но оно должно быть достаточным для надежного срабатывания УЗО при снижении напряжения сети. Некоторые фирмы принимают даже сопротивление  $R_T$  таким, чтобы при номинальном напряжении ток тестирования  $I_T$  был в 2,5 раза больше номинального дифференциального тока. Периодическое опробование УЗО нажатием кнопки «Тест» позволяет не только убедиться в работоспособности аппарата и отсутствии повреждений, но и повысить надежность функционирования его в дальнейшем, так как при срабатывании происходит самоочистление контактов, очистка от пыли и улучшение распределения смазки в подвижных частях.

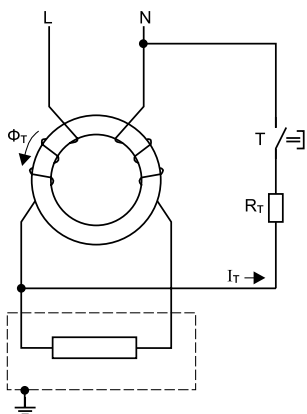


Рис. 3.63. Цепь тестирования УЗО

Конструктивно УЗО может содержать также расцепители максимального тока и выполнять функции защиты как от сверхтока, аналогично автоматическому выключателю, так и по дифференциальному току, действуя на одну и ту же контактную группу. Такой комбинированный аппарат называют иногда *автоматический выключатель дифференциального тока* (АВДТ), в отличие от УЗО без встроенной максимальной защиты (ВДТ).

#### 3.5.1.3. Работа УЗО в сети

На рис. 3.64 показана схема подключения двухполюсного УЗО к трехфазной сети. В любом режиме работы электроустановки ток в фазном проводе больше, чем в нулевом рабочем. В нормальном режиме эта разница незначительна, поскольку определяется только «фоновым» *током утечки* через неповрежденную изоляцию, и при правильном выборе УЗО значение дифференциального тока недостаточно для его срабатывания. В случае пробоя изоляции, прямого или косвенного прикосновения фазный ток увеличивается за счет *тока замыкания на землю* через место повреждения и через тело человека. Суммарный ток замыкания на землю восприни-

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

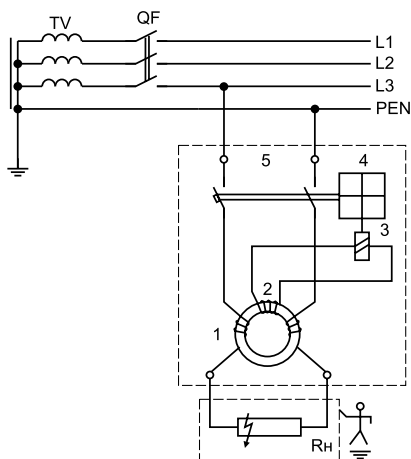


Рис. 3.64. Схема электроустановки с УЗО (цепь тестирования не изображена):  $T$  — силовой трансформатор;  $QF$  — автоматический выключатель;  $R_n$  — нагрузка. Состав УЗО: 1 — дифференциальный трансформатор с вторичной обмоткой 2; 3 — пусковой орган; 4 — исполнительный механизм; 5 — контактная система

мается УЗО как дифференциальный ток и, если его значение превышает уставку, УЗО сработает и отключит поврежденную электроустановку.

#### 3.5.2. Основные характеристики и выбор УЗО

##### 3.5.2.1. Основные технические характеристики

ГОСТ Р нормирует ряд параметров УЗО, из которых при наладке контролируют следующие.

1) *Номинальное напряжение*  $U_n$  — действующее значение напряжения, при котором обеспечивается работоспособность УЗО в заданных условиях эксплуатации.

2) *Номинальный ток нагрузки*  $I_n$  — значение тока, который УЗО может проводить в продолжительном режиме работы при заданной температуре окружающего воздуха. Продолжительный режим означает эксплуатацию в течение нескольких лет, контрольное значение температуры принимается равным  $30^\circ\text{C}$ . Для УЗО со встроенной защитой от сверхтока  $I_n$  — это еще и номинальный ток автоматического выключателя в составе АВДТ. Нормируются

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

значения номинального тока 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 63, 80, 100 и 125 А, а для УЗО со встроенной защитой дополнительно 6 и 10 А.

3) *Номинальный условный ток короткого замыкания*  $I_{nc}$  — ожидаемое значение тока КЗ, которое способно выдержать УЗО. Значения тока  $I_{nc}$  стандартизованы и равны 3; 4,5; 6 и 10 кА.

4) *Номинальный отключающий дифференциальный ток*  $I_{\Delta n}$  — значение дифференциального тока, который должен вызвать срабатывание УЗО при заданных условиях. Для сетей с глухозаземленной нейтралью наиболее употребительны стандартные значения тока  $I_{\Delta n} = 10; 30; 100; 300; 500$  мА, нормируются также 2, 6, 20, 1000 мА, а для селективных УЗО дополнительно 2 и 5 А.

В конкретной электроустановке уставку УЗО выбирают на основании следующих параметров: а) значения «фонового» тока утечки на землю; определяется путем непосредственного измерения или расчета; б) значения отключающего дифференциального тока; в) значения допустимого тока через человека; определяется по условиям электробезопасности.

5) *Номинальный неотключающий дифференциальный ток*  $I_{\Delta no}$  — значение дифференциального тока, которое не вызывает отключения УЗО при заданных условиях; принято  $I_{\Delta no} = 0,5 I_{\Delta n}$ . Фактическое значение синусоидального тока срабатывания УЗО должно находиться в пределах от  $I_{\Delta no}$  до  $I_{\Delta n}$ .

6) *Номинальное время отключения* — промежуток времени от момента возникновения дифференциального тока до полного гашения дуги. Стандартные значения времени отключения (с) УЗО общего типа в зависимости от дифференциального тока приведены ниже:

$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	500 А
0,3	0,15	0,04	0,04

Указанные значения являются максимально допустимыми, фактически же время отключения УЗО составляет несколько десятков миллисекунд.

7) *Уставка УЗО* — минимальное значение входного сигнала (дифференциального тока), вызывающего срабатывание УЗО.

К настоящему времени резко возросло количество электроустановок, содержащих схемы с полупроводниковыми вентилями и потребляющих ток несинусоидальной формы. К ним относятся, например, блоки питания телевизоров, компьютеров с преобразователями частоты и выпрямителями, стиральные и швейные ма-

шины, светильники с тиристорными регуляторами и т. п. Пульсирующий ток опаснее синусоидального, а постоянная составляющая тока ведет к насыщению дифференциального трансформатора и снижению чувствительности УЗО. С учетом характера нагрузки и, следовательно, формы тока утечки на землю и дифференциального тока, УЗО выполняются трех типов:

- АС — для сетей с синусоидальным током утечки;
- А — для сетей с синусоидальным и пульсирующим токами утечки;
- В — для сетей с синусоидальным, пульсирующим и сглаженным выпрямленным токами утечки.

При последовательном включении УЗО эти устройства должны отличаться не только по номинальному отключающему току, но и по времени срабатывания, т. е. обладать селективностью. *Селективные* УЗО имеют выдержку времени на срабатывание и маркируются знаком **S**. Если в сети возникают кратковременные броски тока, которые могут вызвать ложное срабатывание УЗО, применяют УЗО с небольшой выдержкой времени (обычно 10 мс), маркируемые знаком **G**.

Значение отключающего дифференциального тока УЗО (уставка  $I_{\text{дуст}}$ ), должно находиться в пределах:  $0,5 I_{\Delta\text{н}} < I_{\text{дуст}} < I_{\Delta\text{п}}$ . Схема ручной проверки исправности УЗО с помощью кнопки «Тест» должна сохранять работоспособность при напряжении сети от 0,85 до 1,1 номинального значения. Сопротивление изоляции электрических цепей УЗО должно быть не менее 10 МОм.

#### 3.5.2.2. Требования нормативных документов

Основными нормативными документами являются ПУЭ-7 и ГОСТ Р.

**Общие правила.** Для дополнительной защиты от прямого прикосновения следует применять УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА (1.7.50). Такие же УЗО применяются для защиты при косвенном прикосновении при первом замыкании на землю в системе IT (1.7.58). В системе TT применение УЗО для защиты при косвенном прикосновении обязательно. При этом должно быть соблюдено условие  $R_a I_a \leq 50 \text{ В}$ , где  $I_a$  — ток срабатывания защитного устройства,  $R_a$  — суммарное сопротивление заземлителя и заземляющего проводника, при применении УЗО для защиты нескольких электроприемников — заземляющего проводника наиболее удаленного из них (1.7.59).



Установка УЗО в четырехпроводных трехфазных сетях (система TN-C) Правилами не допускается. В случае применения УЗО для защиты отдельных электроприемников, питающихся от системы TN-C, защитный РЕ проводник электроприемника должен быть подключен к PEN проводнику питающей цепи до защитно-коммутационного аппарата (1.7.80). Практически это подключение выполняется на заземляющей шине.

**Переносные электроприемники.** Штепсельные розетки с номинальным током до 20 А наружной установки, а также внутренней установки, но к которым могут быть подключены переносные электроприемники, используемые вне зданий либо в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, должны быть защищены УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА (1.7.151).

УЗО розеточных цепей рекомендуется размещать в распределительных (групповых, квартирных) щитках. Допускается применять УЗО-розетки (1.7.153).

УЗО рекомендуется защищать групповые линии, питающие штепсельные розетки для переносных электрических приборов (7.1.71).

**Передвижные электроустановки.** В случае питания передвижной электроустановки от стационарного источника с применением защиты от сверхтока, дополнительно к последней применяется УЗО, реагирующее на дифференциальный ток (1.7.159).

В точке подключения к источнику питания должно быть установлено устройство защиты от сверхтоков и УЗО, номинальный отключающий дифференциальный ток которого на 1—2 ступени больше соответствующего тока УЗО на вводе в электроустановку (1.7.160).

**Электрическое освещение.** В случае применения напряжения до 220 В для питания светильников в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, при токе утечки до 30 мА должно быть предусмотрено защитное отключение.

Для установок наружного освещения в сетях TN-S и TN-C-S рекомендуется применение УЗО с током срабатывания до 30 мА (6.1.49).

Для линий, питающих установки световой рекламы, наружного освещения зданий, должна предусматриваться защита от сверхтоков и токов утечки (6.4.18).

**Электроустановки зданий.** Штепсельные розетки, устанавливаемые в ваннных комнатах квартир и гостиничных номеров, защищаются УЗО с уставкой не более 30 мА (7.1.48).

Если устройство защиты от сверхтока (автоматический выключатель или плавкий предохранитель) не обеспечивает отключение за 0,4 с при номинальном напряжении 220 В из-за низких значений тока КЗ и установка (квартира) не охвачена системой уравнивания потенциалов, установка УЗО является обязательной (7.1.72).

В зоне действия УЗО нулевой рабочий проводник не должен иметь соединений с заземленными элементами и нулевым защитным проводником (7.1.74).

Не допускается использовать УЗО в групповых линиях, не имеющих защиты от сверхтока, без дополнительного аппарата, обеспечивающего эту защиту. Необходима расчетная проверка таких УЗО в режимах сверхтока с учетом характеристик вышестоящего защитного аппарата (7.1.76).

При снижении напряжения до 50% номинального УЗО должно сохранять работоспособность на время не менее 5 с (7.1.77). Это положение относится по существу к электронным УЗО, поскольку электромеханические действуют независимо от напряжения.

Могут применяться УЗО как типа «А», так и типа «АС» (7.1.78).

В групповых сетях, питающих штепсельные розетки, следует применять УЗО с номинальным током срабатывания не более 0 мА. Допускается присоединение к одному УЗО нескольких групповых линий через отдельные автоматические выключатели или предохранители (7.1.79).

В жилых зданиях рекомендуется устанавливать УЗО на квартирных щитках, допускается установка их на этажных щитках (7.1.80).

Запрещается установка УЗО для электроприемников, отключение которых недопустимо для потребителя (1.7.81), так как может привести к опасным последствиям: созданию непосредственной угрозы для жизни людей, возникновению взрывов, пожаров и т. п.

Для групповых линий, питающих розеточные сети в помещениях с повышенной опасностью или особо опасных, обязательна установка УЗО с номинальным током срабатывания не более 30 мА (1.7.82). Для сантехкабин, ваннных и душевых рекомендуется устанавливать УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током до 10 мА, если на них выделена отдельная линия. В остальных случаях, например, при использовании одной линии

для сантехкабины, кухни и коридора, следует использовать УЗО с номинальным дифференциальным током до 30 мА (Свод правил СП-31-110-2003, п.А.4.15).

В нормальном режиме работы номинальный ток УЗО должен быть по крайней мере втрое больше суммарного тока утечки сети с учетом присоединенных стационарных и переносных электроприемников. При отсутствии данных ток утечки электроприемников следует принимать из расчета 0,4 мА на 1 А тока нагрузки, а ток утечки сети — 10 мкА на 1 м длины фазного проводника (7.1.83).

Для повышения уровня защиты от возгорания при замыканиях на землю, когда значение тока недостаточно для срабатывания максимальной токовой защиты, на вводе в квартиру, индивидуальный дом и т. п. рекомендуется устанавливать УЗО с током срабатывания до 300 мА (7.1.84).

При выполнении требований п. 7.1.83 функции УЗО могут выполняться одним аппаратом с током срабатывания до 30 мА (7.1.85). УЗО, защищающее от возгорания, должно отключать как фазный, так и нулевой рабочие проводники, защита от сверхтока в нулевом рабочем проводнике не требуется.

Для многоквартирных домов рекомендуется предусматривать УЗО с номинальным дифференциальным током до 30 мА для групповых линий, питающих штепсельные розетки внутри дома, включая подвалы, встроенные и пристроенные гаражи, а также в групповых сетях, питающих ванные комнаты, душевые и сауны. Для устанавливаемых снаружи штепсельных розеток установка УЗО с номинальным током до 30 мА обязательна (СП 31-110-2003, п.А.5.4).

**Электроустановки помещений для содержания животных.** ПУЭ-7 предъявляют повышенные требования к обеспечению электробезопасности в таких помещениях. Это объясняется как неблагоприятными условиями в них (проводящие полы, агрессивная среда, влажность и др.), так и большей чувствительностью животных к действию электрического тока. Здесь применяются системы заземления TN—C—S или TN—S. Время защитного автоматического отключения питания в помещениях для содержания животных, а также в помещениях, связанных с ними при помощи сторонних проводящих частей, должно быть не более 0,05 с при линейном напряжении 380 В (1.7.171).

Для всех групповых цепей, питающих штепсельные розетки, должна быть выполнена защита от прямого прикосновения при помощи УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не более 30 мА (1.7.176).

В помещениях, где не требуется уравнивания потенциалов, должна быть выполнена защита при помощи УЗО с номинальным отключающим дифференциальным током не менее 100 мА, устанавливаемых на вводном щитке (7.1.177).

#### 3.5.3. Применение УЗО в системе заземления TN

##### 3.5.3.1. Работа УЗО совместно с другими устройствами

С целью защиты УЗО от сверхтоков последовательно с ним устанавливается защитное устройство, как правило, автоматический выключатель. Его номинальный ток должен быть равным номинальному току нагрузки УЗО или на ступень (из ряда стандартных значений номинального тока нагрузки УЗО) ниже. Интеграл Джоуля и максимальный пропускаемый ток КЗ этого автомата не должны превосходить значений, указанных изготовителем для УЗО.

В радиальных схемах электроснабжения возникает необходимость обеспечить селективную работу нескольких УЗО. При близких уставках соседних ступеней защиты выполнить это условие сложно из-за высокого быстродействия УЗО. В этих случаях применяют модификации УЗО (индексы S и G) с выдержкой времени на срабатывание от 0,50 с и меньше. Для сравнения на рис. 3.65 показаны время-токовые характеристики УЗО общего типа и с выдержкой времени. Здесь видно, что время отключения УЗО типа S с номинальным отключающим дифференциальным током 300 мА колеблется в пределах 40...150 мс, а УЗО общего типа на ток 30 мА — от 40 до 6 мс.

Разностный ток возникает с появлением утечки на землю и в идеальном случае должен быть равен нулю. Практически в неповрежденной электрической цепи разностный ток составляет обычно несколько миллиампер. Он может возникать по следующим причинам:

- 1) Металлический контакт между токоведущими частями и проводящими частями электроустановки, связанными с землей.
- 2) Перекрытие изоляции вследствие перенапряжения.
- 3) Утечка по поверхности изоляции.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

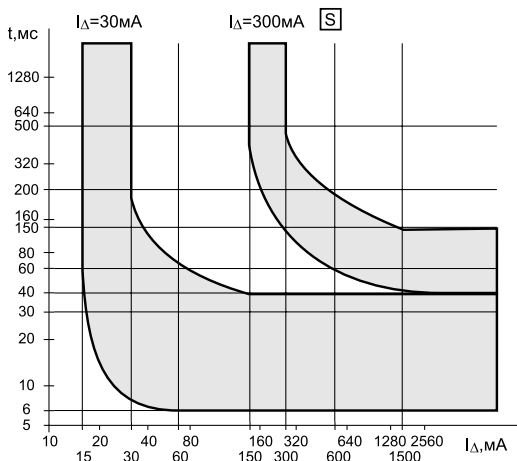


Рис. 3.65. Время-токовые характеристики УЗО без выдержки времени и с выдержкой времени типа S

Большая часть электроустановок в нашей стране работает с системами заземления типа TN-C, TN-S и TN-C-S.

Главное преимущество системы TN-S состоит в том, что при обрыве нулевого рабочего проводника N напряжение прикосновения мало и определяется лишь падением напряжения на проводнике PE. Этот режим обеспечивает благоприятные условия электробезопасности как для эксплуатации электроустановок, так и для функционирования УЗО. В случае применения УЗО в системе TN-C-S проводник PEN не должен использоваться на стороне нагрузки. Присоединение защитного проводника к PEN должно осуществляться на стороне источника питания по отношению к УЗО. При этом допустимо использование УЗО в тех частях здания, где электрические цепи с PEN-проводниками расположены до входных выводов УЗО. При наладке необходимо убедиться в том, что в зоне защиты УЗО нулевой рабочий и защитный проводники четко разделены и нулевой рабочий проводник не имеет электрического контакта с заземленными элементами электроустановки.

На рис. 3.66 приведены примеры электроснабжения здания (рис. 3.66,а) и отдельной квартиры (рис. 3.66,б) в системах TN-S и TN-C-S соответственно.

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

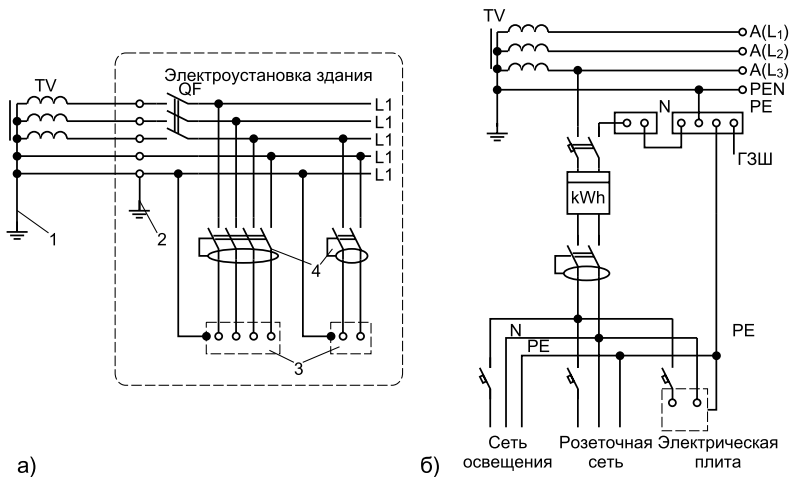


Рис. 3.66. Применение УЗО в системе заземления TN: а) схема электроснабжения здания, система TN-S; б) схема электроснабжения квартиры, система TN-CS; 1 – заземление источника питания; 2 – защитное заземление электроустановки здания; 3 – открытые проводящие части; 4 – аппаратура УЗО

Основные технические данные УЗО, применяемых при монтаже электрооборудования объектов жилищного строительства, указаны в табл. 3.20.

Таблица 3.20

Технические характеристики УЗО для жилищных объектов

Технические требования	Этажные и квартирные щитки	
	ввод	линии
Максимальный коммутируемый ток, кА	1,5; 3; 6; 10	1,5; 3
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА	30; 100; 300	10; 30
Номинальный ток, А	(10), 16, 25, 32, 40, 63	
Время срабатывания, мс	До 100	

#### 3.5.4. Типы и параметры УЗО

##### 3.5.4.1. Аппараты отечественного производства

1) Устройство «АСТРО\*УЗО» (Москва, МЭИ). Одним из первых появилось на российском рынке и приобрело промышленное значение в середине 90-х годов. Опытным заводом МЭИ выпускаются более 50 модификаций устройства (2005 год) на основе конструкций германской фирмы Сименс. АСТРО\*УЗО имеет электромеханический расцепитель, однофазное и трехфазное исполнения (рис. 3.67). Номинальный ток — от 16 до 63 А, номинальное значение уставки срабатывания по дифференциальному току 10 или 30 мА, время срабатывания — до 40 мс.

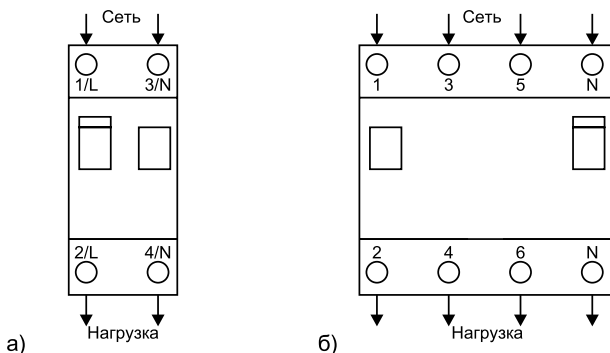


Рис. 3.67. Схемы подключения АСТРО\*УЗО: а) однофазная сеть 220 В (модификации 1111, 2211, 3211, 4211, 3311); б) трехфазная сеть 380 В (модификации 3212, 3312, 4212, 4312)

Например, УЗО серии Ф-2212, предназначенное для работы в трехфазной сети и относящееся к устройствам типа А, размыкает четыре линии проводников в случае возникновения тока утечки более 15...30 мА. Время отключения не превышает 30 мс. Допускаемое напряжение сети 380 В, если номинальный ток не превышает 25 А. Номинальный условный ток КЗ составляет 10 кА.

2) УЗО серии ВАД11 (ОАО «ЧЭАЗ», г. Чебоксары). Представляет собой автоматический дифференциальный выключатель. Отключение устройства моментное как при автоматическом расцеплении, так и вручную, воздействием на рукоятку или кнопку. Устройство снабжено вспомогательным источником питания, при отказе которого оно не способно автоматически отключиться.

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

---

Технические данные

Число полюсов.....	2
Номинальный ток расцепителей, А.....	от 6 до 40
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА.....	от 10 до 100
Диапазон токов мгновенного расцепления, типы характеристик...А, В и С	
Время отключения, мс, при кратности дифференциального тока (по отношению к номинальному отключающему)	
1 и 2.....	100
5.....	40

3) Устройство серии УЗО-щит М-2 (ОАО «Электроконтактор», г. Владикавказ). Состоит из двух конструктивно сопрягаемых частей:

автоматического выключателя типа ВА24-29, содержащего в фазном полюсе защиту от перегрузки по току и от КЗ, и модуля защитного отключения по дифференциальному току. Функционально зависит от напряжения сети 220В частотой 50 Гц.

Технические данные

Номинальный ток, А.....	от 6,3 до 63
Номинальный дифференциальный отключающий ток, мА.....	10 и 30
Время срабатывания от действия номинального отключающего дифференциального тока, мс, не более.....	100
Потребляемая мощность, Вт, не более.....	20
Тип защитной характеристики по току мгновенного расцепления.....	С

4) Устройство серии УЗО-Д40 (ОАО «Электроаппарат», г. Курск).

Устройство, реагирующее на дифференциальный ток, предназначено для применения в сетях с глухозаземленной нейтралью. Сохраняет работоспособность при любых колебаниях и даже отсутствии напряжения в сети, например, при обрыве нулевого проводника. Устройство включается последовательно с защитным аппаратом в цепи фазы, желательного типа ВМ40. Схема подключения аппарата в сети TN-C-S показана на рис. 3.68.

Технические данные

Номинальный ток нагрузки, А.....	от 16 до 40
----------------------------------	-------------



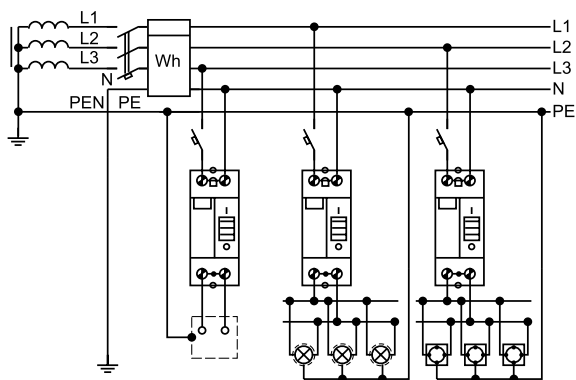


Рис. 3.68. Схема подключения устройства УЗО-Д40 в сети TN-C-S

Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА.....	10 и 30
Время отключения при номинальном отключающем дифференциальном токе, мс, не более.....	40
Сопротивление изоляции устройства, МОм, не менее.....	20

5) Устройство серии УЗО-Д-30 (ОАО «Краснодарский ЗИП»). Осуществляет защиту по дифференциальному току, от КЗ и перегрузок без вспомогательного источника питания. Сохраняет работоспособность при любых колебаниях и даже отсутствии напряжения сети, например, при обрыве нулевого или фазного провода; имеется индикация срабатывания.

Технические данные	
Номинальный ток нагрузки $I_n$ , А.....	25; 31,5
Номинальный отключающий дифференциальный ток, мА.....	30
Токи срабатывания/несрабатывания теплового расцепителя.....	$1,5I_n / 1,05I_n$
Токи срабатывания/несрабатывания электромагнитного расцепителя.....	$10I_n / 2,5I_n$
Максимальное время отключения, с, при отключающем токе 30 мА.....	0,5
Время срабатывания от токов КЗ, с.....	0,1

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

6) Устройство серии УЗО-М304 (совместное производство РФ — Бельгия, ОАО «Московский завод электроизмерительных приборов»). Электромеханическое устройство, не имеющее собственного потребления энергии, выпускается в двух- и четырехполюсном исполнении.

Технические данные

Номинальный ток нагрузки, А.....16; 25; 40; 63  
Номинальный отключающий дифференциальный ток  
(в зависимости от исполнения), мА.....10; 30; 300  
Сопротивление изоляции, МОм, между полюсом и другими  
полюсами, соединенными вместе, не менее.....2

Максимально допустимое время отключения (с) при заданной кратности дифференциального тока не должно превышать указанных ниже значений:

$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	500 А
0,3	0,15	0,04	0,04

7) Устройство серии УЗО20-ВАД (Концерн «Энергомера», г. Ставрополь). Предназначено для защиты по дифференциальному току, от перегрузок и КЗ. Работоспособность гарантируется при напряжении сети от 176 до 242 В. Свечение индикатора на лицевой стороне устройства свидетельствует о наличии напряжения в питающей сети при замкнутых главных контактах аппарата. Уменьшение напряжения ниже предельного значения 110 В приводит к невозможности срабатывания устройства от дифференциального тока, а повышение сверх 264 В — к возможности самопроизвольного срабатывания. Функционирование устройства в части защиты от сверхтоков не зависит от напряжения питающей сети. Устройство может иметь встроенную температурную защиту и дистанционное отключение.

Технические данные

Номинальный ток нагрузки  $I_n$ , А.....от 10 до 63  
Номинальный отключающий  
дифференциальный ток, мА.....10; 30; 100  
Наибольшее время отключения  
при токе  $1,45I_n$ , с.....3600  
Наибольшее время отключения  
при токе  $10I_n$ .....0,1  
Число полюсов.....2

Дифференциальные автоматические выключатели серии УЗО-ВАД2 предназначены для работы в однофазных и трехфазных цепях. Номинальный ток нагрузки — от 10 до 63 А, номинальный отключающий дифференциальный ток — от 10 до 500 мА, число фаз — одна или три. Выпускаются исполнения со срабатыванием без выдержки времени (общего применения) и с задержкой по времени (селективные, типа S). Имеется встроенная защита от повышения напряжения в сети (до 264 В) и импульсных перенапряжений (до 6 кВ). Предусмотрена световая индикация наличия напряжения в защищаемой цепи.

8) Выключатель серии ВКЗ (ЗАО «ТЕСС-Инжиниринг», г. Чебоксары). Это — автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтоков и перенапряжений. Конструктивное исполнение выключателя соответствует Евростандарту. На лицевой стороне прибора имеется светодиодная индикация наличия напряжения на выходных зажимах.

ВКЗ состоит из трех основных узлов: автоматического выключателя типа ВА24-29 или ВА66-29, электронного блока и трансформаторного датчика дифференциального тока. Зажимы N1, L1, L3 и L5 служат для присоединения к ним проводов питающей сети, N2, L2, L4 L6 — для присоединения нагрузочных проводов, зажим Т — для присоединения заземляющего провода. Конструкция аппарата обеспечивает замыкание контакта N раньше основных контактов, а размыкание — позже.

ВКЗ предназначен для использования в сети 380/220 В с заземленной нейтралью. Основной вид защиты — отключение токов перегрузки и КЗ, что позволяет снизить вероятность возгорания электроустановки. Кроме того, ВКЗ имеют исполнения по дополнительным защитам:

- 1 — обеспечивает защиту от токов перегрузки и утечки на землю;
- 2 — добавляет к исполнению 1 защиту от напряжения между зануленными корпусами электроприемников и землей;
- 3 — добавляет к исполнению 1 защиту от повышенного напряжения сети (для двухполюсного исполнения) и от асимметрии (для четырехполюсного исполнения);
- 4 — обеспечивает защиту от всех перечисленных факторов.

Отключающая асимметрия фазных напряжений оценивается коэффициентом  $A_{\text{отк}} = 1 - U_{\text{отк}}/220$ , где  $U_{\text{отк}}$  — фазное напряжение, при котором происходит отключение ВКЗ 4 в несимметричном режиме питающей сети;  $A_{\text{отк}} = 0,2...0,8$  в зависимости от составляющей напряжения нулевой последовательности.

ВКЗ 1, осуществляя защиту от токов утечки, позволяет снизить вероятность электропоражения людей, а также возгорания электрооборудования при повреждении изоляции. Если на корпуса электроприборов заносится по защитным проводникам напряжение с аварийных смежных электроустановок, то защиту в этом случае способны осуществить только исполнения 2 и 4. ВКЗ исполнения 2 рекомендуется применять в электроустановках, у которых открытые проводящие части (корпуса) электроприемников могут вследствие неисправности оказаться под напряжением относительно земли и заземленных металлоконструкций. К ним относятся электроустановки, получающие питание от TN-C и TN-C-S сетей и не имеющие системы уравнивания потенциалов. ВКЗ исполнения 3 рекомендуется применять при наличии в защищаемой зоне дорогостоящей бытовой техники, чтобы предотвратить выход ее из строя при бросках напряжения. Время срабатывания ВКЗ в этом случае составит не более 20 с при напряжении до 260 В и не более 2 с при напряжении до 290 В. Такая зависимость снижает вероятность отключения электроустановок при кратковременных перенапряжениях различного происхождения. Примеры схем присоединения ВКЗ различных исполнений к сети с глухозаземленной нейтралью приведены на рис. 3.69 и рис. 3.70.

В варианте рис. 3.69 следует применять исполнение 3 по отключающему дифференциальному току и исполнение 1 по времени отключения. Поскольку здесь потенциал PEN проводника заносится на все открытые проводящие части, применение системы уравнивания потенциалов обязательно. При ее отсутствии рекомендуется применять исполнение 2.

Вспомогательное заземление в схеме рис. 3.70 выполняется изолированным проводом; сопротивление его допускается до 120 Ом.

9) УЗО фирмы «ДЭК» (Российская инженерная корпорация «Дальэлектрокомплект», г. Владивосток). Имеют двух- и четырехполюсное исполнение. Номинальный ток нагрузки — от 16 до 100 А, номинальный отключающий дифференциальный ток — 10, 30, 100 и 300 мА.

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

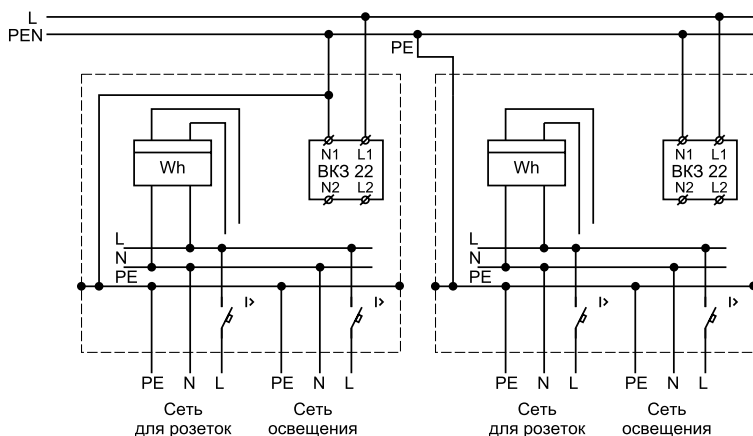


Рис. 3.69. Схема присоединения ВКЗ 22 в распределительном устройстве к двухпроводной сети TN-C и TN-C-S

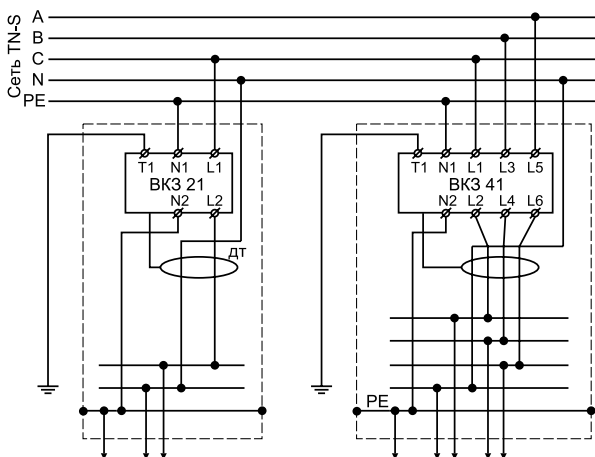


Рис. 3.70. Схема присоединения ВКЗ к сети TN-S (или к сети TN-C-S на пятипроводном участке) со вспомогательным заземлением

10) Дифференциальные автоматические выключатели фирмы «Сигнал» (ОАО «Ставропольский завод «Сигнал»). Выключатели УЗО-22 и УЗО-22Е предназначены для работы в однофазных электрических цепях. Подключение дополнительного заземляющего

проводника позволяет сохранить работоспособность при обрыве нулевого проводника со стороны источника электропитания. Номинальный ток нагрузки — 10...63 А, номинальный отключающий дифференциальный ток — 10...300 мА.

11) УЗО фирмы «Интерэлектрокомплект» («ИЭК»). Выпускаются УЗО серии ВД1-63 (дифференциальные автоматические выключатели без встроенной защиты от сверхтока), номинальный ток нагрузки от 16 до 100 А, номинальный отключающий дифференциальный ток — от 10 до 300 мА. Для защиты от сверхтоков необходимо последовательно ввести автоматический выключатель типа ВА47-29 или ВА47-100 с номинальным током, меньшим или равным номинальному току нагрузки защищаемого аппарата.

Дифференциальные автоматические выключатели серий АД-12 и АД-14 состоят из двух жестко соединенных функциональных узлов: двух- или четырехполюсного автоматического выключателя и модуля дифференциальной защиты. Устройства обеспечивают комплексную защиту от токов утечки на землю, сверхтоков и перенапряжений сети свыше 265 В. Номинальный ток нагрузки — от 6 до 63 А, номинальный отключающий дифференциальный ток от 10 до 300 мА.

#### 3.5.4.2. УЗО зарубежного производства

1) Фирма «АВВ». Выпускает как УЗО, реагирующие только на дифференциальный ток, так и дифференциальные автоматические выключатели. Последние могут быть дополнены вспомогательными устройствами, как то: дополнительные и сигнальные контакты, размыкатели минимального напряжения, механические блокирующие устройства и др.

УЗО серии F 360 предназначены для работы в цепях синусоидального напряжения (тип АС, или ELETTROSTOP), серии F 370 — в цепях синусоидального и пульсирующего токов (тип А, или VARISTOP). У аппаратов этих серий номинальный ток нагрузки 16...80 А, номинальный отключающий дифференциальный ток 10, 30 и 300 мА. Аналогичные серии F 660 и F 670 рассчитаны на ток до 125А. УЗО серии F390 — селективное, номинальный ток 16...100 А, отключающий дифференциальный ток 300 и 500 мА.

Дифференциальное реле RD1 управляет защитным автоматическим выключателем в цепи нагрузки. Уставки по отключающему дифференциальному току и времени срабатывания регулируются с

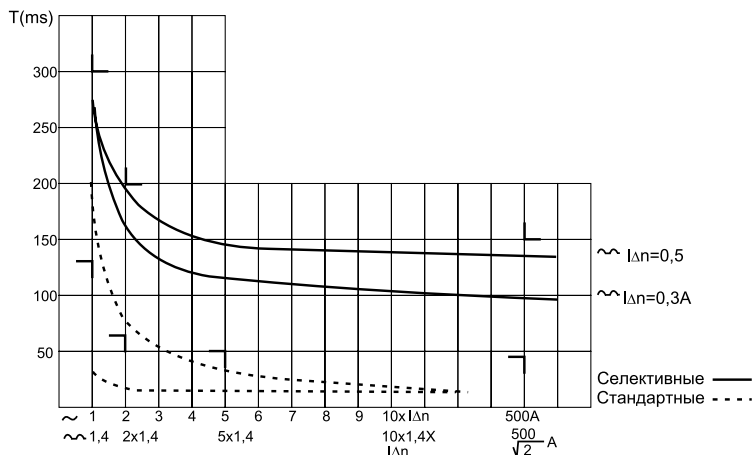
### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

помощью переключателя: ток в пределах 0,03...2,0 А, время — 0,02...5,0 с.

Дифференциальные автоматические выключатели серий DS 641 и DS 651 функционально состоят из устройства защитного отключения и автоматического выключателя с защитой от перегрузки и КЗ. Характеристики отключения максимальной защиты — типов В и С. По виду рабочего напряжения эти устройства относятся к типу АС (только синусоидальное напряжение) и выпускаются в двухполюсном исполнении (один полюс и нейтраль). Номинальный ток нагрузки от 4 до 32 А, номинальный отключающий дифференциальный ток — 10, 30 и 300 мА, минимальное рабочее напряжение 110 В.

Дифференциальные автоматические выключатели серий DS 652, DS 653 и DS 654 выпускаются в двух-, трех- и четырехполюсном исполнении с

Время-токовые характеристики срабатывания выключателей типа АС-А приведены на рис. 3.71.



*Рис. 3.71. Время-токовые характеристики дифференциальных выключателей фирмы АВВ; символы [ и ] указывают верхние пределы значений времени отключения характеристической отключения типа С или В, номинальный ток от 0,5 до 63 А, номинальный отключающий дифференциальный ток 10, 30 и 300 мА, минимальное рабочее напряжение 110 В*

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

Внутреннее сопротивление полюса выключателя серии DS — порядка 50 мОм при номинальном токе 6 А и 2 мОм при номинальном токе выключателя 63 А.

2) Устройства фирмы «Legrand» («Легран»). Фирма выпускает как собственно УЗО, так и дифференциальные автоматические выключатели типов А и С, для селективных цепей — АС-S и А-S. Ко всем УЗО можно подключить дополнительные устройства. Характеристики срабатывания показаны на рис. 3.72.

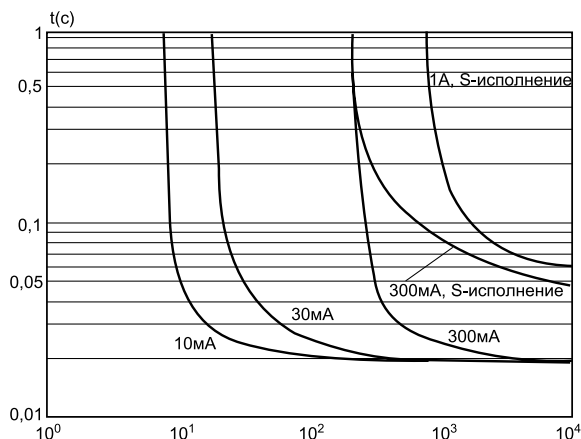


Рис. 3.72. Характеристики срабатывания УЗО фирмы «Legrand»

УЗО серии DX на номинальный отключающий дифференциальный ток 10, 30, 100, 300 и 500 мА предназначены для работы в цепях типов А и АС, ряд их имеет селективное исполнение; номинальный ток от 16 до 80 А.

Дифференциальные автоматические выключатели серии DX выпускаются в виде однополюсных с нейтралью, двухполюсных и четырехполюсных устройств. По виду рабочего тока они относятся к типу АС, характеристика отключения — типа С. Номинальный отключающий дифференциальный ток 10, 30 и 300 мА, номинальный ток нагрузки — от 3 до 63 А. Активное сопротивление полюса дифференциального автоматического выключателя с номинальным током 63 А — около 1,5 мОм.



Выпускается также устройство оригинального типа Нр1 с высокой помехозащищенностью, исключающей возможность ложного срабатывания при возникновении бросков тока утечки.

3) Фирма «Siemens» (Сименс). Выпускает устройства защитного отключения универсальные ( $>N<$ ), селективные и с кратковременной выдержкой, дополнительные блоки УЗО к автоматическим выключателям, устройства защитного отключения с встроенной защитой от сверхтока, розетки со встроенным УЗО. Работа УЗО основана на электромеханическом принципе. Минимальное рабочее напряжение для тестирования — 100 В. Для УЗО, реагирующих на сглаженный выпрямленный (постоянный) ток, стандартная конструкция дополняется вторым суммирующим трансформатором и электронным блоком. Электронный блок питается посредством всех трех фазных проводов и нулевого рабочего провода и сохраняет работоспособность при понижении напряжения до 70% (например, между фазным и нулевым рабочим проводами), а также при обрыве нулевого провода. Даже в случае серьезной аварии, когда (что, впрочем, маловероятно), обрываются нулевой и два фазных провода, надежное отключение осуществляется той частью устройства, которая реагирует на синусоидальный и пульсирующий ток, независимо от напряжения сети.

Чтобы добиться селективности при последовательном включении УЗО, эти устройства должны различаться как по выдержке времени срабатывания, так и по номинальному отключающему дифференциальному току. Селективные УЗО снабжены маркировкой S, УЗО с кратковременной задержкой — маркировкой K. Последние применяются в случаях, когда возникают большие броски импульсного тока (например, при включении конденсаторов) и обычные УЗО срабатывают без выдержки времени.

Устройства защитного отключения  $>N<$  5SM1 выпускаются в двух- и четырехполюсном исполнении, на токи от 16 до 80 А. Предназначены для переменных и пульсирующих дифференциальных токов 10, 30, 100, 300 и 500 мА, селективные (S) — 300 и 1000 мА, с кратковременной выдержкой (K) — 30 и 100 мА.

УЗО специального назначения  $>N<$  5SZ трехполюсные, ток 25 и 40 А, дифференциальный ток 30 и 500 мА. На основе упрощенной конструкции, не содержащей механизма отключения, производится измеритель дифференциальных токов 5SZ9 300. Посредством вольтметра с внутренним сопротивлением не менее 1 МОм/В измеряют напряжение на вторичной обмотке дифференциального

трансформатора и по прилагаемой тарифовочной кривой определяют значение дифференциального тока. Диапазон измерения напряжения переменного тока 1мВ...2 В. Для электроустановок, где наряду с переменными и пульсирующими токами могут возникать также сглаженные (постоянные) токи (например, в 6-пульсных выпрямительных схемах), предназначены устройства >N< 5SZ с двумя сердечниками и электронным усилителем; ток нагрузки 25...63 А, номинальный дифференциальный ток 30 и 300 мА.

Устройства защитного отключения с встроенной защитой от сверхтока >N< 5SU реагируют на переменные и пульсирующие дифференциальные токи с номинальными значениями 10, 30 и 300 мА. Выпускаются в двух- и четырехполюсном исполнении на номинальные токи нагрузки 6...32 А, типы мгновенного срабатывания В и С.

Устройства защитного отключения 5SZ и 5SV6 для переменных и пульсирующих токов рассчитаны на повышенные значения тока нагрузки от 125 до 224 А и значения номинального дифференциального тока 30, 300, 500 и 1000 мА, четырехполюсные.

УЗО серии 5SZ — четырехполюсные, на ток 125 А, номинальный дифференциальный ток 30, 300 и 500 мА (общего типа), 500 и 1000 мА — селективные.

Выпускаются также розетки с встроенным УЗО типа 5SZ9 для наружной и скрытой проводки.

4) Фирма «Schneider Electric» («Шнейдер Электрик»), торговая марка «Merlin Gerin». Дифференциальный автоматический выключатель-моноблок DPN N Vigi позволяет реализовать:

- защиту цепей от КЗ, перегрузок и повреждений изоляции;
- защиту людей от поражения электрическим током при прямом (30 мА) или косвенном (300 мА) прикосновении к токоведущим частям ;
- защиту электроустановки от возгорания (300 мА);
- селективность защит при каскадном соединении аппаратов на токи утечки 30 и 300 мА.

Номинальный ток выключателей — в диапазоне 6...40 А, ток утечки (номинальный дифференциальный ток) 30 и 300 мА, количество полюсов 1 + N.

Дифференциальный выключатель нагрузки ID мгновенного действия позволяет отключать цепь вручную и автоматически, в случае повреждения изоляции между фазой и землей, когда ток

утечки больше или равен 10, 30, 300, 500 мА; номинальный ток от 25 до 100 А; количество полюсов  $1 + N$ . Применяется в распределительных сетях административных и промышленных зданий. Не реагирует на кратковременные, неустойчивые, случайные перенапряжения (пробой из-за пыли, коммутационные перенапряжения, грозовые разряды и т. д.).

Дифференциальный выключатель ID селективный позволяет выполнить селективную защиту отходящих линий на 10 или 30 мА; номинальный ток нагрузки от 25 до 100 А; количество полюсов  $3 + N$ ; нечувствителен к кратковременным перенапряжениям.

Выключатели ID могут быть снабжены вспомогательными устройствами, обеспечивающими отключение или сигнализацию состояния аппарата, как то: блок-контакты OFS и SD, расцепитель минимального напряжения MN, независимый расцепитель MX, блок-контакт состояния OF. Функция  $MX + OF$  — отключение выключателя при подаче напряжения на катушку расцепителя и сигнализация состояния «Вкл» и «Откл». Устройство MN отключает выключатель при падении напряжения в сети до 35—70% и блокирует его включение до восстановления номинального значения напряжения. Применяется для дистанционного отключения ID кнопкой, предотвращает неконтролируемый пуск двигателя после восстановления напряжения и запрещает отключение выключателя при кратковременных посадках напряжения длительностью менее 0,5 с. Вспомогательные блок-контакты OFS и OF позволяют осуществить сигнализацию или управление состоянием «Вкл» или «Откл» аппарата. Блок-контакт SD позволяет осуществлять сигнализацию или управление в связи с аварийным отключением.

Дифференциальные модули Vigi С60 осуществляют мгновенную дифференциальную защиту. Дополняют двух-, трех- и четырехполюсные автоматические выключатели С60 и изготавливаются в двух исполнениях: до 25 А и до 63 А. Чувствительность мгновенного дифференциального расцепителя 30 и 300 мА для всех номинальных токов нагрузки.

#### 3.5.5. Проверка и испытания УЗО

##### 3.5.5.1. Объем проверки

**Требования нормативных документов.** ПУЭ-7 непосредственно не регламентируют объем проверки УЗО: «Устройства защитного отключения (УЗО), выключатели дифференциального тока (ВДТ)

проверяются в соответствии с указаниями завода — изготовителя» (1.8.37.5).

ПТЭЭП требуют только проверки УЗО «путем нажатия на кнопку «Тест» (тест) включенного в сеть устройства» (Приложение 1, п. 28.7).

«Руководящие материалы по сертификации электроустановок зданий» предписывают производить проверку «работоспособности при превышении нормированных уставок токов утечки УЗО ... Пределы работоспособности должны соответствовать данным завода — изготовителя». При этом методика испытаний должна учитывать требования проектной документации и документации завода — изготовителя и предусматривать проверку аппарата использованием кнопки «Тест» (Приложение 6, п. 6).

Отдельные методы инструментальной проверки работы УЗО рекомендует ГОСТ Р 50571.16—99 «Электроустановки зданий. Приемосдаточные испытания», Приложение В.

На практике проверка УЗО производится в соответствии с положениями названных документов, сложившимся опытом наладочных организаций, разработчиков и изготовителей аппаратуры (например, АСТРО\*) и с учетом требований региональных надзорных органов или владельца электроустановки.

**Предварительная проверка.** Перед производством испытаний следует проверить проектную и сопроводительную документацию, состояние аппарата и правильность монтажа. Основной целью проверки является соответствие принятых решений требованиям нормативных документов и имеющимся рекомендациям.

*Проектное решение* должно предусматривать правильный выбор места установки УЗО. УЗО устанавливается на вводе питающей линии в ВРУ, вводных и распределительных щитах, расположенных в помещениях без повышенной опасности и доступных для обслуживания. В помещениях с повышенной опасностью УЗО должно быть размещено в пылевлагонепроницаемых щитках класса IP 50 или иметь соответствующий корпус.

В групповых цепях в зону действия УЗО должны входить участки с наибольшей вероятностью электропоражения людей (розеточные группы, ванны и душевые комнаты, стиральные машины и т. п.). УЗО для противопожарной защиты устанавливаются на главном вводе электроустановки (ВРУ, ВРЩ).

Во всех случаях применения УЗО параметры его должны соответствовать максимальным токам нагрузки и токам короткого за-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

мыкания. Уставки УЗО выбираются на основе критериев электробезопасности и с учетом тока нагрузки согласно табл. 3.21, имея при этом в виду, что реальное значение отключающего дифференциального тока находится в пределах  $(0,5 \dots 1,0)I_{\Delta n}$ .

Таблица 3.21

*Рекомендуемые значения номинального отключающего дифференциального тока УЗО, мА*

Номинальный ток в зоне защиты, А	10, 16	25	40	63	100
Питание одиночного потребителя	10	10	30	30	30
Питание группы потребителей	30	30	30	100	100
Противопожарное назначение	300	300	300	300	500

В зданиях из металла или с металлическим каркасом, предназначенных для уличной торговли и бытового обслуживания населения, уставка УЗО должна быть не выше 30 мА.

Следует проверить также наличие и правильность выбора последовательного защитного устройства, обеспечивающего защиту от сверхтоков.

При оценке работы нескольких УЗО в радиальных цепях необходимо учитывать, что селективность действия УЗО по току при уставках до 100 мА обеспечивается главным образом применением устройств с выдержкой времени. Селективность срабатывания по току утечки на землю может быть обеспечена при использовании на вводе в качестве головного УЗО противопожарного назначения с номинальным отключающим током 300 и 500 мА и на отходящих линиях (группах) 10 и 30 мА.

*Сопроводительная документация* должна содержать:

- сертификаты соответствия УЗО действующему ГОСТ Р 50807-95 и Нормам НПБ 243-97 Госпожнадзора;
- паспорт (руководство по эксплуатации) на УЗО со штампом предприятия—производителя, датой изготовления и продажи, указанием гарантийного срока;
- параметры данного экземпляра УЗО.

*Состояние* УЗО определяется внешним осмотром и проверкой электрической изоляции. Корпус аппарата не должен иметь трещин, сколов, размягченных и оплавленных частей, все элементы должны быть надежно закреплены. Следует убедиться, что контактная группа надежно фиксируется в крайних положениях («вкл»,

«откл»). Электрическая изоляция проводов не должна иметь повреждений.

Изоляция электрических цепей аппарата должна выдерживать без пробоя и перекрытия воздействие испытательного напряжения 1000 В переменного тока частотой 50 Гц или мегаомметра на 2500 В в течение 1 мин. Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

*Монтаж УЗО* должен осуществляться только квалифицированным персоналом, имеющим лицензию на выполнение данного вида работ. Производится проверка:

- соответствия монтажа утвержденной схеме электроустановки;
- фазировки проводов (фазных и нулевого);
- отсутствия соединения в зоне УЗО рабочего нулевого проводника (N) с защитным (PE) проводником, а также с заземленными корпусами электрооборудования и повторным заземлением;
- надежности затяжки контактных зажимов УЗО и аппаратов максимальной токовой защиты.

В сетях TN-C ( не имеющих на вводе в электроустановку нулевого защитного проводника PE) следует убедиться в том, что проводник PE, проложенный в электроустановке, подключен к нулевому совмещенному проводнику PEN в групповом щитке перед головным УЗО.

Наиболее часто встречаются следующие ошибки монтажа:

- объединение нулевых рабочих проводников двух УЗО в зоне защиты, так что ток нагрузки оказывается дифференциальным током, вызывающим их срабатывание;
- подключение нагрузки к нулевому рабочему проводнику до УЗО, вследствие чего ток нагрузки становится дифференциальным отключающим током и вызовет срабатывание УЗО;
- подключение нагрузки к нулевому рабочему проводнику другого УЗО, в связи с чем ток нагрузки будет дифференциальным отключающим током для обоих УЗО;
- подключение к клеммам четырехполюсных УЗО одноименных фаз, из-за чего исправное устройство при нажатии кнопки «ТЕСТ» не работает.

Случайное соединение нулевого рабочего проводника N с защитным проводником PE в розетке или распаечной коробке также вызовет ложное срабатывание УЗО:

- при подключении нагрузки к розетке;
- при подключении любой нагрузки вне зоны защиты УЗО.

#### 3.5.5.2. Методы испытаний УЗО.

Испытания УЗО могут проводиться только подготовленным персоналом, не менее чем двумя лицами, одно из которых должно иметь квалификационную группу по электробезопасности не ниже IV, другое — не ниже III. Предварительно производится опробование устройств под рабочим напряжением путем нажатия кнопки «ТЕСТ». Испытания ведут либо с помощью временных схем, которые собираются на рабочем месте, либо посредством комплектных устройств соответствующего назначения, изготовленных в лабораториях специализированных предприятий или выпускаемых серийно. Испытательный ток регулируется переменными резисторами с питанием схемы непосредственно от сети или от понижающего трансформатора.

1) Определение отключающего дифференциального тока методами, рекомендованными ГОСТ Р 50571.16–99 «Электроустановки зданий». Эти методы могут быть использованы в системах TN-S, TT и IT. Испытание производится с помощью цепи, состоящей из миллиамперметра и переменного резистора. Миллиамперметр — класса точности не хуже 1,0; пределы измерений от 0 до  $1,1 I_{\Delta n}$ , где  $I_{\Delta n}$  — номинальное значение дифференциального отключающего тока проверяемого устройства. Диапазон регулирования сопротивления (кОм) переменного резистора  $R_p$  принимается из условия получения крайних значений отключающего дифференциального тока — номинального  $I_{\Delta n}$  и минимального  $0,5I_{\Delta n}$  (мА):

$$R_{p \min} = 0,85 \cdot 220 / I_{\Delta n} \text{ и } R_{p \max} = 1,1 \cdot 220 / 0,5I_{\Delta n}.$$

Мощность резистора должна быть не менее  $50/R_{p \min}$  (Вт).

Первоначально сопротивление регулировочного резистора устанавливают максимальным ( $R_p = R_{p \max}$ ). Затем, уменьшая сопротивление  $R_p$ , увеличивают ток от 0 до значения  $I_{\Delta}$ , при котором УЗО срабатывает. Это значение не должно быть меньше  $0,5 I_{\Delta n}$  и больше  $I_{\Delta n}$ ; в противном случае устройство бракуется и подлежит замене.

По методу 1 переменный резистор присоединяют между фазным проводником на стороне нагрузки и открытой проводящей частью электрооборудования (рис. 3.73).

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

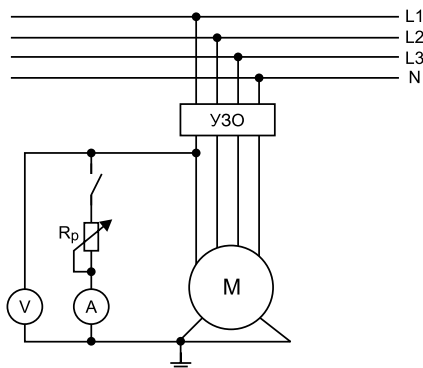


Рис. 3.73. Схема измерения отключающего дифференциального тока (уставки) УЗО по методу 1

При проведении испытания в системе ИТ может быть соединение точки схемы с землей, необходимое для срабатывания УЗО. Измерение повторяют для каждого фазного провода.

Согласно *методу 2* (рис. 3.74) переменный резистор присоединяют между одним проводником (фазным или нулевым рабочим) на стороне питания и другим (нулевым рабочим или фазным) на стороне нагрузки. После определения  $I_{\Delta}$  повторяют измерение, поменяв между собой точки присоединения.

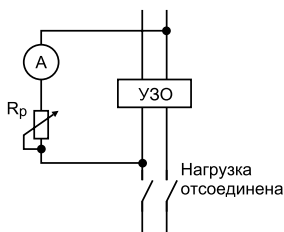


Рис. 3.74. Схема измерения отключающего дифференциального тока УЗО методом 2

*Метод 3* (рис. 3.75) предусматривает применение заземленного вспомогательного электрода. Измеряют ток срабатывания  $I_{\Delta}$  и напряжение  $U$  между открытыми проводящими частями и независимым вспомогательным электродом. Должно быть выполнено следующее условие:



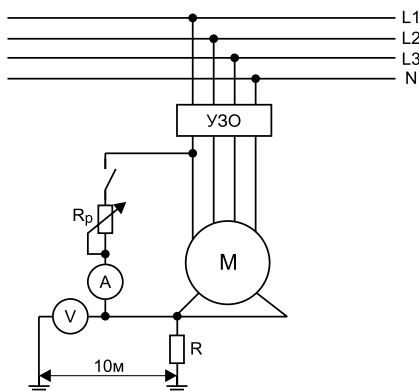


Рис. 3.75. Схема проверки УЗО по методу 3

$$U \leq U_L I_{\Delta} / I_{\Delta n},$$

$U_L$  — предельное нормируемое напряжение прикосновения.

Метод может быть использован только в том случае, когда расположение электроустановки позволяет применить вспомогательный электрод. При проведении испытаний в системе IT может оказаться необходимым соединение точки схемы с землей для обеспечения срабатывания УЗО.

2) Определение тока утечки в зоне защиты УЗО. Ток утечки на землю в нормально работающей электроустановке, или «фоновый» ток утечки, характеризует состояние изоляции. Повышенное его значение указывает на наличие дефекта изоляции, который может стать причиной возгорания, а также неправильной работы УЗО. Определить значение фонового тока можно с помощью схемы рис. 3.74. Сначала измеряют ток  $I_{\Delta}$ , как описано выше, затем включают нагрузку и фиксируют показания миллиамперметра при срабатывании УЗО. В этом режиме ток срабатывания  $I_{\Delta}$  является суммой измеренного миллиамперметром тока  $I_{из}$  и тока утечки  $I_{ут}$  защищаемой электроустановки, который будет:

$$I_{ут} = I_{\Delta} - I_{из}.$$

Известно, что более трети всех пожаров имеют электротехническое происхождение, в основном, из-за повреждения изоляции и коротких замыканий. Причина локального ухудшения изоляции и коротких замыканий — протекание тока утечки. В месте дефекта изоляции образуется проводящий мостик, по которому начинает

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

проходить небольшой ток утечки. По мере роста тока от 1 мА и выше постепенно происходит обугливание проводящего канала и с образованием так наз. «угольного мостика» ток возрастает более резко. Для воспламенения изоляции в месте ее дефекта необходимо действие мощности от 20 до 100 Вт. Это означает, что при напряжении 220 В выделение такой мощности произойдет при значении локального тока утечки от 90 до 450 мА. Поэтому и уставки УЗО для защиты от возгораний и пожаров принимают равными 300 или 500 мА.

Во избежание ложного срабатывания защиты значения фоновго тока не должны превышать  $1/3$  номинального отключающего дифференциального тока УЗО. При частом срабатывании УЗО следует не стремиться к замене реле с большей уставкой, а выявить участки цепей с поврежденной изоляцией. С этой целью производят измерения тока утечки при последовательном отключении участков цепей и электроприемников. После устранения замеченных дефектов производят повторное измерение тока утечки в электроустановке в целом, и только затем решают вопрос об изменении уставки УЗО.

3) Проверка работоспособности УЗО в составе электроустановки здания. Помимо измерения характеристик отдельных аппаратов УЗО, может возникнуть необходимость проверки функционирования УЗО при аварии в электроустановке. С этой целью имитируют протекание в зоне защиты УЗО тока утечки, достаточного для срабатывания защиты. Значение испытательного тока ограничивают на уровне  $I_{\Delta n}$ , а время протекания — до значения, гарантирующего электробезопасность персонала.

Испытание позволяет проверить исправность защитного проводника РЕ и надежность его соединения с заземлением, правильность выбора уставок и селективность действия УЗО, надежность клеммных соединений в электроустановке и т. п. В качестве примера на рис. 3.76 приведена схема проверки УЗО путем замыкания цепи между проводами L и РЕ в одной из розеток. Испытательное устройство (P) содержит коммутатор, ограничивающий время про-

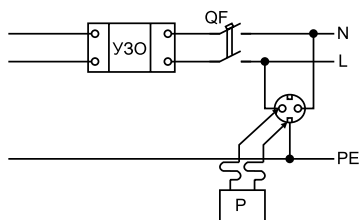


Рис. 3.76. Проверка работоспособности УЗО в составе электроустановки

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

текания тока в цепи, и резистор (или конденсатор), сопротивление которого выбирается из условия  $R = 220/I_{\Delta n}$ .

#### 3.5.6. Устройства и приборы для испытания УЗО

##### 3.5.6.1. Схемы устройств для проверки параметров срабатывания УЗО

Одна из возможных испытательных схем с питанием от сети показана на рис. 3.77. При измерении отключающего дифференциального тока УЗО на номинальный ток 10 и 30 мА собирается цепь х-R2-SB3-SB2-у (10 мА) или х-R4-SB2-SB3-у (30 мА). Разделение цепей, осуществляемое посредством тумблеров SB2 и SB3, выполнено с целью облегчения подбора маломощных переменных резисторов: максимальное сопротивление резистора  $R2 = 39 \text{ кОм}$ , мощность 0,5 Вт, сопротивление  $R4 = 10 \text{ кОм}$ , мощность 3 Вт.

При проверке УЗО в составе электроустановки собирается цепь х-КТ.1-R8-SB3-SB2-у (10 мА) или х-КТ.1-R9-SB3-SB2-у (30 мА). Нажимается кнопка SB1 и конденсатор C1, ранее заряженный через резистор R10, разряжается через катушку реле КТ. Реле вклю-

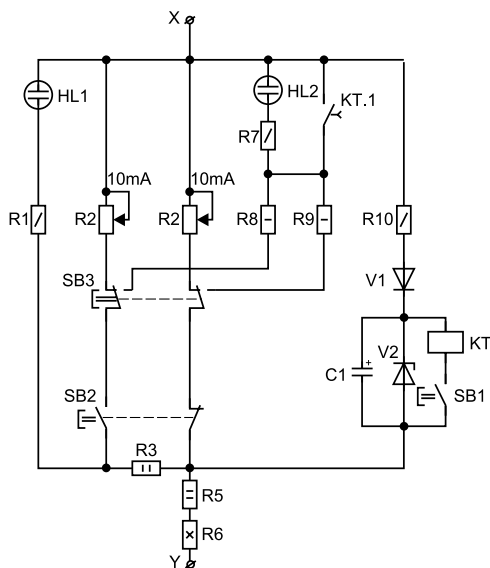


Рис. 3.77. Схема проверки УЗО с питанием от сети

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

чается и своим контактом КТ.1 замыкает одну из указанных цепей на время 0,15...0,20 с.

Когда требуется регулировать испытательный ток порядка 100 мА и более, подбор малогабаритных переменных резисторов достаточной мощности становится затруднительным. В этом случае целесообразно перейти к питанию схемы проверки УЗО от понижающего трансформатора.

После окончания испытаний следует убедиться в работоспособности УЗО путем нажатия кнопки «ТЕСТ». Во время производства работ не допускается подача напряжения на отключенные провода, идущие к УЗО, испытание их изоляции мегаомметром и т. п.

#### 3.5.6.2. Измерение отключающего дифференциального тока УЗО устройством «Вега-100»

Устройство предназначено для проверки УЗО типа «АС» с дифференциальным током срабатывания от 5 до 100 мА, диапазон регулирования тока 2...122 мА. Устройство содержит блок регулировки тока, узлы защиты и индикации.

До подключения УЗО следует к клеммам устройства «~мА» подключить миллиамперметр (тестер, мультиметр) с верхним пределом измерения не ниже 125 мА, а ручку регулировки тока установить в положение «min». Для соединения устройства с УЗО ис-

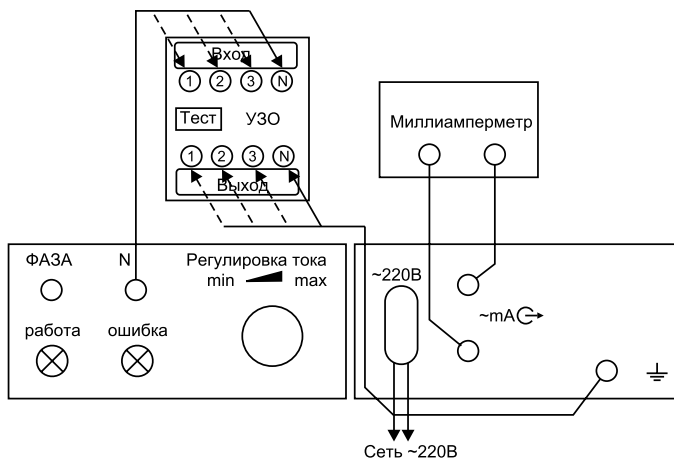


Рис. 3.78. Схема подключения устройства «Вега-100»

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

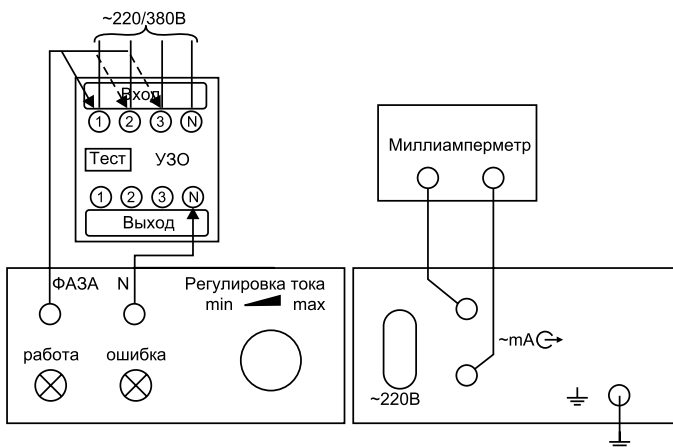


Рис. 3.79. Схема проверки УЗО устройством «Вега-100» без подключения к дополнительному источнику питания (сети)

пользуются три многожильных провода (рис. 3.78). Сетевой провод должен быть отключен от устройства.

Первым к нулевой шине в распределительном щите подключается провод заземления, снабженный разъемом «крокодил».

Вторым к любому фазному выводу на входе УЗО подключается провод с маркировкой «ФАЗА»; при этом должен загореться сигнал зеленого цвета.

Третьим к нулевому выводу на выходе УЗО подключается провод с маркировкой «N». Если при этом загорается индикатор красного цвета «ошибка», необходимо немедленно отключить устройство от УЗО и проверить правильность его подключения. Работоспособность устройства восстанавливается через 10 с.

Подключив устройство, медленно вращают ручку «Регулировка тока» до тех пор, пока УЗО не сработает. Максимальное значение тока, которое покажет миллиамперметр, и будет дифференциальным током срабатывания УЗО.

Измерение тока срабатывания электромеханических УЗО, не требующих подключения к сети, производится по схеме рис. 3.79. Провода «N» и «ЗЕМЛЯ» могут быть подключены к любой паре контактов УЗО «Вход-Выход». Необходимо помнить, что гнездо «ФАЗА» находится под напряжением 220 В. Запрещается:

- работа устройства без заземления;

### 3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения

- использование устройства в качестве индикатора для поиска и определения «нулевых» и «фазных» проводов;
- эксплуатация устройства с механическими повреждениями корпуса и соединительных проводов.

#### 3.5.6.3. Измерение параметров УЗО прибором MIE-500 («SONEL», Польша)

Этот многофункциональный прибор позволяет, в частности, измерить дифференциальный ток срабатывания УЗО, а также время отключения УЗО при значениях дифференциального тока  $0,5I_{\Delta n}$  и  $I_{\Delta n}$ .

Вначале снимается напряжение с УЗО и отключается отходящая линия, чтобы исключить из результата измерения ток утечки на землю. Прибор подключается к УЗО, как показано на рис. 3.80, и подается напряжение. Устанавливают переключатель в положение  $U_B, I_A$  и с помощью клавиши **S** выбирают тип УЗО (селективный или неселективный); результат выбора высвечивается на дисплее. С помощью соответствующих клавиш выбирают также номинальное значение отключающего дифференциального тока  $I_{\Delta n}$  и вид тестового тока (A или AC); результат выбора высвечивается на дисплее. Измерение и индикация тока отключения УЗО производится после двукратного нажатия кнопки **start**. Если отключения не произошло, на дисплее высвечивается надпись **red**. Причиной может быть неправильный выбор значения тока  $I_{\Delta n}$  или неисправность УЗО.

Прибор позволяет производить измерение тока срабатывания в диапазоне 3,3...500 мА с основной погрешностью  $\pm 5\% I_{\Delta n}$ , а времени отключения УЗО в диапазоне 0...500 мс с основной погрешностью  $\pm 2\%$  изм. вел.  $\pm 1$  ед. мл. разр. в сети напряжением 220/380 В промышленной час-

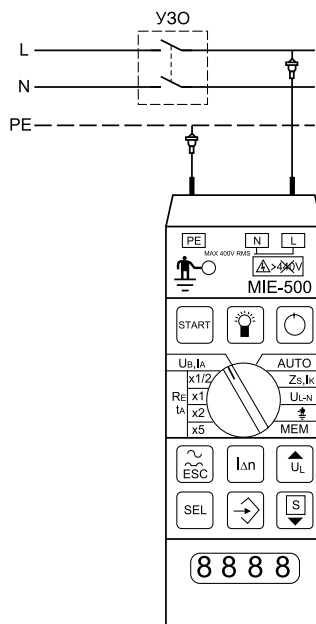


Рис. 3.80. Подключение прибора MIE-500

тоты, при температуре окружающего воздуха 0...40°С. Прибор заземлению не подлежит.

#### 3.5.6.4. Устройство измерения параметров УЗО прибором М12120 (METREL, PARMA)

Измерение параметров УЗО является одной из функций прибора. Возможна проверка как стандартных, так и селективных УЗО, типов АС и А (для синусоидального и пульсирующего тока), с номинальным отключающим током от 10 до 1000 мА. Измеряется ток отключения в диапазоне от 0,2 до 1,11 (тип АС) или до 1,5 (тип А) номинального, а также время отключения в диапазоне от 0 до 300 (АС) или до 500 мс(А).

## 3.6. Проверка систем молниезащиты

### 3.6.1. Общие сведения

#### 3.6.1.1. Основные понятия

*Молния* — это мощный электрический разряд, происходящий между облаком и землей (90% случаев) или между облаками (10%). Облако представляет собой скопление мелких частиц воды в виде капель или кристаллов льда. Нижняя часть грозового облака обычно заряжается отрицательно, земля же приобретает положительный заряд. По мере накопления зарядов разного знака возрастает напряженность электрического поля между облаком и поверхностью земли (а также и между облаками) и при напряженности 25...30 кВ/см начинается ионизация воздуха и развитие разряда. Движение электрических зарядов принимает лавинный характер, образуя канал для тока *линейной* молнии. Время нарастания тока (крутизна фронта импульса) составляет несколько микросекунд, длительность всего импульса — несколько десятков микросекунд. В среднем сила тока молнии (амплитуда импульса) составляет несколько десятков килоампер, но в отдельных случаях (1—2%) может достигать 200 и даже 500 кА, крутизна фронта до  $6 \cdot 10^{10}$  А/с. Указанные цифры относятся к равнинным районам России, в горных районах они примерно вдвое меньше.

Кроме линейных, при грозе может появиться *шаровая* молния сферической или грушевидной формы диаметром от 1 до 100 см (в среднем 10—20 см). Она имеет цветную окраску и существует от

долей секунды до нескольких минут. Природа ее изучена недостаточно.

Предпочтительным путем для разряда молнии является участок с большей проводимостью — либо из-за большей электропроводности воздуха или почвы, либо из-за наличия на земле высоких предметов.

Разряд молнии создает большую опасность для людей, сельскохозяйственных животных, зданий и сооружений. Опасность возникает как при *первичном* воздействии (прямом ударе молнии) — разряде в объект, так и при *вторичных* ее проявлениях. Прямой удар молнии оказывает тепловое, механическое и электрическое воздействия.

### 3.6.1.2. Воздействия молнии

Протекание тока молнии через объект связано с выделением *тепла*. Значение тока, при котором токоотвод нагреется до температуры плавления, можно определить из рис. 3.81. По этим данным можно оценить правильность выбора сечения токоотвода, если известен предполагаемый ток молнии.

При контакте канала молнии с плоской металлической поверхностью происходит ее оплавление на площади ( $\text{мм}^2$ ), численно равной амплитуде тока ( $\text{kA}$ ). Оплавление получается более значительным, если молния попадает в острый шпиль. Выделяемая в канале молнии энергия в 95% случаев на 2...3 порядка превышает минимальный порог воспламенения большинства паро-, газо- и пылевоздушных смесей, что создает опасность пожара и взрыва.

*Механическое* воздействие обусловлено ударной волной, распространяющейся от канала молнии, и электродинамическими

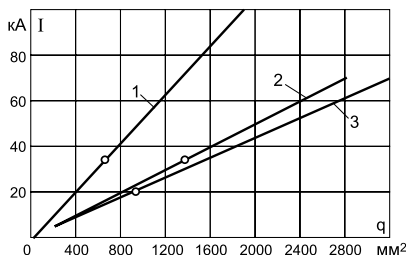


Рис. 3.81. Зависимость тока расплавления ( $I$ ) от сечения ( $q$ ) и материала токопровода: 1,2,3 — медь, алюминий и сталь соответственно



силами, действующими на проводники с токами молнии. Эти усилия могут привести к разрушению деревянных конструкций, повреждению кирпичных и каменных сооружений, сплющиванию металлических труб. При ударах молнии в железобетонные опоры возможен откол бетона, снижение его механической прочности, деформация конструкции. Импульсные токи порядка 20 кА могут разрушить бетон.

*Электрическое* воздействие связано с травмированием людей и животных, вплоть до летального исхода, и появлением перенапряжений (до нескольких миллионов вольт) на пораженных молнией элементах. Создается возможность перекрытия на другие объекты и возникновения опасных напряжений шага и прикосновения.

*Вторичные проявления* удара молнии связаны с действием на объект электромагнитного поля близких разрядов. Это поле характеризуют электростатической и электромагнитной индукцией. Первая обусловлена зарядом в канале молнии, вторая — изменением тока молнии во времени. *Электростатическая индукция* вызывает появление перенапряжения на металлических конструкциях, зависящие от силы тока молнии, расстояния до места удара и сопротивления заземлителя. *Электромагнитная индукция* ведет к образованию в металлических контурах ЭДС, пропорциональной крутизне тока молнии и площади, занимаемой контуром. Таким образом может наводиться ЭДС порядка десятков тысяч вольт. В местах сближения протяженных металлоконструкций, в разрывах контуров создается опасность перекрытия и искрения.

Еще одним видом опасного воздействия молнии является *вынос* высокого потенциала по воздушным и кабельным линиям, трубопроводам, подземным коммуникациям. Опасность здесь создается за счет перекрытия на заземленные части объекта.

Большинство пожаров и разрушений при грозе вызывается прямыми ударами молнии. Люди или животные поражаются прямыми ударами сравнительно редко, чаще — напряжением прикосновения и шага. Шаговое напряжение возникает при ударе молнии в дерево, опору ЛЭП, молниеотвод или другой предмет и уменьшается до небольших значений на расстоянии 8—10 м от места разряда. Наиболее опасно шаговое напряжение вблизи заземленного молниеотвода. Еще более опасно прикосновение к токоотводу: в этом случае человек оказывается под напряжением, равным разности потенциалов между местом прикосновения и землей, которая может достигать сотен тысяч вольт.

### 3.6.2. Защита от воздействий молнии

#### 3.6.2.1. Классификация

Мероприятия по молниезащите предусматривают защиту как от первичных, так и от вторичных воздействий молнии. При этом принимается во внимание, что по техническим и экономическим причинам 100%-ная защита обеспечена быть не может, но должна быть достигнута максимальная ее надежность для конкретных объектов. Численно эффективность защиты от прямых ударов молнии определяется как *вероятность прорыва*  $P$  — отношение числа ударов молнии в защищаемый объект к общему числу ударов в объект и молниеотвод, или как степень *надежности*  $1-P$ .

Оптимальный выбор защитных мер производится в соответствии с классификацией объектов по опасности ударов молнии для самого объекта и его окружения. По этому признаку объекты могут подразделяться на обычные и специальные. *Обычные* — это здания и сооружения высотой не более 60 м, предназначенные для жилья, торговли, промышленного производства, сельского хозяйства. *Специальные* — это объекты, представляющие повышенную опасность как для непосредственного окружения, так и для окружающей среды. Для каждого класса объектов определяется необходимая степень *надежности* защиты от прямых ударов молнии. Для обычных объектов устанавливаются четыре уровня защиты:

Уровень защиты	Надежность защиты
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Для специальных объектов вероятность находится в пределах  $P = 0,01 - 0,10$ , а надежность соответственно  $1 - P = 0,99...0,90$ , в зависимости от общественной значимости объекта и тяжести ожидаемых последствий. По желанию заказчика в проект может быть заложен уровень надежности, превышающий предельно допустимые значения (документ СО 153-34.21.122-2003 Минэнерго РФ).

По *тяжести* возможных последствий поражения молнией здания и сооружения разделяются на три категории (Инструкция РД 34.21.122-87). К I категории отнесены производственные помещения, где в *нормальных* технологических режимах могут находиться и образовываться взрывоопасные вещества, взрыв которых опасен

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

не только для данного объекта, но и для расположенных вблизи. Во II категорию входят производственные здания и сооружения, в которых взрывоопасность возникает вследствие нарушения нормального технологического режима, а также наружные установки, содержащие взрывоопасные жидкости и газы. К III категории принадлежат объекты, последствия поражения которых связаны с меньшим ущербом, чем при взрывоопасной среде, но тем не менее опасные для людей или животных: например, пожароопасные помещения, сгораемые конструкции, большие общественные здания, а также мелкие строения в сельской местности. Из-за сравнительно небольшой стоимости последних молниезащита их выполняется упрощенными способами.

#### 3.6.2.2. Защита от ударов молнии

Комплекс средств молниезащиты зданий и сооружений включает в себя систему защиты от прямых ударов (внешняя) и/или вторичных (внутренняя) воздействий молнии. Внешняя защита может быть установлена отдельно или на самом сооружении или даже быть его частью. Внутренние устройства молниезащиты ограничивают электромагнитные воздействия тока молнии и предотвращают искрение внутри объекта.

**Внешняя молниезащита (молниеотвод).** Это — устройство, воспринимающее удар молнии и отводящее ее ток в землю. *Молниеотвод* состоит из молниеприемников, токоотводов и заземлителей. Их материал и сечение должны удовлетворять требованиям табл. 1. Указанные в ней значения могут быть увеличены в зависимости от повышенной коррозии или механических воздействий.

Таблица 3.22

*Материал и минимальные сечения элементов внешней молниезащиты*

Материал	Сечение, мм <sup>2</sup>		
	молниеприемника	токоотвода	заземлителя
Сталь	50	50	80
Алюминий	70	25	Не применяется
Медь	35	16	50

Конструктивно молниеотводы разделяются на стержневые и тросовые (с вертикальным или горизонтальным расположением

молниеприемника), а также сетки, укладываемые поверх защищаемого объекта. Наибольшее распространение получили стержневые молниеотводы как наиболее простые, дешевые и надежные. Тросовые молниеотводы используются для защиты протяженных объектов, сетчатые — устанавливаются на защищаемом здании, когда применение стержневых или тросовых электродов затруднено.

Здания и сооружения I категории защищаются, как правило, отдельно стоящими стержневыми или тросовыми электродами. Допускается установка изолированных молниеотводов непосредственно на защищаемом сооружении. Защита зданий и сооружений II категории осуществляется неизолрованными стержневыми или тросовыми молниеотводами, сеткой или металлической кровлей. Для защиты объектов III категории могут быть использованы молниеотводы любых модификаций.

*Молниеприемник* непосредственно воспринимает удар молнии, токоотвод передает ее ток в землю, а заземлитель обеспечивает растекание тока в земле. Следующие конструктивные элементы зданий и сооружений могут рассматриваться как *естественные молниеприемники*:

а) металлические кровли при условии, что толщина металла составляет не менее 4(сталь), 5 (медь) или 7 мм (алюминий), если необходимо предохранить кровлю от повреждений, или 0,5 мм, если этого не требуется.

б) металлические конструкции крыши;

в) трубы и резервуары.

*Токоотводы* должны располагаться так, чтобы между точкой поражения и землей ток растекался по нескольким параллельным путям минимальной длины. Если молниеприемник состоит из стержней на опорах, на каждую из них должен быть предусмотрен минимум один токоотвод. На каждый конец тросового молниеприемника и на каждую опору сетки требуется минимум по одному токоотводу. Общее количество токоотводов должно быть не менее двух.

Токоотводы располагают по периметру защищаемого объекта так, чтобы среднее расстояние между ними было не меньше значений, нормируемых в зависимости от уровня защищенности, например, 20 м при уровне III. Токоотводы соединяются горизонтальными металлическими полосами, начиная от поверхности земли и через каждые 20 м по высоте здания. Не следует прокладывать токоотводы в водосточных трубах.

*Заземлители* молниезащиты совмещают с заземлителями силовых электроустановок или объединяют с ними посредством системы уравнивания потенциалов. Заземляющие электроды либо прокладываются специально, либо используются естественные, например арматура железобетона или иные подземные металлические конструкции.

Стандартной *зоной защиты* одиночного стержневого молниеотвода считается конус, высота и радиус основания которого определяются в зависимости от высоты молниеотвода и надежности защиты. Так, например, если надежность равна 0,9, то для молниеотвода высотой 20 м высота конуса будет 17 м и радиус 24 м, а при надежности 0,999 высота 14 м и радиус 12 м.

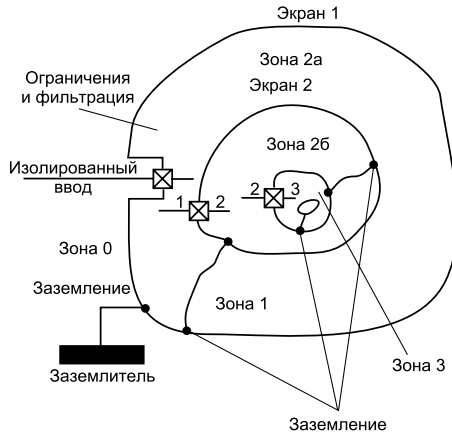
Стандартная зона защиты одиночного тросового молниеотвода в вертикальном сечении представляет собой равнобокую трапецию, геометрические размеры которой также определяются в зависимости от аналогичных параметров.

Когда расстояние между стержнями или тросами не превышает определенного значения, молниеотвод считается двойным. При высоте до 150 м параметры зоны защиты рассчитываются по формулам, при большей — используют программное обеспечение.

Несколько иная методика предлагается стандартом МЭК. Для расчета простых сооружений используется метод защитного угла, для сооружений сложной формы — метод фиктивной сферы; в общем случае и для защиты поверхностей применяется сетка. Параметры зон защиты приводятся в табличной форме, в зависимости от уровня защиты.

**Внутренняя система защиты.** Устраивается для того, чтобы предотвратить вредные вторичные воздействия молнии на чувствительные электрические и электронные системы. Согласно рекомендациям МЭК, пространство, в котором они расположены, делится на зоны различной степени защиты (рис. 3.82). Зоны характеризуются существенным изменением параметров на границах. Здесь должны осуществляться меры по экранированию и соединению всех пересекающих границу металлических элементов и коммуникаций. Основным способом уменьшения электромагнитных помех является *экранирование*.

В качестве экрана могут быть использованы металлические конструкции здания, например стальная арматура крыши, фасадов, стальные каркасы, решетки. Такие элементы электрически соединяют между собой и с системой молниезащиты.



*Рис. 3.82. Зоны защиты от воздействий молнии: зона 0 — внешнее окружение; зона 1 — внутренняя электромагнитная обстановка; зона 2а; зона 2б — обстановка внутри шкафа; зона 3*

Для уменьшения индуцированных помех можно использовать: внешнее экранирование; рациональную прокладку кабельных линий; экранирование линий питания и управления.

Если внутри защищаемого пространства имеются экранированные кабели, их экраны соединяются с системой молниезащиты. Кабели, идущие от одного объекта к другому, по всей длине укладываются в металлические трубы или сеточные короба, если экраны не способны выдерживать предполагаемый ток молнии.

Для уменьшения разности потенциалов между металлическими частями внутри защищаемого объекта выполняется система *уравнивания потенциалов*. Все внутренние проводящие элементы значительных размеров, такие как направляющие лифтов, металлические полы, трубы и т. п. присоединяются к ближайшей общей шине по кратчайшему пути. Поперечные сечения соединительных проводников должны быть не менее 6, 10 и 16 мм<sup>2</sup> по меди, алюминию и стали соответственно.

Все ОПЧ информационных систем соединяются в единую сеть (может не иметь связи с заземлителем). Металлические корпуса, каркасы, оболочки этих систем присоединяются к заземлителю по радиальной или сетчатой схеме (рис. 3.83). Радиальная системе заземления соединяется с общей системой заземления только в одной точке (рис. 3.83,а). При этом все линии и кабели должны про-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

кладываться параллельно радиальным проводникам для уменьшения их внешней индуктивности. Ввод проводов в защитную зону производится в центральной точке уравнивания потенциалов. Такая система применяется обычно для небольших объектов.

Когда используется сетка, ее металлические части не изолируются от общей системы заземления, а соединяется с ней во многих точках (рис. 3.83,б). Система обладает низким сопротивлением, а большое число короткозамкнутых контуров ослабляет магнитное поле вблизи защищаемого устройства; используется для протяженных объектов.

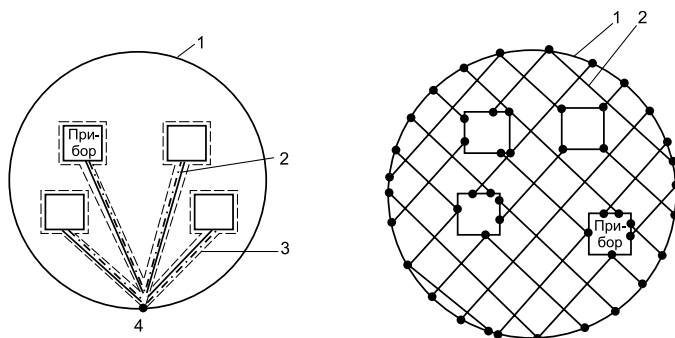


Рис. 3.83. Схема соединений для уравнивания потенциалов:  
а — радиальная система; б — сетчатое выполнение; 1 — экран защитной зоны; 2 — проводник уравнивания потенциалов; 3 — электрическая изоляция; 4 — центральная точка радиальной системы

Заземляющее устройство предназначено для отвода большей части тока молнии в землю. Остальная часть тока растекается по подходящим к зданию коммуникациям (оболочкам кабелей, трубам водоснабжения и т. п.). С этой целью выполняется сетчатая система под зданием и вокруг него. Арматура бетона вокруг фундамента соединяется с системой заземления, обычно через каждые 5 м. Уменьшение разности потенциалов между различными точками здания и оборудования достигается созданием большого количества параллельных путей для токов молнии и наведенных токов. Множество контуров создают единую сеть с низким сопротивлением для электромагнитных помех.

#### 3.6.3. Проверка систем молниезащиты

1) Проверка проектных документов. Убедиться, что проектная документация представлена с достаточной полнотой, а основные проектные решения соответствуют ПУЭ и инструкциям РД 34.21.122-87 и СО 153-34.21.122-2003, категории и назначению объекта.

2) Проверка строительной и монтажной документации. Убедиться, что сдаточные документы достаточно полно и правильно отражают проектное задание. Они должны содержать акты на скрытые работы по устройству заземлителей и присоединению к ним токоотводов, а токоотводов к молниеприемникам. Все докуиентя должны быть оформлены в соответствии с требованиями ЕСКД и ведомственных инструкций.

3) Внешняя молниезащитная система. Убедиться в том, что:

- молниеприемники и токоотводы исправны, их соединения и крепления надежны (визуально);
- сечение проводников молниепремников, токоотводов, заземлителя соответствует требованиям табл. 3.22;
- конструкция и монтаж молниеприемной сетки соответствуют требованиям инструкций;
- наличие электрической связи сетки, металлической кровли с токоотводами;
- заземление выполнено в соответствии с проектом. Если в проекте указано допустимое значение сопротивления заземлителя, то следует измерить его реальное значение. Если молниезащита выполнена согласно типовым решениям, рекомендованным РД 34.21. 122-87, измерять сопротивление не требуется: считается, что при этом импульсное сопротивление заземлителя будет заведомо меньше допустимых значений;
- во всех возможных случаях в качестве заземлителя используются железобетонные фундаменты зданий и сооружений, а заземлитель молниезащиты объединен с заземлителем электроустановки.

**ВНИМАНИЕ!** Во время грозы производство работ вблизи устройств молниезащиты **ЗАПРЕЩАЕТСЯ!**



## 3.7. Измерение сопротивления изоляции

### 3.7.1. Характеристики изоляции как диэлектрика

Электрическая изоляция характеризуется, в основном, сопротивлением постоянному току, диэлектрическими потерями и электрической прочностью. Эквивалентная электрическая схема замещения изоляции как диэлектрика может быть представлена параллельным соединением конденсаторов и резисторов (рис. 3.84).

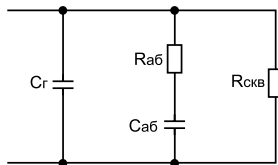


Рис. 3.84. Схема замещения электрической изоляции:

$C_{\Gamma}$  — геометрическая емкость;  $C_{аб}$  и  $R_{аб}$  — емкость и активное сопротивление абсорбционной ветви;  $R_{скв}$  — сопротивление изоляции установившемуся постоянному току

Входной ток в этой схеме является суммой трех составляющих: а) емкостной ток  $I_{\Gamma}$  обусловлен так называемой геометрической емкостью  $C_{\Gamma}$ , имеет импульсный характер и зависит от геометрических размеров изоляции;

б) ток абсорбции  $I_{аб}$  отражает процесс заряда слоев диэлектрика; с увлажнением изоляции сопротивление  $R_{аб}$  снижается, а емкость  $C_{аб}$  возрастает, поскольку уменьшается толщина сухого слоя изоляции;

в) ток сквозной проводимости  $I_{скв}$ , или ток утечки через сопротивление  $R_{скв}$ , которое обусловлено как наружным загрязнением изоляции, так и наличием в ней путей сквозной утечки.

При приложении к изоляции постоянного напряжения вначале появляется бросок тока заряда геометрической емкости, затем — абсорбционной емкости. По мере заряда емкостей ток  $I_{\Gamma}$  быстро прекращается, а ток  $I_{аб}$  спадает сравнительно медленно. Третья составляющая тока остается неизменной и значение ее определяется только активным сопротивлением изоляции  $R_{из} = R_{скв}$ . Время установления тока обычно не превышает  $t_{мин}$ , хотя для сухой и исправной изоляции может быть и больше. Изменение сопротивления изоляции после приложения постоянного напряжения ха-

рактически характеризует влажность изоляции и численно определяется коэффициентом абсорбции

$$K_{аб} = R_{60} / R_{15},$$

где  $R_{60}$  и  $R_{15}$  — сопротивление изоляции через 60 и 15 с после приложения постоянного напряжения. Для влажной изоляции этот коэффициент близок к 1, у сухой может достигать 2 и сильно зависит от температуры. Измеряют коэффициент абсорбции при температуре не ниже  $10^{\circ}\text{C}$ .

*Диэлектрические потери* создаются в основном абсорбционным током (ток заряда геометрической емкости быстро затухает, а сквозной ток сравнительно невелик). По значению этих потерь можно судить о надежности изоляции при нагреве, ее старении и увлажненности. В установках до 1000 В измерение диэлектрических потерь не требуется.

*Электрическая прочность* изоляции испытывается приложением повышенного напряжения. Кратность испытательного напряжения по отношению к номинальному устанавливается в зависимости от рода электроустановки. Время приложения испытательного напряжения принимается обычно равным 1 мин. Изоляция считается выдержавшей испытание, если в этот период не происходило пробоев, выделений газа или дыма, нагрева изоляции, резкого снижения напряжения или возрастания тока через изоляцию. Испытания проводятся как переменным напряжением, так и постоянным (выпрямленным) напряжением. При этом под переменным напряжением понимается действующее значение напряжения переменного тока частотой 50 Гц, практически синусоидального, под постоянным — напряжение постоянного тока или напряжение выпрямленного тока с содержанием пульсаций не более 10% действующего значения (1.1.16, 1.8.12). Испытание изоляции напряжением промышленной частоты, равным 1 кВ, может быть заменено измерением одномоментного значения сопротивления изоляции мегаомметром на 2500 В (1.8.11). Эта замена не допускается при испытании цепей релейной защиты и автоматики.

#### **3.7.2. Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции для различных электроустановок**

Сопротивление изоляции и напряжение мегаомметра должны быть не менее значений, приведенных ниже (при большом объеме

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

данных они приводятся в сокращении). Если дополнительные указания отсутствуют, измерение сопротивления изоляции производится (1.8.7):

- аппаратов и цепей напряжением до 500 В — мегаомметром на напряжение 500 В;
- аппаратов и цепей напряжением от 500 до 1000 В — мегаомметром на напряжение 1000 В.

1) Синхронные генераторы. Обмотка статора: сопротивление изоляции 10 МОм; напряжение мегаомметра 500, 1000 В; коэффициент абсорбции не ниже 1,3.

Обмотка ротора: 0,5 МОм; 500, 1000 В.

Цепи возбуждения: 1,0 МОм; 500, 1000 В.

Изолированные стяжные болты стали статора: 0,5 МОм; 1000 В.

Тиристорные преобразователи и др. источники тока возбуждения: 5 МОм; 2500, 1000 В.

То же, со всей присоединенной аппаратурой: 1,0 МОм; 1000 В.

Согласно РД 34.45-51.300-97 указанные выше нормы (ПУЭ) действуют при температуре 10—30°C. При превышении температуры на каждые 20°C сверх 30°C допустимые значения сопротивления изоляции снижаются в 2 раза. Во всех случаях сопротивление обмоток генераторов не должно быть менее 0,5 МОм.

2) Машины постоянного тока. Сопротивление изоляции обмоток нормируется в зависимости от номинального напряжения машин и температуры окружающего воздуха. Так, наименьшее допустимое значение сопротивления изоляции при номинальном напряжении 220 В и температуре обмотки 10°C составляет 2,7 МОм, при температуре 75°C — 0,22 МОм; то же при напряжении 900 В и температуре 10°C — 10,8 МОм, а при температуре 75°C — 0,9 МОм.

Измерение производится при номинальном напряжении обмотки до 0,5 кВ включительно мегаомметром на 500 В, выше 0,5 кВ — на 1000 В.

Сопротивление изоляции бандажей относительно корпуса и удерживаемых ими обмоток должно быть не менее 0,5 МОм.

Машины с номинальным напряжением выше 500 В включаются без сушки, если значение коэффициента абсорбции не менее 1,2.

3) Электродвигатели переменного тока. Допустимое значение сопротивления изоляции обмотки статора с номинальным напря-

жением ниже 1 кВ — не менее 1,0 МОм при температуре 10—30°C; используется мегаомметр на 500/1000 В.

Коэффициент абсорбции не нормируется; измеряется при решении вопроса о необходимости сушки машины и для электродвигателей мощностью более 1 МВт, находящихся в эксплуатации.

4) Силовые трансформаторы и автотрансформаторы. Сопротивление изоляции обмоток измеряется мегаомметром на 2500 В, допустимое значение его нормируется в зависимости от температуры и составляет, в частности, 450 МОм при 10°C и 40 МОм при 70°C.

Сопротивление изоляции сухих трансформаторов при температуре 20—30°C должно быть не менее 100 МОм. Для всех трансформаторов сопротивление изоляции, приведенное к температуре измерений на заводе-изготовителе, должно составлять не менее 50% исходного значения, а tg не должен отличаться в сторону ухудшения более чем на 50%. Измерения должны производиться при температуре обмоток не ниже 10°C.

Измерение сопротивления изоляции доступных стяжных болтов, шпилек, бандажей относительно активной стали, экранов, обмоток производится в случае осмотра активной части. Измеренные значения должны быть не менее 2 МОм, а для ярмовых балок не менее 0,5 МОм. Измерения производятся мегаомметром на напряжение 1000 В.

5) Сборные и соединительные шины. Измеряется сопротивление изоляции подвесных и опорных фарфоровых изоляторов мегаомметром на напряжение 2500 В только при положительной температуре окружающего воздуха. Сопротивление каждого изолятора или каждого элемента многоэлементного изолятора должно быть не менее 300 МОм.

6) Конденсаторы. Мегаомметром на 2500 В измеряется сопротивление изоляции между выводами и относительно корпуса конденсатора.

7) Электрические аппараты, вторичные цепи и электропроводки. Сопротивление изоляции электрических аппаратов и вторичных цепей защит, управления сигнализации и измерения должно быть не менее значений, приведенных в табл. 3.23.

Таблица 3.23

*Допустимые значения сопротивления изоляции*

Испытуемый элемент	Напряжение мегаомметра, В	Наименьшее допустимое сопротивление изоляции, МОм
1. Шины постоянного тока на щитах управления и в распределительных устройствах (при отсоединенных цепях)	500–1000	10
2. Вторичные цепи каждого присоединения и цепи питания приводов и разъединителей <sup>1</sup>	500–1000	1
3. Цепи управления, автоматики, защиты и измерений, а также цепи возбуждения машин постоянного тока, присоединенные к силовым цепям	500–1000	1
4. Вторичные цепи и элементы при питании от отдельного источника или через разделительный трансформатор на напряжение 60 В и ниже <sup>2</sup>	500	0,5
5. Электропроводки, в том числе осветительные сети <sup>3</sup>	1000	0,5
6. Распределительные устройства <sup>4</sup> , щиты и токопроводы (шинопроводы)	500–1000	0,5

<sup>1</sup> Измеряется со всеми присоединенными аппаратами.

<sup>2</sup> Должны быть приняты меры для предотвращения повреждения низковольтных элементов.

<sup>3</sup> Измеряется между каждым проводом и землей и каждой парой проводов.

<sup>4</sup> Каждая секция.

8) Аккумуляторные батареи. Согласно документу РД 34.45-51.300-97 перед заливкой электролита измеряется сопротивление изоляции ошиновки и токоведущих частей батареи мегаомметром на 1000 В. Сопротивление изоляции новой батареи на 110 В должно быть не менее 60 кОм, на 220 В — не менее 150 кОм.

После заливки электролита измерение сопротивления изоляции производится согласно ПУЭ (1.8.38) с помощью вольтметра класс не ниже 1. При полностью снятой нагрузке измеряется напряжение на зажимах батареи и между каждым зажимом и землей. Сопротивление изоляции  $R_x$  вычисляется по формуле

$$R_x = R_q \left( \frac{U}{U_1 + U_2} - 1 \right),$$

где  $R_q$  — внутреннее сопротивление вольтметра;

$U$  — напряжение на зажимах батареи;

$U_1$  и  $U_2$  — напряжение между положительным зажимом и землей и отрицательным зажимом и землей.

Сопротивление изоляции батареи должно быть не менее:

Номинальное напряжение, В.....	24	48	110	220
Сопротивление, кОм.....	60	60	60	150

### 3.7.3. Измерение сопротивления изоляции

#### 3.7.3.1. Применение мегаомметров

Сопротивление изоляции обесточенных цепей и аппаратов производится *мегаомметрами* — специализированными переносными омметрами, предназначенными для измерения больших сопротивлений. Другой особенностью мегаомметров является сравнительно высокое значение напряжения, подаваемого на измерительную цепь. В сетях до 1000 В оно, как правило, существенно превышает номинальное напряжение проверяемого элемента и, таким образом, при измерении сопротивления изоляции мегаомметром в известной степени выполняется также и функция испытания изоляции. Эта функция становится основной, когда испытание изоляции напряжением 1 кВ, 50 Гц заменяется измерением сопротивления изоляции мегаомметром на 2500 В.

Выпускаются мегаомметры на номинальное напряжение 100, 250, 500, 1000 и 2500 В. Эти значения относятся к напряжению холостого хода, т. е. напряжению на разомкнутых зажимах прибора. Напряжение, приложенное к нагрузке, всегда меньше номинального из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении прибора, которое может быть достаточно большим. Действительно, все мегаомметры снабжаются выходным добавочным резистором, ограничивающим ток нагрузки до безопасного значения, — безопасного как для прибора, даже при КЗ на его зажимах, так и для человека при случайном прикосновении к ним. Так, например, при значении ограничивающего сопротивления  $R_{ог} = 1 \text{ МОм}$  максимальный ток мегаомметра на 1000 В не превысит 1 мА: повреждение прибора он не вызовет, а человеком только ощущается. Если таким мегаомметром измеряется, например, сопротивление изоляции, равное 1 МОм, то напряжение на нем составит только половину номинального — 500 В, а на теле человека, прикоснувшегося к зажимам прибора, не более нескольких вольт. Зависи-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

мость выходного напряжения ( $U$  — в процентах номинального) мегаомметра от сопротивления нагрузки ( $R$  — в процентах от конечного значения рабочей части шкалы) для мегаомметров типа М4100 показана на рис. 3.85.

Однако мегаомметр вовсе не является безопасным прибором, как можно было бы заключить из сказанного выше о *непосредственном* прикосновении к его зажимам. Напротив, если от мегаомметра заряжена емкость (электрическая изоляция, конденсатор), то она будет представлять собой источник ЭДС, значение которой равно номинальному напряжению мегаомметра, а внутреннее сопротивление источника сравнительно невелико. Разряд такой емкости на человека может привести к трагическим последствиям. Поэтому Правила безопасности требуют перед началом измерения и после него снять с токоведущих частей объекта остаточный заряд путем их кратковременного заземления (на 2...3 мин). Заземлять объект перед измерением надо еще и потому, что остаточный заряд может исказить результаты измерения; снимать заземление следует только после подключения мегаомметра. При измерениях необходимо пользоваться штатными проводами, входящими в комплект поставки, или гибкими многожильными проводами с усиленной изоляцией (например, типа ПВХ), концы которых присоединены к щупам с изолирующими ручками.

Электрическая прочность и сопротивление изоляции измеряются между электрически не связанными или разъединяющимися цепями, а также между токоведущими и открытыми проводящими частями (корпусом) электрооборудования. Цепи, содержащие микроэлектронные и полупроводниковые элементы, испытательное

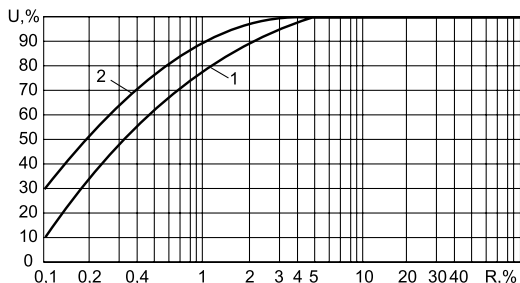


Рис. 3.85. Нагрузочные характеристики мегаомметров серии М4100:  
1 — М4100/1...М4100/4; 2 — М4100/5

напряжение которых ниже приложенного, следует исключить: отсоединить, выпаять или шунтировать. Если номинальное напряжение мегаомметра ниже, чем испытательное для полупроводниковых элементов цепи, сопротивление изоляции цепи измеряют дважды — при различной полярности измерительного напряжения.

На кабеле измеряют сопротивление каждой жилы относительно остальных заземленных. Если при этом получается неудовлетворительный результат, проверяют сопротивление изоляции между каждым двумя фазами и каждой фазой относительно земли.

В сетях освещения мегаомметром на 1000 В измеряется сопротивление изоляции следующих участков цепи:

а) магистральных линий — от сборок 0,4 кВ в ГРЩ, ВРУ до автоматических выключателей распределительных (ЩЭ) или групповых щитов, а также проводников щита;

б) линий от распределительных (этажных) щитов до групповых щитков местного управления (квартирных);

в) линии от автоматических выключателей (предохранителей) местных (групповых) щитков управления (ЩК) до светильников (включая изоляцию самого светильника). Измерение проводят при отключенных автоматических выключателях или снятых предохранителях, между фазным и нулевым проводами, с одной стороны, и проводом РЕ (землей), с другой. В светильниках с лампами накаливания измерение производится при включенных выключателях и вывернутых электролампах, а в светильниках с газоразрядными лампами — со снятыми стартерами.

Показания мегаомметра отсчитывают через 1 мин после приложения к объекту полного испытательного напряжения. Высокой точности при измерении сопротивления изоляции не требуется, достаточно ограничиться погрешностью не более 20%.

Перед использованием мегаомметр необходимо проверить: при разомкнутых зажимах он должен показывать «∞», при замкнутых «0».

#### 3.7.3.2. Устройство и принцип действия мегаомметров

Мегаомметр состоит из источника напряжения, измерительного элемента и дополнительных резисторов. В качестве источника напряжения *индукторных* приборов применяется встроенный электромашинный генератор постоянного тока или генератор переменного тока с выпрямителем. Индуктор приводится во вращение рукояткой, причем номинальное напряжение (ЭДС) генератора



достигается при частоте вращения 120 об/мин; небольшое отклонение от этого значения компенсируется центробежным регулятором. В *электронных* приборах источником напряжения служит преобразователь, питающийся от сети или от химического источника. Если выход измерительного элемента зависит от напряжения питания, источник напряжения дополняется стабилизатором.

В измерительных элементах мегаомметров сопротивление изоляции определяется с использованием закона Ома. По типу преобразования измерительные элементы могут быть линейными, логометрическими, логарифмическими. В качестве измерительного элемента в *последовательной* схеме рис. 3,86а служит вольтметр  $V$ , измеряющий падение напряжения  $U_0$  на образцовом резисторе  $R_0$  от измерительного тока. Разумеется, значение последнего зависит не только от измеряемого сопротивления, но и от напряжения питания  $U$ , и потому приборы такого типа снабжаются стабилизаторами (регуляторами) напряжения.

По последовательной схеме измерения построены мегаомметры серии Ф4102. Питание — от сети или от химических источников тока. Для получения оперативного напряжения нужного значения служит преобразователь, выходное напряжение которого выпрямляется, повышается с помощью умножителя и стабилизируется с помощью компенсационного стабилизатора. В качестве индикаторного прибора применен микроамперметр с электрической установкой нуля.

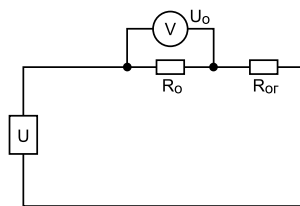
У измерителей *логометрической* системы на одну из рамок логометра подается напряжение измерительной цепи, на другую — напряжение, пропорциональное измеряемому току. Частное от деления пропорционально измеряемому сопротивлению и от колебаний напряжения не зависит. На этом принципе построена схема мегаомметра типа М1101.

*Логарифмические* схемы измерения (рис. 3.86б) содержат два операционных измерителя ( $DA_1$  и  $DA_2$ ) с логарифмической характеристикой, разность выходных сигналов которых пропорциональна логарифму измеряемой величины в соответствии с равенством:

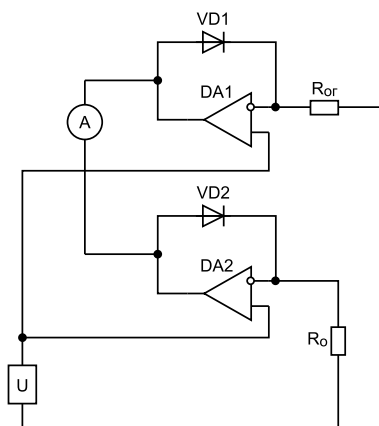
$$\ln R = \ln U/I = \ln U - \ln I.$$

Логарифмическая характеристика обеспечивается посредством диодов  $VD_1$  и  $VD_2$  в цепях обратной связи усилителей  $DA_1$  и  $DA_2$ . Показания прибора  $A$  от напряжения не зависят; шкала прибора — логарифмическая.

### 3.7. Измерение сопротивления изоляции



а)



б)

Рис. 3.86. Принципиальные схемы измерительных элементов мегаомметров: а — последовательная; б — логарифмическая

На этом принципе основана работа мегаомметров типа ЭСО. Питание приборов — от сети или от встроенного электромеханического генератора; частота вращения рукоятки 120—144 об/мин, класс точности 15.

Более подробные технические данные мегаомметров типов Ф410Х и ЭС0202 приведены в табл. 3.24.

Таблица 3.24

Основные данные мегаомметров

Характеристика	Тип мегаомметра					
	Ф4102М/1	Ф4102М/2	Ф4108М/1	Ф4108М/2	ЭС0202/1	ЭС0202/2
Источник питания	Химич., сеть	Химич., сеть	Химич., сеть	Сеть	Генератор, сеть	Генератор, сеть
Ток КЗ, мА	0,5	0,5	1,0	1,0	0,3	0,3
Измерительный элемент	Логарифмический	Логарифмический	Линейный	Линейный	Логарифмический	Логарифмический
Номинальное напряжение, В	100, 500, 1000	1000, 2500	1000, 2500	1000, 2500	100, 250, 500	500, 1000, 2500
Масса, кг	2,1	2,1	2,5	3,2	2,0	2,0

Современные приборы содержат микропроцессор, цифровой дисплей и выполняются многофункциональными; название «мегаомметр» за ними часто не сохраняется, поскольку измерение сопротивления изоляции является лишь одной из их функций. Российская фирма НПФ «Радио-Сервис» выпускает измеритель сопротивления и степени увлажненности изоляции типа Е6-24, которым можно измерить также напряжение переменного тока до 400 В. При измерении сопротивления изоляции в течение 1 мин и более прибор автоматически рассчитывает коэффициент абсорбции и сохраняет полученное значение. В памяти прибора хранятся также результат последнего измерения и значения сопротивления изоляции через 15 и 60 с после начала измерения. Все эти параметры можно последовательно вывести на дисплей.

Прибор снабжен системой защиты от подключения к цепи, находящейся под напряжением, или от внезапной подачи напряжения в цепь во время измерения. Питание прибора осуществляется как от аккумуляторной батареи, так и от сети переменного тока. Прибор автоматически переходит в энергосберегающий режим через 2,5 мин после окончания измерений. В комплект поставки входят измерительные провода на напряжение до 2,5 кВ, аккумулятор и стандартное зарядное устройство к нему. Номинальное напряжение — 500, 1000 и 2500 В, верхний предел измерения сопротивления 10 ГОм, масса не более 1,2 кг.

Аналогичные характеристики имеют мегаомметры М4122.

Практичный и недорогой прибор предлагает фирма «MEGGER» (Англия). Он предназначен для измерения сопротивления

до 1000 МОм под напряжением 250, 500 и 1000 В, а также для измерения сопротивления металlosвязи током не менее 200 мА.

#### 3.7.3.3. Приборы фирмы «SONEL» (Польша)

Эти приборы осуществляют измерение сопротивления изоляции путем подачи на проверяемый объект повышенного напряжения постоянного тока, определения протекающего в измерительной цепи тока и последующего вычисления микропроцессором значения сопротивления. Они рассчитывают также коэффициент абсорбции, измеряют напряжение постоянного и переменного тока, обеспечивают автоматический разряд емкости объекта после окончания измерений.

Измеритель MIC-3 позволяет измерять сопротивление изоляции до 3 ГОм при номинальном напряжении 250, 500 и 1000 В, сопротивление металlosвязи током до 200 мА и активное сопротивление до 400 Ом на низком напряжении.

Прибор MIC-5000 предназначен для проверки электроустановок большой мощности. Он измеряет сопротивление изоляции до 5000 ГОм при номинальном напряжении от 250 до 5000 В.

Ниже рассматривается проведение измерений мегаомметрами типа MIC-1000 и MIC-2500 (рис. 3.87). Эти приборы предназначены для измерения сопротивления изоляции до 110 ГОм (MIC-1000) и 1100 ГОм (MIC-2500), напряжения постоянного и переменного тока до 600 В и измерения сопротивления на постоянном токе до 200 мА. Обеспечивается запоминание 999 результатов измерений и передача данных в компьютер.

До начала измерений необходимо выбрать нужную измерительную функцию и проверить, правильно ли присоединены провода к зажимам прибора, а также убедиться в том, что проверяемый объект отключен от напряжения.

На рис. 3.88 показано подключение прибора для измерения сопротивлений по двухзажимной схеме.

Однако надо иметь в виду, что ток утечки изоляции складывается из тока



Рис. 3.87. Внешний вид прибора MIC-2500

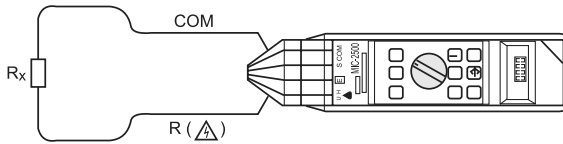


Рис. 3.88. Измерение активных сопротивлений

через изоляционный материал, и тока, протекающего по его поверхности. И если первая составляющая зависит от состояния собственно изоляции как диэлектрика (которая и должна характеризоваться измеряемыми параметрами), то вторая — от чистоты и влажности ее поверхности. Чтобы исключить влияние токов утечки по поверхности изоляции, особенно при работе в сырую погоду, мегаомметр подключают к объекту с использованием зажима

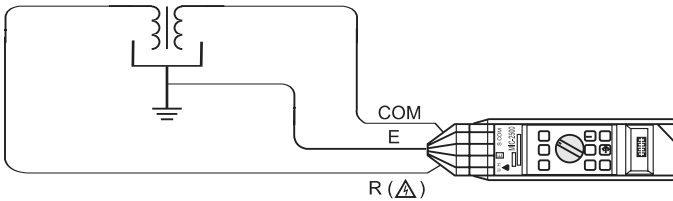


Рис. 3.89. Измерение сопротивления изоляции обмотки трансформатора по трехзажимной схеме

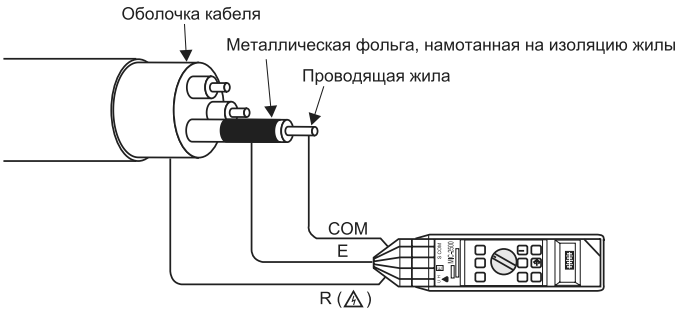


Рис. 3.90. Измерение сопротивления изоляции кабеля по трехзажимной схеме

«экран» (гнездо Е), то есть по трехзажимной схеме. В такой схеме токи утечки по поверхности отводятся в землю, минуя измерительный элемент прибора. Трехзажимную схему часто используют при измерении сопротивления изоляции трансформаторов (рис. 3.89) и кабелей (рис. 3.90).

#### 3.7.4. Испытание электрической прочности изоляции приложением повышенного напряжения в течение 1 мин

1) Синхронные генераторы. Испытанию подвергается каждая фаза или ветвь в отдельности при других фазах или ветвях, соединенных с корпусом. Обмотка статора генератора испытывается напряжением промышленной частоты, значение которого принимается в зависимости от номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ , кВ:

$$0,8 (2 U_{\text{ном}} + 1),$$

но не менее 1,2 кВ. Например, при  $U_{\text{ном}} = 400 \text{ В} = 0,4 \text{ кВ}$  испытательное напряжение должно быть  $0,8 (0,8 + 1) = 1,44 \text{ кВ} = 1440 \text{ В}$ . При номинальном напряжении генератора  $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$  испытательное напряжение должно быть 1200 В.

Обмотка неявнополюсного ротора испытывается напряжением 1,0 кВ, обмотка явнополюсного ротора — напряжением  $8U_{\text{ном}}$  возбуждения генератора, но не ниже 1,2 и не выше 2,8 кВ, цепи возбуждения — 1,0 кВ.

2) Машины постоянного тока. Машины напряжением до 440 В, мощностью до 200 кВт испытывать повышенным напряжением не требуется. Все остальные машины испытываются по следующим нормам:

- обмотка:  $8U_{\text{ном}}$ , но не ниже 1,2 кВ и не выше 2,8 кВ;
- бандажи якоря: 1 кВ;
- реостаты и пускорегулировочные резисторы (можно совместно с цепями возбуждения): 1 кВ.

3) Электродвигатели переменного тока. Испытание обмотки статора производится для каждой фазы в отдельности относительно корпуса и двух других, соединенных с ним. У двигателей, не имеющих выводов каждой фазы в отдельности, допускается производить испытание всей обмотки относительно корпуса. Значения испытательного напряжения:

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

---

- обмотка статора двигателей мощностью от 1 до 1000 кВт при номинальном напряжении, кВ:
  - ниже 0,1.....0,8(2U<sub>НОМ</sub> + 1);
  - выше 0,1..... 0,8(2U<sub>НОМ</sub> + 1), но не менее 1,2;
- обмотка ротора синхронных электродвигателей, замкнутая на резистор или источник питания ..... 8-кратное U<sub>НОМ</sub> системы возбуждения, но не менее 1,2 и не более 2,8;
- обмотка ротора синхронных электродвигателей, замкнутая на резистор или источник питания; реостаты и пускорегулирующие резисторы.....1,5U<sub>р</sub>, но не менее 1,0; U<sub>р</sub> — напряжение на кольцах при разомкнутом неподвижном роторе и номинальном напряжении на статоре;
- резистор гашения поля синхронных двигателей .....2,0.

4) Силовые трансформаторы и автотрансформаторы. Изоляция обмоток испытывается вместе с вводами. Испытание повышенным напряжением изоляции обмоток маслонаполненных трансформаторов не обязательно. Испытание изоляции обмоток сухих трансформаторов обязательно и производится напряжением 2,7 кВ по отношению к корпусу и другим обмоткам.

Импортные трансформаторы разрешается испытывать таким напряжением только в тех случаях, если оно не превышает напряжения, которым данный трансформатор был испытан на заводе.

В случае осмотра активной части производится испытание доступных стяжных шпилек, прессующих колец и ярмовых балок напряжением 1 кВ.

5) Измерительные трансформаторы. Вторичные обмотки измерительных трансформаторов тока и напряжения испытываются напряжением 1 кВ.

6) Ячейки КРУ и КРУН; комплектные токопроводы (шинопроводы) Испытываются напряжением 1 кВ.

7) Конденсаторы. Испытывается изоляция относительно корпуса при закороченных выводах конденсатора. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности с номинальным напряжением до 0,5 кВ испытываются напряжением 2,1 кВ.

8) Электрические аппараты, вторичные цепи и электропроводки. Испытательное напряжение для вторичных цепей схем защиты, управления сигнализации и измерения со всеми присоединительными аппаратами (автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, реле, приборы и т. п.) — 1 кВ.





тически: через контакт КТ1.1 включается пусковое реле КМ и своим контактом КМ.4 подает напряжение на повышающий трансформатор Т. Через контакт КМ.3 реле становится на «самоподхват» и удерживается во включенном положении, а контактом КМ1.1 подается напряжение на динамик НА, сигнализирующий о наличии высокого напряжения. Контакт КМ.2 включает реле времени КТ.2, и через 60 с его контакт КТ2.1 размыкает цепь реле КМ и схема отключается от напряжения. Защита от пробоя или перегрузки осуществляется с помощью датчика тока ВА и реле КА.

## **3.8. Проверка работоспособности устройств автоматического включения резервного питания (АВР)**

### **3.8.1. Общие положения**

#### **3.8.1.1. Назначение**

Устройства автоматического резервного питания (АВР) предназначены для восстановления питания потребителей путем автоматического присоединения резервного источника питания при отключении рабочего источника питания и обесточении электроустановок потребителей. Устройства АВР должны также обеспечивать включение резервного оборудования при отключении рабочего оборудования и нарушении вследствие этого нормального технологического процесса. Эти устройства применяются на трансформаторах, линиях, выключателях, электродвигателях и т. п. и устанавливаются во вводно-распределительных устройствах (ВРУ), пунктах питания систем пожарной сигнализации, пожарных насосных, специальных установок.

#### **3.8.1.2. Требования к АВР**

- Действие АВР должно быть обеспечено при исчезновении напряжения на питаемом элементе по любой причине, в том числе при КЗ.
- Выключатель резервного источника питания должен включаться, как правило, без дополнительной выдержки времени. При этом должны обеспечиваться быстрота и однократность действия АВР.
- Минимальный элемент пускового органа АВР должен быть отстроен от режима самозапуска электродвигателей и от сни-

жения напряжения при удаленных КЗ. Как правило, должна быть исключена ложная работа АВР при перегорании одного из предохранителей или отключении автоматического выключателя в цепи пускового органа.

- Пусковой орган АВР не должен срабатывать при кратковременном снижении напряжения.
- Срабатывание пускового органа должно быть возможно только после отключения рабочего источника от потребителей.
- Когда при действии АВР возможно включение выключателя резервного питания на КЗ, как правило, должно предусматриваться ускорение действия защиты этого выключателя.
- Пусковые органы минимального напряжения не должны действовать при неисправности в цепях напряжения.

#### 3.8.1.3. Поверочный расчет уставок

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения на резервируемых шинах обычно принимается равным или меньшим 25% номинального, так как контролируется не снижение, а исчезновение напряжения.

Уставка реле контроля напряжения на питающих шинах выбирается из условия, чтобы оно не срабатывало при минимальном рабочем напряжении на шинах резервного источника питания:

$$U_{cp} = 0,9 k_B U_{ном} / k_H,$$

где 0,9 — коэффициент запаса;  $k_B$  — коэффициент возврата;  $k_H = 1, 1, \dots, 1, 2$  — коэффициент надежности.

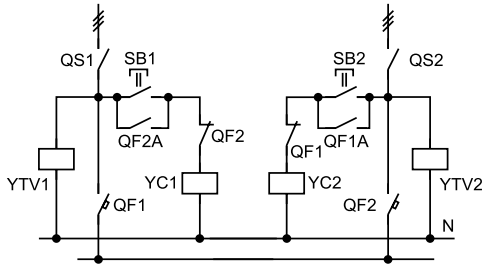
#### 3.8.2. Схемы устройств АВР

Устройства АВР различаются силовым оборудованием и системами управления им. На рис. 3.92 показана схема АВР, построенная на основе автоматического выключателя с электроприводом, минимальным расцепителем и блок-контактом аварийного отключения. Вместо последнего используется также схема несоответствия положения ключа управления и блок-контакта автоматического выключателя.

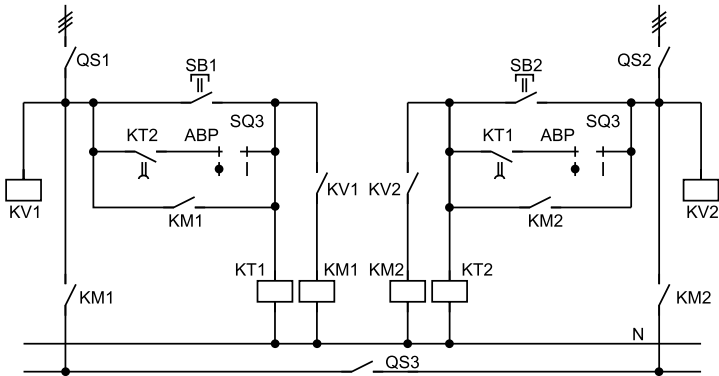
В схеме АВР на рис. 3.93 используются силовые контакторы, реле напряжения и реле времени.

На рис. 3.94 представлена схема АВР с использованием силовых контакторов и ключей управления.

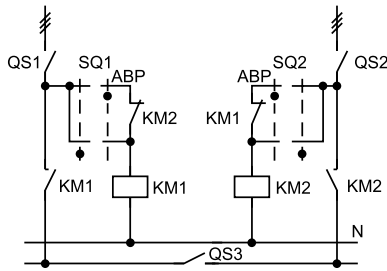
### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств



*Рис. 3.92. Устройство АВР на основе автоматических выключателей: SB1, SB2 — кнопки включения автоматических выключателей QF1, QF2 соответственно; YTV1, YTV2 — катушки расцепителей минимального напряжения выключателей; QF1A, QF2A — блок-контакты аварийного отключения выключателей*



*Рис. 3.93. Устройство АВР с силовыми контакторами, реле напряжения и реле времени: KV1, KV2 — реле контроля напряжения; KT1, KT2 — реле времени с выдержкой времени на отпадание; KM1, KM2 — контакторы на ток до 250 А*



*Рис. 3.94. Устройство АВР с силовыми контакторами и ключами управления: KM1, KM2 — силовые контакторы; SQ1, SQ2 — ключи управления*

#### 3.8.3. Испытания АВР

1) Внешний осмотр. Электрические аппараты, силовые цепи и цепи вторичной коммутации должны быть в исправном состоянии.

2) Измерение сопротивления изоляции. Сопротивление изоляции силовых цепей и цепей управления со всеми присоединенными аппаратами должно быть не менее 0,5 МОм.

3) Испытание повышенным напряжением цепей вторичной коммутации в сборе. Испытание производится напряжением 1000 В, 50 Гц или мегаомметром 2500 В.

4) Измерение сопротивления постоянному току катушек контакторов и реле, независимых и минимальных расцепителей автоматических выключателей. Производится омметром или мультиметром, при этом цепи управления аппаратами отключаются. Измеренное значение сопротивления должно соответствовать заводским данным.

5) Проверка напряжения срабатывания и возврата электрических аппаратов. Пределы срабатывания реле должны соответствовать расчетным данным. В процессе испытаний проверяется регулировка растворов и провалов контактов, отсутствие вибрации магнитопровода электромеханических аппаратов.

6) Проверка работы автоматических выключателей и контакторов при номинальном и пониженном (включение — при 90%, отключение при 80%, по 5 раз) напряжении оперативного тока.

7) Проверка правильности функционирования полностью собранной схемы устройства АВР. Проверка производится при зна-

чениях 100 и 90% напряжения оперативного тока для релейно-контакторных схем и 85, 100 и 110% для бесконтактных схем (табл. 1.8.36) во всех режимах, предусмотренных проектом (режим ввода или запрета АВР, режим восстановления исходной схемы при восстановлении питания и пр.).

При проверке поочередно отключают питание на каждом вводе. Потребители должны быть отключены от шин ВРУ. Для схемы на рис. 3.92 необходимо выполнить поочередное отключение питающих фидеров распределительной подстанции, для схем рис. 3.93 и 3.94 — отключение питания вводными автоматическими выключателями или рубильниками. При этом контролируют:

- последовательность работы элементов схемы;
- наличие (или отсутствие) выдержек времени;
- работу схемы в различных положениях ключей управления;
- работу схемы при имитации перегорания предохранителей (или отключения автоматических выключателей) цепей управления.

#### 3.8.4. Устройства АВР на основе микропроцессоров

В таком устройстве можно реализовать программу с существенно более широкими возможностями выбора уставок по напряжению и времени и набором функций, не ограниченных к тому же областью АВР.

На КТП фирмы Сименс устанавливают устройства сетевой автоматики с использованием программируемого контроллера SIMATIC S7-200, который осуществляет функции АВР, связи с верхним уровнем АСУ системы электроснабжения, сигнализацию состояния коммутационных аппаратов, ведение журнала срабатываний автоматических выключателей др. Устройство позволяет создать несколько вариантов конфигурации сети и уставок расцепителей автоматов, например, при срабатывании АВР снизить уставки защиты от перегрузки для неотвечественных потребителей.

Фирма АББ разработала и выпускает микропроцессорный блок ATSO 10, который выполняет обычные режимы автоматического ввода резерва. В качестве сигнала запуска АВР можно выбрать напряжение одной или трех фаз, частоту. Задают также конфигурацию сети и уставки времени. Светодиодные индикаторы показывают состояние выключателя ввода (рис. 3.95).

### 3.8. Проверка работоспособности устройств

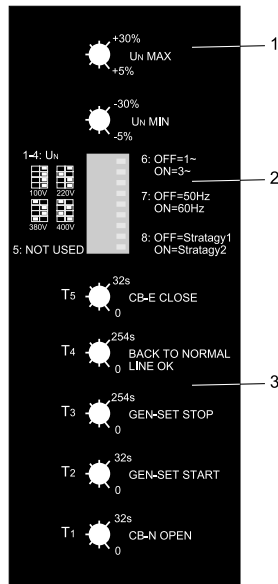


Рис. 3.95. Лицевая панель блока ATSO 10

Контроллер ВА фирмы Мерлен Жерен также позволяет настроить очередность срабатывания и выдержки времени АВР. Элементы настройки и светодиодные индикаторы находятся на лицевой панели контроллера (рис. 3.96, а). На рис. 3.96,б изображена временная диаграмма работы АВР. Блок обеспечивает выдержку вре-

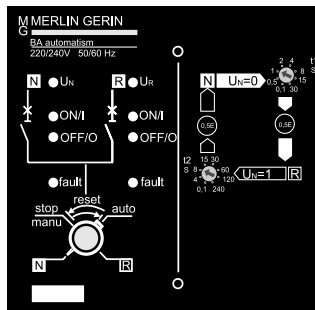


Рис. 3.96,а. Лицевая панель контроллера ВА

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

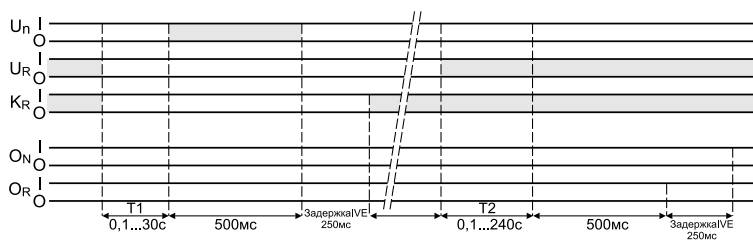


Рис. 3.96.б. Временная диаграмма работы контроллера ВА. Входы:  $U_n$ ,  $U_R$  — напряжения основного и резервного питания;  $K_m$  — команда принудительного ввода резерва;  $K_R$  — дополнительная проверка перед переключением питания. Выходы:  $Q_N$ ,  $Q_R$  — выключатели основной и резервной линий

мени в интервале от пропадания основного питания до отключения основной линии  $T1 = 0,1...30$  с, выдержку времени от восстановления основного питания до отключения резервной линии  $T2 = 0,1...240$  с, задержки на собственное время отключения автоматического выключателя 250 мс.

## 3.9. Компенсация реактивной мощности

### 3.9.1. Назначение

Для работы большинства электроприемников требуется не только активная, но и реактивная мощность. Активная мощность поступает из сети и необратимо расходуется в нагрузке, реактивная же в течение одной половины периода переменного тока передается из сети в нагрузку, а в другой полупериод возвращается в сеть. При индуктивном характере нагрузки, когда ток отстает по фазе от напряжения, реактивная мощность считается положительной, если же в цепи преобладает емкость и ток опережает напряжение, реактивная мощность имеет отрицательное значение.

Потребление положительной реактивной мощности обусловлено, в первую очередь, естественными физическими свойствами электроустановок, в которых для преобразования энергии используются магнитные поля (трансформаторы, электродвигатели и т. п.). В преобразователях с управляемыми вентилями фазный сдвиг создается искусственно — он тем больше, чем больше угол отпаирания вентилей, а так как при этом ток отстает от напряже-

ния, устройства с вентильными преобразователями представляют собой эквивалент индуктивной нагрузки. То же относится и к таким электроустановкам, как дуговые печи, люминесцентные светильники и т. п., в которых ток начинает протекать лишь в момент, когда мгновенное напряжение достигает определенного порогового значения. Численно фазный сдвиг  $\varphi$  оценивается функциями  $\cos\varphi$  или (реже)  $\operatorname{tg}\varphi$ : чем больше доля реактивной мощности, тем меньше коэффициент мощности  $\cos\varphi$ .

Кроме создания индуктивной составляющей мощности, нелинейная нагрузка (в том числе «порогового» характера) искажает форму кривой тока, вызывая появление так наз. *гармонических составляющих*. Как известно, периодическая (гармоническая) функция несинусоидальной формы с частотой  $\omega$  может быть представлена в виде суммы синусоидальных функций (ряд Фурье) с частотой  $k\omega$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Их так и называют — первая, вторая и т. д. гармоники ( $k = 0$  — постоянная составляющая). Для них сопротивление конденсатора в  $k$  раз меньше, чем для основной гармоники с частотой  $\omega$ :  $x_c = 1/k\omega C$ . И хотя, как правило, амплитуда этих составляющих уменьшается с номером гармоники, высшие гармонические могут быть сопоставимы по значению с током основной гармоники или даже превышать его. Прохождение токов повышенной частоты является одной из главных причин перегрева и повреждения конденсатора, сокращения его срока службы.

*Конденсаторные установки* потребляют отрицательную реактивную мощность. Когда в цепи присутствуют и индуктивность, и емкость, то оба вида реактивной мощности, имеющие противоположные знаки, в той или иной степени компенсируют друг друга. Если при этом реакция цепи остается индуктивной, то говорят о недокомпенсации, а преобладание емкостной составляющей мощности называют перекомпенсацией. Таким образом, компенсирующая установка отдает (полностью или частично) в сеть реактивную мощность, потребляемую двигателями, трансформаторами и т. п. При этом коэффициент мощности повышается и в пределе может достигать 1 (полная компенсация).

Несмотря на то, что реактивная мощность, в отличие от активной, непосредственно не расходуется, а только участвует в процессе обмена между источником питания и нагрузкой, она бесполезно загружает сеть, снижая пропускную способность и вызывая дополнительные активные потери в проводниках и падение напряжения у потребителя. Пусть, например, предприятие по-



требляет ток 5 кА, активная составляющая которого составляет 4 кА, а реактивная 3 кА ( $\cos\varphi = 0,8$ ). Это значит, что по сети дополнительно протекает ток  $5 - 4 = 1$  кА, т. е. пропускная способность сети уменьшается на  $1/4 = 25\%$  и на столько же увеличивается падение напряжения в ней, а потери активной мощности возрастают на  $(5^2 - 4^2)/4^2 = 9/16 = 56\%$  по сравнению с режимом передачи тока 4 кА, совершающего полезную работу. Недокомпенсация вынуждает завышать установленную мощность трансформаторов и сечение проводников сети. Поскольку потери в низковольтной сети отражаются соответственно и на стороне высшего напряжения, энергоснабжающая организация штрафует потребителя за низкий коэффициент мощности. По этим причинам компенсация реактивной мощности является актуальной задачей для каждого предприятия.

Компенсирующая реактивная мощность может «поставляться» не только конденсаторами, но и синхронными машинами. При работе в режиме *синхронного компенсатора* такая машина представляет собой ненагруженный синхронный двигатель, работающий с перевозбуждением и потребляющий из сети емкостный ток. Реактивную мощность генерирует также перевозбужденный *синхронный двигатель* под нагрузкой, от которой и зависит отдаваемая реактивная мощность. Однако применение этих машин в низковольтных сетях экономически невыгодно. Наиболее распространенным средством компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения до 1000 В являются конденсаторные установки.

#### 3.9.2. Требования ПУЭ

*Конденсаторная установка* (КУ) состоит из конденсаторов, вспомогательного оборудования (выключателей, разрядных резисторов, устройств регулирования, защиты и пр.) и ошиновки. Группа единичных конденсаторов, электрически связанных между собой, называется *конденсаторной батареей*. КУ может состоять из одной или нескольких батарей или конденсаторов. Требования ПУЭ-6, гл. 5.6 распространяются на КУ, присоединяемые параллельно индуктивным элементам электрических систем переменного тока частотой 50 Гц и предназначенные для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.

Конденсаторные батареи должны собираться из конденсаторов с номинальным напряжением, равным номинальному напряжению сети. Может применяться последовательное или последовательное

льно-параллельное соединение однофазных конденсаторов в каждой фазе трехфазной батареи.

Конденсаторы должны иметь разрядные устройства. Последние могут не устанавливаться на батареях, присоединенных к сети через трансформатор без коммутационных аппаратов. В качестве разрядных могут применяться устройства с активным или активно-индуктивным сопротивлением.

В сетях с переменным графиком реактивной нагрузки должно применяться автоматическое регулирование мощности конденсаторной батареи путем включения и отключения ее в целом или отдельных ее частей.

КУ должны иметь защиту от токов КЗ, действующую на отключение без выдержки времени и отстроенную от бросков тока. Защита от повышения напряжения должна отключать КУ с выдержкой времени 3...5 мин. Повторное включение КУ допускается не ранее чем через 5 мин после отключения.

Емкости фаз КУ должны контролироваться стационарными устройствами измерения тока в каждой фазе. Для КУ мощностью до 400 квар допускается измерение тока только в одной фазе.

КУ, находящиеся в общем помещении, должны иметь сетчатые ограждения или защитные кожухи. Расстояние между единичными конденсаторами должно быть не менее 50 мм. Соединение выводов конденсаторов между собой и присоединение их к шинам должны выполняться гибкими перемычками. Вспомогательные устройства могут устанавливаться в одном помещении с конденсаторами.

#### 3.9.3. Виды и способы компенсации

Структурно с помощью КУ обеспечиваются следующие виды компенсации (рис. 3.95).

- Индивидуальная (нерегулируемая). КУ размещается непосредственно у электроприемника и коммутируется вместе с ним (рис. 3.95а). Преимущество — простота, недостаток — зависимость от времени работы электроприемника.
- Групповая (нерегулируемая). КУ — общая для нескольких индуктивных нагрузок, присоединенных к одному распределительному устройству (рис. 3.95б). Чем больше нагрузок включено одновременно, тем выше эффективность компен-

### 3. Испытания типовых цепей и элементов устройств

сации. Недостатки — раздельная коммутация КУ и нагрузки и неполная разгрузка сетей от реактивной мощности.

- Централизованная (как правило, регулируемая). Применяется при нагрузке с широким диапазоном изменения реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности производится в соответствии с ее фактическим потреблением. Недостаток — удорожание вспомогательной аппаратуры (рис. 3.95б).

Автоматическое регулирование может осуществляться в функции напряжения у потребителя, тока нагрузки, коэффициента

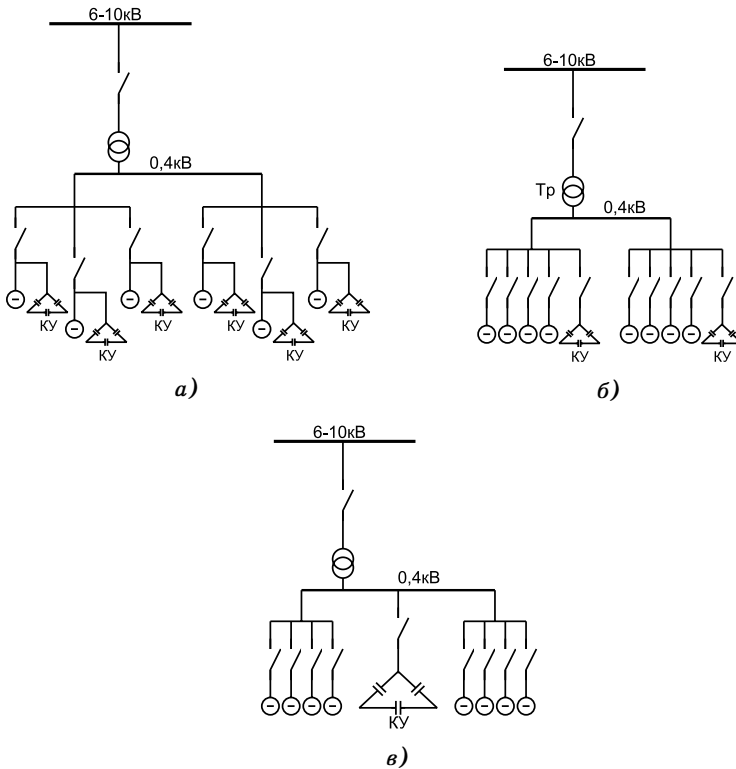


Рис. 3.95. Виды компенсации реактивной мощности: а — индивидуальная; б — групповая; в — централизованная

мощности. Применяется также управление по заданной программе, например, с помощью электрических часов.

Способы регулирования мощности КУ можно подразделить на три группы:

- ступенчатое регулирование путем включения или отключения отдельных секций КУ или изменения схемы соединения;
- плавное изменение реактивной мощности с помощью специальных устройств, например, с использованием управляемых полупроводниковых вентилялей;
- регулирование путем изменения индуктивности, включенной параллельно или последовательно с емкостью.

В качестве коммутационных аппаратов для изменения числа рабочих секций наиболее целесообразно использование управляемых полупроводниковых вентилялей. Тиристорные выключатели допускают большое число срабатываний, позволяют снизить броски тока при включении, исключить переходный процесс при отключении и сократить время включения и отключения КУ. Наиболее благоприятным моментом для включения конденсаторов является переход через нуль напряжения сети, для отключения — переход тока через нулевое значение.

Силовые управляемые полупроводниковые вентиляли, в частности, тиристоры, позволяют и плавно изменять ток, а следовательно и реактивную мощность КУ. Изменение значения протекающего тока достигается изменением угла проводимости (времени открытого состояния) вентилялей: чем меньше угол проводимости, тем меньше значение тока, протекающего через КУ. Чтобы расширить пределы регулирования, применяют искусственную коммутацию вентилялей, для чего параллельно КУ подключают сторонний источник импульсов тока. Существенным недостатком такого регулятора является искажение формы кривой тока, тем более сильное, чем меньше угол проводимости.

Наиболее высокое качество регулирования достигается применением постоянно включенных конденсаторов и управляемых реакторов.

Методика наладки устройств компенсации реактивной мощности зависит от их конкретного исполнения и обычно указывается фирмой-изготовителем. Ниже приводятся конкретные данные некоторых КУ отечественного и зарубежного производства.

#### 3.9.4. Конденсаторные установки производства ООО «ДИАЛ-Энерго»

Выпускаются КУ единичной мощности от 5 до 2000 квар.

УК — нерегулируемые конденсаторные установки, предназначенные для повышения коэффициента мощности электроприемников с постоянным потреблением реактивной мощности (индивидуальная и групповая компенсация).

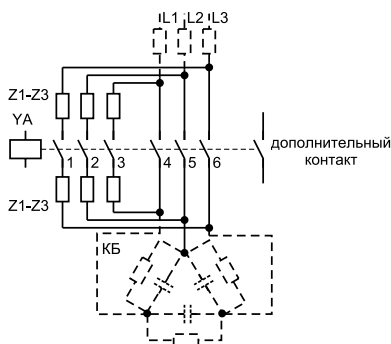
Автоматизированные конденсаторные установки АКУ с пошаговым (ступенчатым) регулированием предназначены для повышения коэффициента мощности нагрузок с широким диапазоном потребления реактивной мощности (централизованная компенсация). Каждая АКУ комплектуется регулятором, подключенным к компенсируемой сети и отслеживающим потребление реактивной мощности. По командам, поступающим от регулятора, АКУ автоматически производит подключение конденсаторов необходимой емкости. Для управления ступенями используются специальные электромеханические контакторы. Защита устройств разряда и конденсаторов осуществляется предохранителями.

Автоматизированные КУ со ступенчатой коммутацией реактивной мощности тиристорными коммутаторами АКУТ предназначены для быстрой коррекции коэффициента мощности в широком диапазоне изменения реактивной мощности. Между выходами тиристорных ключей и секциями конденсаторов устанавливаются токоограничивающие дроссели.

Поскольку естественный саморазряд конденсаторов после их отключения происходит медленно, они оборудуются индивидуальными разрядными устройствами. Время разряда от пикового значения номинального напряжения сети  $U_n$  до 10%  $U_n$  не должно превышать 180 с. Разрядные устройства могут содержать резисторы или специальные дроссели. Потери в последних значительно ниже, чем в резисторах, так как в режиме работы с сетью (на переменном токе) преобладающее значение имеет индуктивное сопротивление дросселя, а при отключении ступени разряд происходит по цепи постоянного (однополярного) тока на малое омическое сопротивление обмоток дросселя. Это обстоятельство способствует также и сокращению времени разряда. Однако использовать разрядные дроссели можно только при коммутации ступеней электромеханическими контактами.

Работа автоматизированных КУ характеризуется частыми переключениями ступеней регулирования и большими бросками тока

(до 200 и даже 300 раз больше номинального), особенно при разряде ранее подключенных батарей на конденсаторы присоединяемой ступени. Для коммутации ступеней в таких КУ применяются специальные электромеханические контакторы, называемые *конденсаторными контакторами*, которые одновременно осуществляют ограничение пусковых токов и гашение дуги. В отличие от обычных контакторов они снабжены вспомогательными контактами, установленными параллельно основным (рис. 3.96).



**Рис. 3.96.** Принципиальная схема подключения конденсаторного контактора: 4, 5, 6 — основные контакты; 1, 2, 3 — вспомогательные контакты; YA — электромагнит; Z1-Z3 — токоограничивающие элементы

К вспомогательным контактам с обеих сторон подключены последовательно токоограничивающие элементы в виде нескольких витков провода или комплекта резисторов. Якорь электромагнита одновременно приводит в действие обе группы контактов, но из-за меньшего раствора вспомогательные контакты замыкаются раньше основных и пропускают пусковой ток, а сопротивления Z1-Z3 ограничивают его значение. Через несколько миллисекунд замыкаются основные контакты, а вспомогательные размыкаются.

Применение *электромеханических контакторов* ограничивается областью стабильных нагрузок из-за задержки переключения ступеней (около 60 с) и отстройки от колебаний реактивной мощности. При резкопеременном характере изменения реактивной мощности, потребляемой в электросетях такого технологического оборудования, как кузнечно-прессовое, сварочное, подъемно-транспортное и т. п., применяется так наз. *динамическая компенсация*. Здесь вместо

электромеханических используются тиристорные контакторы и электронные регуляторы мощности. Включение полупроводниковых ключей происходит при равенстве мгновенных значений напряжений фаз конденсаторных батарей и линейных напряжений сети при двухфазном включении контакторов или фазных напряжений — при трех тиристорных ключах, а отключение — в момент, близкий к переходу фазных токов батареи через нулевое значение. Это позволяет включать несколько ступеней КУ с малым временем задержки и быстро достичь необходимого значения реактивной мощности, а броски тока при этом свести к минимуму. Благодаря разрядным резисторам с малым сопротивлением время разряда КБ и переключения ступеней не превышает 30 мс.

*Тиристорные контакторы* снабжены встроенной системой самоконтроля температуры внутри контактора и схемой измерения тока и напряжения КУ. В случае превышения допустимых пределов значений этих параметров контактор блокируется, срабатывает его аварийное реле и выдает предупреждение о сбое в работе. Текущее состояние контактора отображается светодиодной индикацией на передней стороне корпуса, уставки и измеренные значения параметров — на встроенном дисплее. Максимальная токовая защита осуществляется быстродействующими предохранителями.

*Автоматические регуляторы* реактивной мощности, устанавливаемые в АКУ, производят дискретный автоматический подбор емкостной мощности ступеней, необходимой для компенсации индуктивной мощности сети. Современные регуляторы имеют микропроцессорную базу и действуют в функции значения угла фазного сдвига в одной из фаз компенсируемой сети. Встроенная схема измерения определяет значение коэффициента мощности и сравнивают его с предварительно заданной уставкой. При наличии отклонения регулятор подбирает значение необходимой мощности компенсации, в соответствии с установленным кодом включения ступеней, и выдает команду на включение или отключение ступеней. Подключение регулятора к компенсируемой сети может производиться как непосредственно на напряжение фазы, одноименной с фазой установки трансформатора тока, так и на линейное напряжение противоположных фаз. За счет оптимизации подключения ступеней заданное на регуляторе значение  $\cos$  достигается минимальным числом переключений конденсаторов. При отключении питания регулятора сохраняются данные текущих настроек, а также пиковые значения измеренных параметров. Воз-

можно считывание этой информации с регулятора и передача ее через интерфейс на компьютер. Все модификации регуляторов допускают переход с автоматического на ручной режим работы, что особенно важно для проведения тестовых операций.

Принцип работы заключается в том, что одноканальная измерительная система определяет реактивную составляющую и полный ток в компенсируемой сети и по этим данным регулятор вычисляет значение фазового сдвига между основными гармониками тока и напряжения для сравнения с заданной уставкой коэффициента мощности.

Основные функциональные возможности регулятора «Prophi»:

- Измерение параметров сети  $U$ ,  $I$ ,  $f$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $\cos$ , тока и напряжения нечетных гармоник с 1 по 19;
- Показания значений токов конденсаторов;
- Установка времени разряда в диапазоне 0...120 с;
- Определение числа секций и мощности подключаемых батарей;
- Задание времени паузы коммутации конденсаторных батарей в диапазоне от 0 до 1200 с;
- Аварийное отключение при перегреве;
- Управление тиристорными контакторами;
- Задание уставки требуемого  $\cos$  в диапазоне 0,80 (емк.)...1,0...0,80 (инд.);
- Аварийное реле срабатывает в следующих случаях:
  - недостаточное напряжение (ниже 80% номинального);
  - перенапряжение (выше 110%);
  - недокомпенсация. Если требуемый уровень реактивной мощности не был достигнут в течение часа, аварийное реле размыкает свой контакт не менее чем на 1 мин.;
  - слишком малый (от 0 до 28%) или слишком большой (от 50 до 120%) измерительный ток;
  - превышение предела уровня гармонических искажений — защита от перегрева конденсаторов;
  - превышение температуры внутри регулятора.

#### 3.9.5. Конденсаторные установки фирмы «Twelve Electric» (Польша)

Конденсаторные установки типа ВК-Т-95 изготавливаются в виде шкафов как наружного, так и внутреннего исполнения. Они комплектуются экологически безопасными сухими конденсаторами и



автоматическими регуляторами реактивной мощности MRM-12. Все установки оборудованы защитой от перенапряжения и сверхтоков (предохранители).

Основным элементом конденсаторов является прокладка из полипропиленовой пленки (диэлектрик), покрытая тонким слоем металла, который образует обкладки конденсатора. Срок службы пленки составляет от 30 до 100 тыс. часов. Она размещается в герметически закрытом алюминиевом стакане, удобном для монтажа.

Работа конденсатора при температуре выше указанной производителем приводит к снижению срока службы и уменьшению емкости конденсатора, возможно и повреждение диэлектрика. Причинами превышения температуры могут быть высокая температура окружающей среды и прохождение тока больше номинального, что, в свою очередь, вызывается наличием в токе высших гармонических 5, 7, 9 порядка и более. К клеммам однофазных конденсаторов подсоединены разрядные резисторы, обеспечивающие снижение напряжения до 50 В по истечении 1 мин после отключения конденсатора.

Регулятор MRM-12, построенный на базе микропроцессора, позволяет минимизировать количество переключений, оптимально использовать конденсаторные батареи и автоматизировать процесс компенсации реактивной мощности. Исполнение в версиях от 6 до 15 выходов и быстродействие (от 1 с) дают возможность скомпенсировать реактивную мощность с большой точностью до значения  $\text{tg}\varphi = 0,15$  ( $\text{cos}\varphi = 0,99$ ). Это практически исключает плату за реактивную электроэнергию и уменьшает на 3...7% оплату расхода активной энергии.

К регулятору подводится напряжение фаз В и С и ток от трансформатора тока, установленного в фазе А. По значениям этих параметров микропроцессор вычисляет реактивную мощность нагрузки в сети потребителя и ее знак и принимает решение о включении или отключении соответствующей секции конденсаторов. Изменение состояния управляемых выходов регулятора (ВКЛ, ВЫКЛ) наступает в соответствии с установленным временем реакции и характером нагрузки (индуктивным или емкостным). Так, уставки ВКЛ = 10, ВЫКЛ = 8, ВЫКЛ<sub>емк</sub> = 2 означают, что секция будет включаться через 10 с, а отключаться через 8 с при индуктивной нагрузке и через 2 с при емкостной. Такая скорость включения будет сохраняться до тех пор, пока характер нагрузки не изменится с емкостного на индуктивный.

Выдержки времени коммутации должны быть выбраны так, чтобы оптимальным образом соответствовать величине и скорости изменений реактивной мощности. Устанавливая малое время реакции, можно получить быструю компенсацию, но при этом может возникнуть необходимость повторного включения секции, которая не успела разрядиться. С точки зрения долговечности работы конденсаторов это недопустимо, а с другой стороны, длительное ожидание разрядки замедляет процесс регулирования. Поэтому окончательно значение времени реакции следует установить через некоторое время наблюдения за работой конденсаторов в конкретной системе электроснабжения.

Система управления контролирует возможность повторного включения секции и не включит ее преждевременно, до истечения времени полной разрядки (около 45 с). Благодаря высокой чувствительности измерительной системы компенсация возможна даже при малых токах нагрузки (50 мА во вторичной цепи трансформатора тока). Исполнительными элементами являются электромеханические контакторы.

Основным параметром настройки регулятора является отношение  $Q/n$ , где  $Q$  — значение емкости конденсатора, установленного в первой ступени;  $n$  — коэффициент трансформации трансформатора тока. Этот параметр устанавливает ширину зоны нечувствительности регулятора и оказывает решающее влияние на эффективность компенсации. В данном случае, например, при  $Q = 10$  квар,  $n = 100$  (500/5) отношение  $Q/n = 0,10$  при напряжении 400 В и 0,38 при 100 В. Настройка «%  $Q/n$ » отвечает за смещение центра ширины зоны нечувствительности. Увеличение этого параметра вызывает смещение порогов реакции регулятора в сторону индуктивной мощности. Параметр « $\cos\varphi$ » устанавливает заданный коэффициент мощности. Два последних параметра используются для настройки по реактивной мощности, которая целесообразна для небольших нагрузок. Регулирование по  $\cos\varphi$  целесообразно применять при больших нагрузках. Применяя комбинации указанных настроек, можно получить наиболее эффективную компенсацию для конкретной системы. Время реакции подбирают экспериментально, имея при этом в виду, что перекомпенсация намного хуже, чем недокомпенсация.

Предусмотрено семь режимов включения конденсаторов, учитывающие мощности используемых секций и условия их работы. Во всех режимах обязательным требованием является то, чтобы ряд

значений мощности последующих секций был неубывающим, а значение мощности очередной секции было не более чем в 2 раза больше предыдущей в ряду. Основным и наиболее универсальным является режим №1. В этом режиме включение и отключение секций начинается с самой меньшей и происходит в возрастающем порядке. В случае, если конденсатор секции не успевает разрядиться к моменту, когда подошла очередь его включения, регулятор выдаст команду на включение только по истечении времени, необходимого на его разрядку плюс заданное время реакции ВКЛ. Режим обеспечивает быстрое достижение состояния компенсации, рекомендуется для ряда мощностей секций в соотношении 1: 2: 4: 8 и т. д. Остальные режимы являются модификацией данного режима.

#### 3.9.6. Регуляторы коэффициента мощности типа NOVAR (Чехия)

Автоматические регуляторы Novar позволяют оптимизировать управление компенсацией реактивной мощности. Измерительные приборы показывают значения напряжения и тока, а также производят цифровую обработку измеренных данных для расчета среднеквадратичных значений этих величин и коэффициента мощности. Вычисляется основная гармоника активной и реактивной составляющих тока по алгоритму FFT («быстрое преобразование Фурье») и аналогично — основная гармоника напряжения, что позволяет обеспечить точное измерение и управление даже при искажении сигналов высшими гармоническими. При измерении тока гармонические составляющие рассчитываются до 19-й включительно.

Регулятор автоматически обнаруживает как конфигурацию соединения, так и номинал каждой включенной секции. Возможен также ввод этих параметров вручную. Быстродействие регулятора зависит от величины отклонения и его знака (недокомпенсация или перекомпенсация). Включение или отключение конденсаторов осуществляется таким образом, что оптимальное условие компенсации достигается одним управляющим воздействием при минимальном количестве включенных секций. Предпочтительно выбираются те секции, которые были отключены самое продолжительное время и остаточный заряд которых поэтому минимален.

Регулятор имеет релейный выход сигнала тревоги в нештатных ситуациях, таких как снижение тока, сверхток, ошибка измерения напряжения, превышение порога нелинейного искажения, перекомпенсация или недокомпенсация, выход из строя секции и др.

Если содержание высших гармонических тока превышает допустимый уровень, регулятор отключает все компенсирующие секции во избежание перегрева и повреждения конденсаторов. Для коррекции коэффициента мощности возможно наряду с конденсаторами подключить дроссели.

Информация на числовом дисплее может быть разделена на три группы:

- Текущие значения параметров в главных цепях, таких как коэффициент мощности, уровень гармоник тока (ТНД,%) и др. После нажатия кнопки (измерение) показываются значения активной и реактивной составляющих основной гармоники тока; кратковременно индицируются номер высшей гармоники и затем значение тока этой гармоники в процентах от основной. Для индикации выбраны гармоники 3, 5, 7, 11, 13 и 17-я, так как они встречаются чаще и имеют более высокие значения по сравнению с другими.
- Параметры регулятора. Это — параметры, определяющие функции регулятора (заданный коэффициент мощности, период регулирования и др.), указывающие его текущее состояние (тревожная сигнализация, ошибки, время регулирования) и параметры силовой цепи и регулятора. Ограничиваются предельные значения параметров силовой цепи (минимальный коэффициент мощности, максимальный ТНД, число включений каждой секции).
- Сообщения об ошибках.

Помимо числового дисплея и сопутствующих светодиодам, на передней панели регулятора имеются еще несколько светодиодов, показывающих:

- состояние выходов. Постоянное свечение диодов означает замкнутое состояние контактов соответствующего выходного реле, мигание — регулятор ожидает истечения времени задержки;
- отклонение. Эти светодиоды показывают отклонение текущего значения реактивной мощности от оптимального, соответствующего заданному значению коэффициента мощности. Если отклонение меньше, чем половина реактивной мощности наименьшего конденсатора, светодиоды не горят.
- ручной режим — мигание светодиода. Если он не горит — значит, регулятор находится в режиме регулирования или выполняет иные функции.

- обратное направление мощности. Если он не излучает, мощность поступает от источника питания, если он горит — в противоположном направлении.
- тревожная сигнализация. Если контакт выходного реле тревоги закрыт, светодиод мигает.

Работой регулятора управляет ряд параметров, перечисленных ниже.

#### 1) Уставки

Редактирование параметра — изменение значений некоторых параметров, например, установленных по умолчанию, с целью достижения оптимальных результатов. Выполнение операции может быть заблокировано предварительным введением пароля.

Выходной коэффициент мощности — устанавливается в диапазоне от 0,80 инд. до 0,80 емк.

Время регулирования при недокомпенсации или перекомпенсации — в диапазоне от 5 с до 20 мин. Значение уставки определяет частоту повторения регулирующего воздействия при отклонении регулируемой величины.

Коэффициент трансформации трансформатора тока — от 5 до 9950 А на его первичной стороне, 1 или 5 А на вторичной.

Время задержки восстановления соединения — гарантирует достаточный разряд емкости секции до восстановления соединения, от 5 с до 20 мин.

Напряжение измерения — фазное или линейное.

Отбор напряжения на противоположной стороне питающего трансформатора. Если сигналы напряжения и тока снимаются с противоположных сторон силового трансформатора, необходимо в первую очередь учитывать группу соединений трансформатора.

Автоматическое распознавание тока секции. Регуляторы поставляются с настройкой по умолчанию на выполнение этого процесса. При необходимости он может быть заблокирован.

Программа переключения и наименьшее значение тока секции. Если автоматическое распознавание тока секции заблокировано, можно ввести значение емкости каждой секции, использующей эти параметры.

Число конденсаторов. Если токи конденсаторов вводятся вручную, то необходимо также ввести число конденсаторов.

Токи секций. Каждый выходной ток компенсации может быть отредактирован в боковой ветви этого параметра. Показываются

либо реальный ток в силовой цепи, либо вторичный ток трансформатора тока. Секционные токи могут быть изменены независимо от того, в каком режиме они были введены.

Постоянно включенные секции. Любой выход регулятора (и соответствующая секция) может быть постоянно включен или выключен и в процессе регулирования не использоваться. Постоянно включенная секция отключается только в случае, если в течение определенного времени будет превышен предел ТНД.

Предельный коэффициент мощности для регулирования дросселями. Этот параметр определяет значение коэффициента мощности, при котором регулятор вступает в действие, используя, кроме емкостных, также и секции с дросселями.

Настройка тревожной сигнализации. Имеется два типа функций тревожной сигнализации: индикация неисправностей и аварийные действия. Первая указывает нештатные условия регулирования, вторая осуществляет вмешательство в процесс регулирования при определенных нестандартных ситуациях, особенно прерывание регулирования с последующим отключением секции.

Предел гармоника искажения и предел числа операций переключения. Ток ТНД показывается в процентах в диапазоне от 0,5 до 300%, предел числа операций переключения — в тысячах операций, в диапазоне от 10 тыс. до 2 млн. операций.

Экстремальные значения параметров силовой цепи. Записываются минимум коэффициента мощности и максимальный уровень гармонических составляющих тока (1, 3, 5, 7, 11, 13 и 17-й). Если эти значения отличаются от заданных и это состояние продолжается более 1 мин, последняя запись стирается и фиксируется новое значение.

Число присоединений и отсоединений секций. Число показывается в тысячах, но можно рассмотреть его с точностью до единиц.

Тип ошибки регулятора. Регулятор периодически выполняет самодиагностику и, если код ошибки отличается от нуля, регулятор идентифицирует ее.

Время регулирования. Отслеживается для оптимизации уставки параметра регулятора. Отсчитывается время до следующего вмешательства регулятора.

#### 2) Уточнение значения секции

Если регулятор устанавливается на автоматическое обнаружение тока секции, он будет выполнять эту функцию каждый раз после отключения электропитания или инициализации. После за-

вершения процесса распознавания регулятор записывает все измеренные токи и начинает процесс регулирования. Все измеренные токи рассматриваются как «еще не точные». Рассчитывается среднее значение для каждой секции и по получении примерно 100 данных перезаписывает первоначальное значение, которое было получено при автоматическом обнаружении. Теперь он рассматривает секцию как «точную» и прекращает дальнейшее уточнение. Для дроссельных секций уточнение не производится. В процессе регулирования уточнение начинается в том случае, если разность значений компенсирующей емкости и измеренной при автоматическом обнаружении превышает интервал от половины до двойного значения величины, записанной в регуляторе. Изменение компенсирующей емкости может быть следствием увлажнения или старения конденсатора, формовки его после монтажа и пр.

#### 3) Индикация дефектной секции и повреждений

В настройке тревожной сигнализации можно выбрать индикацию неисправностей или функцию действия при обнаружении поврежденной секции. Регулятор непрерывно проверяет изменение реактивного тока в главной цепи при включении и отключении секции. Когда соответствующего изменения реактивного тока при этом не происходит, он отсоединяет секцию как неисправную, если установлена функция аварийного воздействия, или только запустит сигнализацию, если эта функция не установлена. Блокированная секция периодически, примерно раз в пять дней, проверяется включением ее в процесс регулирования на одну операцию переключения и, если реакция главной цепи оказывается в пределах нормы, остается в автоматическом режиме работы. Дроссельные секции аналогичной проверке не подвергаются.

#### 4) Регулирование индуктивностью

Реализуется установкой предельного значения индуктивного коэффициента мощности. Индуктивность включается в следующей ситуации: регулятор отключил все емкостные секции, но коэффициент мощности все еще более емкостный, чем требуется; это состояние продолжается в пять раз дольше, чем время регулирования перекомпенсации; если подключение дросселя не приведет к большой недокомпенсации.

#### 5) Ручной режим

Позволяет проверить функционирование каждой компенсирующей секции или исключить режим автоматического регулирования

ния на длительное время. Наблюдать или редактировать параметры регулирования в ручном режиме нельзя. Секцию можно подсоединить или отсоединить вручную не только в ручном режиме, но и в процессе регулирования.

#### б) Инициализация регулятора

Позволяет вернуть регулятор к настройке по умолчанию, как при поставке. При этом регулятор выполняет те же функции, что и с подачей напряжения питания. После инициализации ручной режим оканчивается и регулятор устанавливается в автоматический режим.

В продолжение срока службы регуляторы Novar специального технического обслуживания не требуют.

#### 3.9.7. Регуляторы коэффициента мощности фирмы Lovato electric (Италия)

Микропроцессорный регулятор типа DCRK имеет: трехзначный семисегментный дисплей; мембранную клавиатуру с 4-мя кнопками; последовательный интерфейс для связи с компьютером; расширенные функции измерения (тока перегрузки конденсаторов, среднего еженедельного коэффициента мощности и др.).

Регуляторы выпускаются в модификациях на 5, 7, 8 и 12 ступеней. Коэффициент мощности установки регулируется набором конденсаторов необходимой суммарной емкости. Реактивная мощность последней (наименьшей) ступени — от 10 до 300 квар. Для того, чтобы установить реактивную мощность данной ступени, следует умножить минимальную реактивную мощность на коэффициент ступени.

При первом включении регулятора прочерк на дисплее показывает, что ни один параметр не запрограммирован. В таком режиме может быть проведено ручное тестирование релейных выходов регулятора. Необходимо иметь в виду, что при этом устройство не учитывает время, необходимое для разряда конденсаторов, из-за чего они могут выйти из строя.

Основное меню содержит следующие параметры: первичный ток трансформатора тока; минимальная ступень реактивной мощности; время разряда конденсаторов; чувствительность; коэффициенты ступеней; коэффициент мощности. Чувствительность отражает время реагирования контроллера на изменение реактивной мощности, соответствующей самому маленькому шагу. При малом



значении этой величины обеспечивается быстрое регулирование, с большим числом переключений, при высоком — более медленное, но с меньшим количеством переключений. Чем больше изменение мощности, тем быстрее вступит в действие регулятор. Если, например, чувствительность равна 60 с/шаг, минимальная ступень — 10 квар, а для достижения необходимого коэффициента мощности требуется 20 квар, то регулятор будет ожидать  $60/2 = 30$  с до подключения конденсаторов.

Коэффициент ступени указывает кратность мощности данной ступени относительно мощности самой малой ступени: если они равны, коэффициент будет 1, если ступень вдвое больше, то 2 и т. д. до 16. С установкой 0 ступень будет отключена и в процессе регулирования участвовать не будет.

Существуют три способа установки параметров, при которых контроллер будет работать должным образом:

1) Ручная установка посредством клавиатуры. Устройство переводится в ручной режим, нажимается и удерживается в течение 5с кнопка доступа к параметрам основного меню. Выход из режима программирования произойдет автоматически, как только будет установлен последний параметр.

2) Быстрая установка посредством персонального компьютера. С этой целью используется дополнительный комплект установки, включающий программное обеспечение и кабель связи. Все параметры просматриваются на мониторе компьютера и могут быть переданы и записаны несколькими щелчками мыши. Если значение первичного тока трансформатора тока заранее не было известно и не запрограммировано, регулятор сообщит об этом миганием надписи на дисплее. Тогда необходимое значение может быть набрано на месте; регулятор запомнит уставку и вновь запустится в автоматическом режиме.

3) Автоматическая установка. Обеспечивает работу регулятора без программирования какого — либо параметра. Процедура активизации длится несколько минут, в течение которых контроллер измеряет мощности подключенных ступеней. Когда нагрузка изменяется часто, эту процедуру приходится проводить несколько раз, и тогда она может длиться дольше. Желательно, чтобы в этот период времени ток изменялся как можно меньше.

При возникновении аварийной ситуации на дисплее высвечивается мигающий код аварии. Когда нажимается любая кнопка,

сигнал аварии на время игнорируется, чтобы пользователь мог проверить все измерения.

Каждая авария может вызвать соответствующую реакцию реле (задержанное или немедленное отключение и др.) согласно настройке. Настройка может быть изменена (например, отключена, изменены задержка, время или результат) путем использования РС и программного обеспечения, используемого для быстрой установки параметров.

Отключение конденсаторов при перегрузке производится с выдержкой времени, обратно пропорциональной кратности сверхтока, или немедленно, если эта кратность превышает заданный порог. Число случаев перегрузки запоминается внутренним счетчиком. Через определенное время счетчик автоматически очищается.

## Приборы компании Fluke

### Цифровые мультиметры Fluke 15B, 17B и 18B на российском рынке

Компания Fluke Europe B.V., европейское подразделение корпорации Fluke Corporation по продажам и сервисному обслуживанию открывает новые горизонты фирменного качества Fluke с выпуском цифровых мультиметров Fluke 15B, 17B и 18B.

Начиная с момента основания компании, широкий ряд моделей мультиметров Fluke получил признание благодаря прочной и безопасной конструкции. Новые портативные мультиметры Fluke 15B, 17B и 18B создавались с учётом этих факторов, что позволит пользователям проводить с их помощью точные измерения в любой обстановке. Десятилетия опыта, постоянных



исследований, и обширных полевых испытаний гарантируют работу новых серий мультиметров Fluke даже в самых сложных условиях. При этом цена на новые приборы Fluke, установленная в размере от 2990 руб., делает их доступными для большинства пользователей. Мультиметры Fluke 15В, 17В и 18В разработаны и изготовлены в соответствии с высокими требованиями стандартов прочности, надёжности и точности. Ключевыми особенностями приборов являются:

- функции измерения переменного напряжения и постоянного напряжения (0,1 мВ...1000 В), сопротивления (0,1 Ом... 40 МОм), ёмкости (0,01 нФ...100 мкФ), измерения переменного и постоянного тока (0,1 мА...10 А);
- функции проверки целостности цепей со звуковым сигналом, проверки диодов;
- прочная и безопасная конструкция — все входы, диапазоны и функции имеют защиту от напряжения до 1000 В;





- измерительные щупы, термопара (для Fluke 17В), элементы питания, русскоязычное руководство по эксплуатации и прочный чехол.

Мультиметры Fluke 17В дополнительно позволяют измерять частоту до 100 кГц, температуру в диапазоне от  $-55$  до  $400^{\circ}\text{C}$ , а также имеют режим относительных измерений. А мультиметр Fluke 18В обладает функцией тестирования диодов.

Приборы созданы специально для российского рынка и, соответственно, русифицированы. Кроме того, новые мультиметры будут доступны во многих городах Российской Федерации, а большинство пользователей смогут приобрести прибор в тот же день, когда примут решение о его покупке. Спрашивайте у официальных дистрибьюторов уже сегодня. Список дистрибьюторов смотрите на сайте [www.fluke.ru](http://www.fluke.ru)

**Новый тестер сопротивления изоляции 1555  
и модернизированный тестер 1550С  
с возможностью тестирования напряжением  
до 10 кВ**

*Fluke 1555 и 1550С — это идеальное решение  
для проверки высоковольтного оборудования*

Корпорация Fluke Corporation, мировой лидер по производству переносного электронного контрольно-измерительного оборудования, представляет новый тестер сопротивления изоляции Fluke 1555 и модернизированный тестер Fluke 1550С, предназначенные для различных программ диагностики и профилактического технического обслуживания.

Эти тестеры предназначены для цифровой проверки изоляции напряжением до 10 кВ (Fluke 1555), что делает их идеальным решением для проверки широкого ассортимента высоко-



вольтного оборудования, включая высоковольтные распределители, электродвигатели, генераторы и кабели.

Теперь тестеры изоляции Fluke можно использовать для всего диапазона тестовых напряжений, указанных в стандарте IEEE 43-2000, на них предоставляется лучшая в своем классе трехлетняя гарантия, и они обладают степенью защиты CAT III, 1000 В, CAT IV 600 В. Память измерений и возможность подключения к ПК делают тестеры Fluke 1555 и 1550С идеальными для длительного мониторинга состояния оборудования.

Функциональные возможности Fluke 1555 и 1550С включают:

- Тестовое напряжение до 10 кВ — это решение для любых измерительных задач.
- Степень защиты CAT III 1000 В, CAT IV 600 В.
- Функция предупреждения сообщает пользователю о наличии напряжения в цепи и для повышения безопасности пользователя выдает показания напряжения до 600 В переменного или постоянного тока.
- Возможность изменения тестового напряжения с шагом 50 В в диапазоне от 250 до 1000 В и с шагом 100 В при напряжении более 1000 В.
- Возможность хранения до 99 результатов измерений с присвоением уникальной, определяемой пользователем метки каждой ячейки памяти для упрощения вызова результатов из памяти.
- Большая емкость аккумулятора позволяет выполнить более 750 тестов в интервале между подзарядками.
- Автоматическое вычисление показателя поляризации (DAR) и коэффициента диэлектрических потерь (PI) без дополнительной настройки.
- Система защиты исключает возникновение тока утечки при измерениях изоляции с высоким сопротивлением.
- Большой цифровой/аналоговый жидкокристаллический дисплей для удобства просмотра.
- Возможность измерения тока утечки и емкостного тока.

- Функция линейного увеличения напряжения для испытания на пробой.
- Возможность измерения сопротивления до 2 ТОм.
- Таймер на 99 минут для испытаний с выдержкой по времени.

Для получения дополнительной информации о полном модельном ряде тестеров сопротивления изоляции Fluke посетите веб-сайт [www.fluke.ru/insulation](http://www.fluke.ru/insulation).



## **Лучшее в отрасли семейство токоизмерительных клещей для наиболее сложных условий**

*Новая конструкция повышает гибкость,  
безопасность и производительность*

Корпорация Fluke, мировой лидер в производстве переносных электронных тестовых и измерительных приборов представила лучшее в отрасли семейство самых надежных и мощных токоизмерительных клещей, разработанных для удовлетворения уникальных требований пользователей, тестирующих и обслуживающих электрические системы, промышленное оборудование и устройства управления, а также промышленное оборудование обогрева, вентиляции и кондиционирования.

Это новое семейство токоизмерительных клещей компании Fluke предоставляет ряд новейших возможностей для удовлетворения наиболее высоких требований по гибкости, безопасности и производительности. Они позволяют электрикам вы-



полнять все необходимые измерения, не прибегая к использованию других инструментов. Сконструированные для простоты использования, они являются наиболее прочными токоизмерительными клещами из представленных на рынке.

Все токоизмерительные клещи в семействе улучшены по следующим характеристикам:

- Зажимы стали тоньше и меньше, чтобы их было проще использовать в тесных шкафах с оборудованием
- Дисплеи увеличены и обладают встроенной подсветкой
- Клещи поддерживают стандарт истинного среднеквадратичного значения,
- Диапазон сопротивления расширен
- Для удобства и сохранения работоспособности при падении использована формованная резина.

### ***Новое семейство токоизмерительных клещей Fluke включает:***

**Токоизмерительные клещи постоянного/переменного тока Fluke 381 со съемным дисплеем, измерением истинных среднеквадратичных значений и датчиком iFlex™ —** Fluke 381 это полнофункциональные токоизмерительные клещи с важной дополнительной возможностью: пользователь может снять съемный беспроводной дисплей, что еще больше повышает гибкость, удобство и безопасность использования прибора. Теперь один технический спе-



циалист может выполнять задания, где раньше требовалось участие двоих: установить Fluke 381 на проводнике, снять дисплей, затем закрыть шкаф с оборудованием или перейти в другое место, чтобы переключить органы управления, и все это время наблюдать показания в реальном времени. В комплект включен новый гибкий токоизмерительный датчик iFlex (см. ниже).

**Токоизмерительные клещи постоянного/переменного тока Fluke 376 с измерением истинных среднеквадратичных значений и датчиком iFlex**

— при помощи новых токоизмерительных клещей Fluke 376 пользователи смогут решить любую задачу по измерению. Они предназначены для использования в сложнейших промышленных условиях и измеряют ток до 2500 А переменного тока и 1000 А постоянного тока и помогут устранить неисправности двигателей и приводов с высочайшими помехами. Обладая возможностью измерения истинного среднеквадратичного значения напряжения и переменного тока, записи максимального/минимального/среднего значения и пускового броска, клещи Fluke 376 могут отображать показания до 1000 В и 1000 А как в режиме переменного тока, так и в режиме постоянного тока. В комплект Fluke 376 включен новый гибкий токоизмерительный датчик iFlex. Fluke 376 является прямой заменой прибора 337.



**Токоизмерительные клещи Fluke 374 и 375 с истинным среднеквадратичным значением переменного/постоянного тока** — новые токоизмерительные клещи Fluke 374 и 375 обеспечивают повышенную производительность, идеально подходящую для многих

*Fluke 374*



*Fluke 375*



случаев измерения тока. Обладая возможностью измерения истинного среднеквадратичного значения напряжения и переменного тока, записи максимального/минимального/среднего значения и пускового броска, клещи Fluke 374 и 375 могут отображать показания до 600 В и 600 А как в режиме переменного тока, так и в режиме постоянного тока, и обрабатывать показания минимального/максимального, среднего значений и пускового броска. Оба прибора совместимы с новым гибким токоизмерительным датчиком iFlex™ (продается отдельно). Идеально подходящие для промышленных сред, клещи Fluke 375 оснащены фильтром помех низких частот и измеряют частоту до 500 Гц и постоянный ток (мВ) с помощью широкого ряда дополнительного оборудования.

**Токоизмерительные клещи Fluke 373 с измерением истинного среднеквадратичного значения переменного тока** — новые токоизмерительные клещи обеспечивают повышенную функциональность и высокую ценность для пользователей, которым не-



обходимы только измерения переменного тока. Обладая возможностью измерения истинного среднеквадратичного значения напряжения и переменного тока, клещи Fluke 373 могут отображать показания до 600 А переменного тока и 600 В переменного или постоянного тока.

**Гибкие токоизмерительные датчики iFlex i2500-18 и i2500-10** — новые гибкие токоизмерительные датчики Fluke iFlex повышают диапазон измерений отдельных приборов Fluke до 2500 А переменного тока и обеспечивают непревзойденную гибкость измерений. Датчики iFlex подключаются напрямую к прибору, отображая измерения тока без коэффициентов пересчета, которые часто вызывают ошибки. Крупная катушка позволяет пользователю обойти крупные и неудобные проводники, тогда как профиль размером 0,3 дюйма позволяет катушке пройти через плотно расположенные кабели и улучшает возможности доступа в тесных пространствах. 6-футовый провод облегчает снятие показаний на расстоянии от проводника. Предлагаются размеры 25 см (10 дюймов) и 45 см (18 дюймов). Поставляются с токоизмерительными клещами Fluke 381 и Fluke 376; совместимы с токоизмерительными клещами Fluke 374 и Fluke 375.



*iFlex i2500-10*



*iFlex i2500-18*

Номинальные параметры безопасности также улучшены. Клещи Fluke 381, 376, 375, 374 и токоизмерительные датчики iFlex сертифицированы для безопасного использования в средах категории опасности IV (CAT IV) 600 В (CAT IV 600 В, CAT III 1000 В) согласно требованиям надзорных органов в США, Канаде и Европе. Клещи Fluke 373 соответствуют CAT IV 300 В, CAT III 600 В. Степень защиты CAT IV необходима для использования вне помещений.

## Новый тепловизор Fluke TiS

### *Теперь тепловидение стало ДОСТУПНЫМ!*

Корпорация Fluke Corporation, мировой лидер по производству переносного электронного контрольно-измерительного оборудования, представляет тепловизор Fluke TiS нового поколения. Специально разработанный для инженеров ЖКХ, электриков, специалистов, занимающихся обслуживанием систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и холодильного оборудования, прокладчиков изоляции, строителей и установщиков окон, тепловизор Fluke TiS — идеальный прибор для обнаружения скрытых проблем, проникновения влаги, потерь энергии или нарушения изоляции, а также локального перегрева электрических компонентов.

Fluke TiS — это самый эффективный и доступный тепловизор в своем ценовом классе.



Тепловизор Fluke TiS имеет лучшее разрешение (120×120) в ценовом сегменте и самый большой дисплей (диагональ 3,6 дюймов). Fluke TiS – единственный тепловизор в своем классе с широким диапазоном ручной фокусировки. Передовая конструкция включает трехкнопочное меню для интуитивного управления и навигации.

Прибор испытан на падение с высоты двух метров и имеет степень защиты IP54 по пыли- и водонепроницаемости.

Широкоэкранный полноцветный ЖК дисплей, улучшенная тепловая чувствительность — менее 0,1 °C при температуре объекта 30 °C (100 мК), диапазон измеряемых температур от –20 до 100 °C делают тепловизор Fluke TiS оптимальным для диагностики зданий.





Новый тепловизор Fluke идеален для:

- **Контроля энергопотребления и проверки изоляции от атмосферных воздействий:** Позволяет повысить эффективность теплоизоляции домов и промышленных корпусов путем обнаружения мест потерь тепла, проникновения холодного или теплого воздуха и дефектов воздуховодов.
- **Обследования кровли:** Быстрое и эффективное обнаружение повреждений гидроизоляции в системах кровли для ремонта или замены, позволяющее предупредить повреждение всей крыши.
- **Обнаружения проникновения влаги:** Точное обнаружение мест с повышенной влажностью за внешней или внутренней облицовкой стен, потолков или полов с ковровыми покрытиями.
- **Предотвращения появления плесени:** Поиск мест роста плесени за счет обнаружения неизвестных источников влажности.
- **Контроля электрической изоляции:** Обнаружение перегреваемых компонентов цепей, распределительных щитов, электродвигателей, насосов и другого оборудования.
- **Проверки систем обогрева, вентиляции и кондиционирования воздуха:** Обнаружение утечек воздуховодов, проверка конденсатоотводчиков, компрессоров, электродвигателей и насосов.

Новый тепловизор уже в продаже! Обращайтесь к официальным дистрибьюторам. Узнайте больше на сайте [www.fluke.ru/ti](http://www.fluke.ru/ti)

### *Информация о Fluke*

Компания Fluke Corporation является лидером в области производства компактных профессиональных электронных диагностических инструментов. Клиентами компании Fluke являются технические специалисты, инженеры, электрики и метрологи, осуществляющие монтаж и обслуживание промышленного электрического и электронного оборудования, поиск и устранение его неисправностей, управление этим оборудованием, калибровку оборудования в целях контроля качества, а также выполняющие работы по восстановлению и реконструкции зданий. За последние пять лет продукция Fluke была награждена более чем 50 отраслевыми наградами, включая премию за лучший измерительный прибор “Best in Test” журнала Test and Measurement World, выбор инженеров “Engineer’s Choice” по мнению журнала Control Engineering и товар года “Product of the Year”, присужденную журналом Plant Engineering. Fluke является зарегистрированной торговой маркой компании Fluke Corporation в США и/или других странах. Упомянутые в настоящем документе наименования компаний и товаров могут являться торговыми марками их владельцев.

## Литература

1. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. Разделы 3, 5. СПб.: ДЕАН, 2004.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. СПб.: ЦОТПБСП, 2003.
4. Руководящие материалы по сертификации электроустановок зданий. Сборник 1. М.: 1996.
5. Руководящие материалы по сертификации электроустановок зданий. Сборник 2. М.: 1997.
6. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. РД 34.21.122-87/Минэнерго СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. (СО 153-34.21.122-2003)
8. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. СПб.: ДЕАН, 2001.
9. Объем и нормы испытаний электрооборудования/Под общей редакцией Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. 6-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 1998.
10. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования/АО «Фирма ОРГРЭС». Под ред. Ф. Л. Когана. М.: ЗАО «Энергосервис», 2001.
11. Техническое обслуживание релейной защиты и автоматики электростанций и электрических сетей/Под ред. Б. А. Алексеева. Ч.4: Электроавтоматика. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001.
12. Применение и техническое обслуживание микропроцессорных устройств на электростанциях и в электросетях/Сост. А. П. Кузнецов; Под ред. Б. А. Алексеева. — Ч.3.: Испытательные установки для проверки устройств релейной защиты и автоматики (серии «Уран», «Нептун», «Сатурн»). — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
13. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий/Под ред. М. Г. Зименкова, Г. В. Розенберга, Е. М. Феськова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.

14. Справочник по наладке электроустановок и автоматики/Е. И. Забокрицкий, Б. А. Холодовский, А. И. Митченко. 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1985.
15. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций/Под ред. Э. С. Мусаэляна. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989.
16. Кисаримов Р. А. Справочник электрика. — 2-е изд., переработ. и доп. — М.: ИП РадиоСофт, 2001.
17. В. Н. Харечко. Электроустановки индивидуальных жилых домов. Справочник. — М.: ЗАО «Энергосервис», 2004.
18. Г. Н. Дубинский, Л. Г. Левин. Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 В. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
19. Вишневецкий Л. М., Левин Л. Г. Я — электроналадчик. М.: Энергоатомиздат, 1987.
20. Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения. Справочное пособие./под ред. В. А. Григорьева. — М.: Колос, 2006.
21. Панфилов В. А. Электрические измерения. Учебник для сред. проф. образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2004.
22. Основы метрологии и электрических измерений. Учебник для вузов./Под ред. Е. М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
23. Гарнов В. К., Левин Л. Г. Измерение сопротивления цепи фаза — нуль в электрических сетях. Промышленная энергетика, №11, 1970.
24. Умецкий В. Л., Левин Л. Г. О возможности применения тиристорных регуляторов для настройки максимальной защиты. Промышленная энергетика, № 8, 1972.

## Список основных сокращений

АВДТ	— автоматический выключатель дифференциального тока
АВР	— автоматическое включение резерва
АСУ	— автоматизированная система управления
АЦП	— аналого-цифровой преобразователь
ВДТ	— выключатель дифференциального тока
ВН	— высокое (высшее) напряжение
ВЛ	— воздушная линия электропередачи
ВРУ	— вводно-распределительное устройство
ВРЩ	— вводно-распределительный щит
ГЗШ	— главная заземляющая шина
ГОСТ	— государственный стандарт
ЖК	— жидкокристаллический (дисплей)
ЗУ	— запоминающее устройство
ИМС	— интегральная микросхема
КЗ	— короткое замыкание
КТП	— комплектная трансформаторная подстанция
КУ	— конденсаторная установка
ЛАТР	— лабораторный автотрансформатор
ЛЭП	— линия электропередачи
МДС	— магнитодвижущая сила
МЭК	— Международная Электротехническая комиссия
НН	— низкое (низшее) напряжение
ОЗУ	— оперативное запоминающее устройство
ОКЗ	— однофазное короткое замыкание
ОПЧ	— открытая проводящая часть
ПЗУ	— постоянное запоминающее устройство
ПТЭЭП	— Правила технической эксплуатации электроустановок Потребителей
ПУЭ	— Правила устройства электроустановок
РУ	— распределительное устройство
СИ	— средства измерений
СПЧ	— сторонняя проводящая часть
ЦАП	— цифро-аналоговый преобразователь
ЭДС	— электродвижущая сила
ЭЛТ	— электронно-лучевая трубка

# Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Электрические измерения</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1. Метрология</b> .....	<b>7</b>
1.1.1. Основные понятия и определения .....	7
1.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений .....	9
<b>1.2. Системы электроизмерительных приборов</b> .....	<b>13</b>
1.2.1. Аналоговые приборы .....	13
1.2.2. Цифровые приборы .....	21
<b>1.3. Техника измерений</b> .....	<b>25</b>
1.3.1. Измерение постоянного тока и напряжения .....	25
1.3.2. Измерение переменного тока и напряжения .....	28
1.3.3. Измерение электрического сопротивления .....	31
1.3.4. Измерение электрической мощности .....	36
1.3.5. Измерение электроэнергии .....	39
1.3.6. Измерение частоты, интервалов времени и угла сдвига фаз .....	43
1.3.7. Измерение емкости и индуктивности .....	49
1.3.8. Измерение магнитных величин .....	52
<b>1.4. Осциллографирование</b> .....	<b>55</b>
1.4.1. Светолучевые осциллографы .....	56
1.4.2. Электронно-лучевые осциллографы (электронные, или катодные) .....	58
1.4.3. Цифровые осциллографы .....	75
<b>1.5. Организация измерений</b> .....	<b>86</b>
1.5.1. Подготовка работ .....	86
1.5.2. Выполнение измерений .....	88
1.5.3. Эксплуатация средств измерения .....	88
<b>2. Регулирование и контроль электрических величин при испытаниях.</b> <b>Элементы аппаратуры управления и их проверка</b> .....	<b>90</b>
<b>2.1. Регулирование электрических величин</b> .....	<b>90</b>
2.1.1. Регулирование тока .....	90
2.1.2. Регулирование напряжения .....	97
2.1.3. Регулирование угла сдвига фаз .....	99
<b>2.2. Контроль электрических величин</b> .....	<b>102</b>
2.2.1. Индикация .....	102
2.2.2. Фазировка .....	105
2.2.3. Построение векторных диаграмм .....	110
2.2.4. Снятие векторных диаграмм .....	117
<b>2.3. Проверка электромеханических аппаратов</b> .....	<b>119</b>
<b>2.4. Полупроводниковая элементная база</b> .....	<b>125</b>
2.4.1. Основные понятия .....	125
2.4.2. Диоды .....	126
2.4.3. Транзисторы .....	128
2.4.4. Логические элементы .....	132

2.4.5. Интегральные микросхемы .....	133
<b>2.5. Микропроцессорные устройства .....</b>	<b>142</b>
2.5.1. Общая характеристика .....	142
2.5.2. Микропроцессор .....	142
2.5.3. Внешние устройства .....	144
<b>2.6. Проверка радиоэлектронных цепей .....</b>	<b>145</b>
2.6.1. Проверка отдельных компонентов .....	145
2.6.2. Логические схемы. Интегральные микросхемы .....	150
2.6.3. Помехи .....	151
2.6.4. Проверка статических реле .....	154
<b>3. Испытания и проверки типовых цепей и элементов устройств электроснабжения до 1000 В.....</b>	<b>157</b>
<b>3.1. Автоматические воздушные выключатели (АВ).....</b>	<b>157</b>
3.1.1. Общие сведения .....	157
3.1.2. Характеристики и классификация АВ .....	159
3.1.3. Проверка расцепителей .....	162
3.1.4. Автоматические выключатели переменного тока серий АХХХХ .....	164
3.1.5. Автоматические выключатели серий ВА .....	176
3.1.6. Автоматические выключатели серии «Электрон» (ЗАО «Контактор», г. Ульяновск) .....	178
3.1.7. Автоматические выключатели зарубежных фирм .....	181
3.1.8. Автоматические выключатели с микропроцессорными блоками управления и защиты .....	189
3.1.9. Комплектные устройства для испытания расцепителей током нагрузки .....	193
<b>3.2. Измерение сопротивления заземления .....</b>	<b>205</b>
3.2.1. Основные понятия .....	205
3.2.2. Конструктивное выполнение заземляющих устройств .....	210
3.2.3. Сопротивление растеканию .....	212
3.2.4. Заземлители .....	216
3.2.5. Защитные функции заземления и зануления .....	224
3.2.6. Зануление .....	225
3.2.7. Измерения .....	227
<b>3.3. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами .....</b>	<b>249</b>
3.3.1. Виды защитных проводников и требования к ним .....	249
3.3.2. Проверка цепи между заземлителями и заземляемыми элементами .....	254
3.3.3. Измерение сопротивления заземляющих проводников. Методика измерений .....	256
<b>3.4. Проверка цепи фаза-нуль .....</b>	<b>266</b>
3.4.1. Сопротивление цепи фаза-нуль .....	266
3.4.2. Проверка цепи фаза-нуль и условия обеспечения безопасности в электроустановках .....	270
3.4.3. Ток КЗ и характеристики защитных аппаратов .....	272

---

3.4.4. Проводники в цепи фаза-нуль .....	273
3.4.5. Методы измерения сопротивления цепи фаза-нуль и тока однофазного замыкания .....	274
3.4.6. Измерение тока однофазного КЗ специализированными приборами .....	279
<b>3.5. Проверка срабатывания устройств защитного отключения (УЗО) .....</b>	<b>288</b>
3.5.1. Назначение и принцип действия устройств защитного отключения .....	288
3.5.2. Основные характеристики и выбор УЗО .....	293
3.5.3. Применение УЗО в системе заземления TN .....	299
3.5.4. Типы и параметры УЗО .....	302
3.5.5. Проверка и испытания УЗО .....	314
3.5.6. Устройства и приборы для испытания УЗО .....	322
<b>3.6. Проверка систем молниезащиты .....</b>	<b>326</b>
3.6.1. Общие сведения .....	326
3.6.2. Защита от воздействий молнии .....	329
3.6.3. Проверка систем молниезащиты .....	335
<b>3.7. Измерение сопротивления изоляции .....</b>	<b>336</b>
3.7.1. Характеристики изоляции как диэлектрика .....	336
3.7.2. Допустимые значения сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции для различных электроустановок .....	337
3.7.3. Измерение сопротивления изоляции .....	341
3.7.4. Испытание электрической прочности изоляции приложением по- вышенного напряжения в течение 1 мин .....	349
<b>3.8. Проверка работоспособности устройств автоматического включения резервного питания (АВР) .....</b>	<b>352</b>
3.8.1. Общие положения .....	352
3.8.2. Схемы устройств АВР .....	353
3.8.3. Испытания АВР .....	355
3.8.4. Устройства АВР на основе микропроцессоров .....	356
<b>3.9. Компенсация реактивной мощности .....</b>	<b>358</b>
3.9.1. Назначение .....	358
3.9.2. Требования ПУЭ .....	360
3.9.3. Виды и способы компенсации .....	361
3.9.4. Конденсаторные установки производства ООО «ДИАЛ-Энерго» .....	364
3.9.5. Конденсаторные установки фирмы «Twelve Electric» (Польша) .....	367
3.9.6. Регуляторы коэффициента мощности типа NOVAR (Чехия) .....	370
3.9.7. Регуляторы коэффициента мощности фирмы Lovato electric (Италия) .....	375
<b>3.10. Приборы компании Fluke .....</b>	<b>378</b>
3.10.1. Цифровые мультиметры Fluke 15В, 17В и 18В на российском рынке .....	378



## **Оглавление**

---

3.10.2. Новый тестер сопротивления изоляции 1555 и модернизированный тестер 1550С с возможностью тестирования напряжением до 10 кВ.....	381
3.10.3. Лучшее в отрасли семейство токоизмерительных клещей для наиболее сложных условий .....	384
3.10.4. Новый тепловизор Fluke TiS .....	390
3.10.5. Информация о Fluke.....	393
<b>Литература.....</b>	<b>394</b>
<b>Список основных сокращений.....</b>	<b>396</b>

*Серия «Библиотека инженера»*

**Дубинский Генрих Нейманович, Левин Лев Григорьевич**

## **Наладка устройств электроснабжения напряжением до 1000 В**

Ответственный за выпуск

**В. Митин**

Макет и верстка

**А. Иванова**

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

По вопросам приобретения обращаться:

**ООО «АЛИАНС-КНИГА КТК»**

Тел: (495) 258-91-94, 258-91-95, [www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

**ООО «СОЛОН-ПРЕСС»**

103050, г. Москва, Дегтярный пер., д. 5, стр. 2

Формат 60×88/16. Объем 25 п. л. Тираж 2000 экз.

*1-й завод 1000 штук*

Отпечатано в ООО «Арт-диал»

143983, МО, г. Железнодорожный, ул. Керамическая, д. 3

**Заказ №**