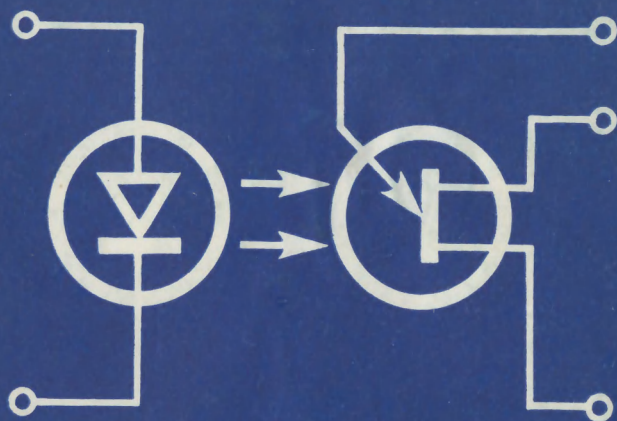




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



В. Ф. БАХМУТСКИЙ
Н. И. ГОРЕЛИКОВ
Ю. Н. КУЗИН

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



В. Ф. БАХМУТСКИЙ
Н. И. ГОРЕЛИКОВ
Ю. Н. КУЗИН

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1979

ББК 32.86

Б30

УДК 53.082.5

Рецензент инж. Б. Р. Шульман

Бахмутский В. Ф. и др.

Б 30 Оптоэлектроника в измерительной технике/
В. Ф. Бахмутский, Н. И. Гореликов, Ю. Н. Кузин. —
М.: Машиностроение. 1979. — 152 с., ил. — (Б-ка
приборостроителя).
55 к.

Книга посвящена приложениям методов и средств оптоэлектроники в измерительной технике. В ней рассмотрено применение оптоэлектроники в измерительных приборах, устройствах функционального преобразования и обработки информации, устройствах отображения (индикации, регистрации) измерительных приборов и систем.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием электронной измерительной аппаратуры.

Б 30407-613 — 260-80 2403000000
038(01)-79

ББК 32.86

6П5.8

© Издательство «Машиностроение», 1979 г.

ИБ № 596

Виктор Фридрихович БАХМУТСКИЙ

Николай Иванович ГОРЕЛИКОВ

Юрий Николаевич КУЗИН

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Редактор *Л. П. Строганов*

Технический редактор *Л. Т. Зубко*

Корректор *А. М. Усачева*

Обложка художника *В. И. Столярова*

Сдано в набор 16.05.79 Подписано в печать 24.10.79 Т-19626 Формат 84×108¹/₃₂
Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 7,98 Уч.-изд. л. 11,05 Тираж 5500 экз.
Заказ 391 Цена 55 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., 3

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптоэлектроника, возникшая на «стыке» двух прикладных технических направлений (оптика и электроника), в настоящее время переживает период бурного развития и широкого внедрения в различные области техники (вычислительная и измерительная техника, автоматическое регулирование и управление, техника связи и др.). Оптоэлектроника не только значительно расширяет элементную базу электроники, в особенности микроэлектроники, но и открывает принципиально новые возможности преобразования информации электронными устройствами, что положительно влияет на развитие электронной схемотехники и системотехники.

В технологическом плане оптоэлектроника является одним из наиболее перспективных направлений развития так называемой функциональной микроэлектроники, т.е. непосредственного использования физических эффектов взаимодействия вещества и энергии в микроэлектронных элементах и узлах для различных функциональных преобразований параметров электрических цепей и сигналов.

К сожалению, сведения по вопросам использования средств оптоэлектроники в той или иной области техники разбросаны по многочисленным журнальным статьям, описаниям изобретений и другим малодоступным публикациям.

Обширность материала и отсутствие в ряде работ должной классификации и систематизации создают дополнительные трудности при его изучении.

В предлагаемой вниманию читателей книге авторы предприняли попытку достаточно широкого и полного рассмотрения приложений оптоэлектроники в измерительной технике. При этом авторы столкнулись с трудностью, заключающейся в известном противоречии между шириной и глубиной (детальностью) рассмотрения: чем шире круг рассматриваемых вопросов, тем труднее провести детальный анализ каждого из них. Следует отметить, что первый опыт подобного издания большей частью вынуждал авторов к тому, чтобы детальности анализа предпочесть широту охвата материала. Поэтому книгу следует рассматривать не как пособие по проектированию оптоэлектронных элементов и узлов измерительных устройств, а как введение в синтез измерительных устройств, приборов и систем с применением методов и средств оптоэлектроники, анализ которых должен быть предметом отдельного рассмотрения. Следует также отметить, что, несмотря на стремление к полноте изложения, в книге не нашли отражения

физические свойства и характеристики элементов оптоэлектроники, а также применения оптоэлектроники в линейно-угловых измерениях и голографии. По этим вопросам уже имеются обстоятельные монографии, а также учебные пособия и руководства.

В книге рассматриваются основные приложения методов и средств оптоэлектроники в различных областях измерительной техники — электрических измерениях (гл. 1), обработке измерительной информации (гл. 2), устройствах индикации (гл. 3) и регистрации (гл. 4). Каждая глава содержит обзор и систематизацию, сопоставительный анализ, теоретическую или практическую оценку эффективности применения методов и средств оптоэлектроники в соответствующей области измерительной техники. В заключении предпринята попытка прогноза дальнейшего развития соответствующих приложений.

Глава 1 написана Н. И. Гореликовым, введение и главы 2, 4, а также разделы 1, 3, 7, 8 главы 3, написаны В. Ф. Бахмутским, разделы 2, 4, 5, 6 главы 3 написаны Ю. Н. Кузиным; заключение написано авторами совместно.

Критические замечания по содержанию и оформлению книги авторы просят направлять по адресу: 107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., 3, изд-во «Машиностроение».

Рассмотрению приложений средств оптоэлектроники в различных областях измерительной техники предпослано обобщенную классификацию измерительных преобразований, в рамках которой определим место и значение оптоэлектронного преобразования в информационно-измерительных системах (ИИС) [6].

Приступая к указанной классификации измерительных преобразований, отметим, что они в первую очередь должны отвечать требованию квантификации, т.е. количественной определенности. Далее отметим, что измеряемые физические величины имеют различные размерности и их непосредственное измерение, т.е. получение количественной оценки отношения измеряемой величины к образцовой величине той же размерности, потребовало бы создания большого числа образцовых и рабочих мер, что представляет значительные теоретические трудности и практические неудобства. В связи с этим при построении ИИС используют промежуточные преобразования входных физических величин различных размерностей в единый унифицированный сигнал, информационным признаком которого может быть физическая величина любой размерности, удобная для последующих преобразований. Эту функцию приведения физических величин различной размерности к единому унифицированному сигналу обычно выполняют первичные измерительные преобразователи, минимальное количество которых (при временном разделении каналов) равно числу разнородных физических величин, а максимальное количество (при пространственном разделении каналов) равно общему числу измеряемых физических величин.

Поскольку размерность унифицированной физической величины заранее не фиксируется (это было бы ограничением общности), нет необходимости вводить только одну унифицированную величину. Вместе с тем, если не ограничить количество унифицированных величин, идея унификации утратит смысл. Преодоление этого затруднения заключается в том, что в основу спецификации унифицированных величин должны быть положены не их размерности, а обобщенные информационные признаки. Для выделения таковых заметим, что любые подлежащие измерению интенсивности физических величин изменяются и взаимно преобразуются во времени и пространстве. Поэтому измерительная информация может быть заключена либо в уровне интенсивности (статический информационный признак S), либо в определенном локальном распределении интенсивности во времени (динамический информационный признак

нак D) или в пространстве (пространственный информационный признак P), а также в сочетаниях указанных признаков. Применительно к тракту первичного измерительного преобразования ИИС можно конкретизировать S как значение постоянного напряжения или тока (при этом информационный признак величины совпадает с ее интенсивностью); D — как длительность (интервал времени, период), положение во времени (фазу) или частоту электрического сигнала; P — как протяженность (длину) или положение в пространстве (линейные и угловые координаты) оптического сигнала. В тракте вторичного измерительного преобразования наряду с взаимными преобразованиями аналоговых величин с указанными информационными признаками (S , D , P) выполняются дальнейшие преобразования типа квантования и кодирования, в результате чего сигналы — носители этих признаков приобретают модифицированную (дискретную или цифровую) форму представления, например в виде унитарных кодов (n_s , n_D , n_P) или позиционных кодов (N_s , N_D , N_P).

Выбор в качестве информационного признака S соответствует традиционному построению ИИС с использованием первичных преобразователей различных физических величин в напряжение постоянного тока и базового цифрового вольтметра (этот принцип положен в основу создания комплекса средств ГСП, а также применяется при построении большинства моделей зарубежных мультиметров и ряда систем централизованного контроля).

Выбор в качестве информационного признака D соответствует традиционному построению телеизмерительных систем с использованием время-импульсной, фазовой или частотной модуляции на передающей стороне и частотно-временных средств аналого-цифрового преобразования на приемной стороне тракта. Этот принцип положен также в основу ряда отечественных и некоторых зарубежных моделей мультиметров. Дальнейшее его развитие применительно к ИИС возможно на основе расширения номенклатуры частотно-временных первичных преобразователей различных физических величин. При этом следует отметить, что выдвинутая П. В. Новицким программа построения частотно-временных преобразователей для всех физических величин пока не реализована не только по номенклатуре преобразуемых величин, но и по степени унификации выходных сигналов, так как диапазоны их изменений и функциональные зависимости от входных сигналов имеют значительный разброс [66]. Вместе с тем гибкость частотно-временных преобразований (включая аналого-цифровые преобразования) делает построение ИИС с использованием признака D весьма перспективным.

Информационный признак P до сих пор использовался только при построении систем обработки данных на основе преобразования однородных физических величин в позиционные коды N_P и последующей обработки кодов с помощью вычислительных средств. Примером эффективного использования позиционного P -преобразования является построение на его основе гибридных (т.е. сочетающих аналоговые и цифровые операционные элементы и узлы) функциональных преобразователей. Однако, если рассматривать пространственный признак P только как позиционный, выпадает первичное звено преобразования ИИС, которое осуществляет преобразование разнородных входных величин в однородные. Если же в соответствии с приведенным выше определением рассматри-

вать P как истинно пространственный информационный признак, т.е. локальное распределение интенсивности оптической величины в пространстве, то приходим к нетрадиционному построению ИИС на основе использования первичных электроннооптических и вторичных оптоэлектронных преобразователей (включая АЦП). В последних могут использоваться кодирующие ЭЛТ, сканирующие лазеры, полупроводниковые сканисторы, дискретные электрооптические отклоняющие устройства (дефлекторы) и др.

Введение в состав периферийных или промежуточных звеньев преобразования ИИС оптических сигналов позволяет выдвинуть более сложную (по сравнению с упомянутой выше программой универсального частотно-временного преобразования) и вместе с тем более перспективную программу создания практически для всех физических величин пространственных измерительных преобразователей, т.е. преобразователей P -типа с оптическим выходным сигналом, а также методов и средств электроннооптического и оптоэлектронного преобразования.

Перспективность этой программы определяется в первую очередь естественностью, простотой и высокой точностью преобразования в оптические сигналы таких широко распространенных физических величин, как линейно-угловые (в том числе вибрационные и деформационные) перемещения и координаты, линейные и угловые скорости, объемный и массовый расход и др., а также возможностью модуляции ряда оптических и электрооптических сред такими физическими величинами, как давление, температура, напряженность электрического и магнитного поля и др. Кроме этого, существует много измерительных задач, связанных с пространственным сканированием различных параметрических полей. В области электрических измерений имеются достаточно простые показывающие приборы со световым указателем, представляющие собой P -преобразователи для ряда электрических величин (действующие значения напряжения и тока, активная мощность, коэффициент мощности и др.), преобразование которых другими средствами связано со значительными аппаратными затратами. Среди других электроизмерительных задач, для которых представляет интерес использование P -преобразователей, отметим измерение амплитуды импульсных и высокочастотных сигналов с помощью ЭЛТ, а также измерение высоких напряжений и больших токов с помощью электрооптических и магнитооптических модуляторов и дефлекторов света.

Применение преобразователей P -типа в ИИС перспективно и благодаря таким полезным (во многом уникальным) свойствам оптоэлектронного преобразования, как высокое быстродействие, возможность практически идеального гальванического разделения цепей, реализация двумерного сканирования и гибкость управления (в тракте излучателя, оптической среды и фотоприемника), простота получения визуальной информации о состоянии промежуточных или конечных звеньев преобразования и др.

В общем случае тракты ИИС могут строиться с использованием следующих маршрутов преобразования, выходными звеньями которых являются аналого-дискретные преобразователи соответствующих параметров S , D , P (статических, динамических, пространственных):

$$\begin{array}{l}
 S-D-D-S; \\
 S-S \quad \swarrow \quad \searrow \\
 \quad \quad S-P-P-S;
 \end{array} \tag{1}$$

$$\begin{array}{l}
 D-S-S-D; \\
 D-D \quad \swarrow \quad \searrow \\
 \quad \quad D-P-P-D;
 \end{array} \tag{2}$$

$$\begin{array}{l}
 P-S-S-P; \\
 P-P \quad \swarrow \quad \searrow \\
 \quad \quad P-D-D-P.
 \end{array} \tag{3}$$

Отсюда ясно, что в ИИС могут использоваться в общем случае оптические ($P-P$), электроннооптические ($S-P$, $D-P$) и оптоэлектронные ($P-S$, $P-D$) преобразования, причем все указанные виды преобразований, которые мы будем обобщенно называть оптронными, могут применяться не только в ИИС для оптических измерений (3), но также в ИИС для электрических измерений S -параметров (1) и D -параметров (2), где соответствующие преобразователи могут быть промежуточными звеньями основного или дополнительного (к электронному) тракта преобразования. Из выражений (1)–(3) видно также, что традиционные электронные преобразования S - и D -параметров с информационной точки зрения составляют только часть, и притом меньшую часть всех возможных преобразований в ИИС. Несомненно, что изучение и использование оптронных преобразований в ИИС перспективно уже по этому (количественному) критерию, не говоря уже об отмеченных выше качественных особенностях.

Наряду с однородными преобразованиями S -, D - и P -параметров, для ИИС и для отдельных измерительных устройств представляют интерес неоднородные преобразования с входным или выходным оптическим сигналом. Первые могут быть звеньями первичного измерительного преобразования оптических следящих систем, устройств для измерения линейных и угловых размеров, сканирующих пирометров и т.п. Вторые могут быть выходными звеньями различных измерительных устройств (индикаторами, регистраторами). В устройствах обработки информации, и в частности в специализированных измерительно-вычислительных устройствах, указанные оптоэлектронные и электроннооптические преобразования могут использоваться порознь или совместно в различных сочетаниях.

Дальнейшее изложение материала предполагает, что читатель имеет общее представление об основных элементах оптоэлектроники: некогерентных излучателях (светодиодах), когерентных излучателях (лазерах), фотоприемниках с интегральной и позиционной чувствительностью к световому потоку, световодах, модуляторах и дефлекторах света, жидких кристаллах, оптронах. Для этого читателю в первом приближении достаточно ознакомиться с обзором [5], пополняя в дальнейшем эти сведения из литературы ([31, 86] и др.).

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Применения оптоэлектроники в электроизмерительной технике многообразны. Ее проникновение в методы и средства электроизмерений происходит неравномерно, затрагивая зачастую смежные области (например, вычислительную технику) или общетехнические средства широкого назначения (например, средства отображения). В связи с этим представляется целесообразным, с одной стороны, выделить некоторые «пограничные» зоны, или зоны пересечения электроизмерительной техники с другими областями, а с другой, — выявить некоторые специфичные для электроизмерительной техники применения средств оптоэлектроники.

1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ РАЗВЕРТЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ С ВТОРИЧНЫМ АНАЛОГО-ДИСКРЕТНЫМ ОПТОЭЛЕКТРОННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

В цифровой электроизмерительной технике совокупность методов и средств аналого-дискретного преобразования с оптоэлектронным кодированием получила наименование электромеханических АЦП или АЦП с пространственным кодированием [104]. Эта группа методов и устройств явилась естественным «мостом» между традиционными аналоговыми измерениями, в которых использованы электромеханические показывающие приборы или ЭЛТ, и цифровыми измерениями, в которых применены устройства дискретизации, квантования и кодирования измеряемых сигналов. Естественно, что в цифровой электроизмерительной технике, зародившейся в недрах аналоговой, стремились возможно более полно использовать традиционные методы и средства. Поэтому первые цифровые приборы строились на основе аналоговых с кодированием отклонения стрелки или другого указателя показывающего прибора (светового или электронного луча, источника бета-излучения и др.) вдоль отсчетной шкалы. Основные модификации конструкций таких приборов следующие [8].

В первом варианте конструкции связанное с рамкой зеркало гальванометра или другого показывающего прибора направляет пучок света на эллиптическое зеркало (с расположенным перед ним решетчатым растром), в фокусе которого расположен фотоприемник. При отклонении рамки с зеркалом пучок света последовательно сканирует элементы раstra и в фотоприемнике фиксируется последовательность отраженных импульсов, количество которых соответствует углу отклонения.

Во втором варианте конструкции квантующий растр совмещен со шкалой показывающего прибора, а в фокусах отражающего зеркала расположены два фотоприемника. При этом счет импульсов может вестись как при отклонении показывающего прибора от нулевой отметки, так и при возвращении к ней, т.е. соответственно при включении и отключении измеряемой величины. Во втором случае не возникает (или легко устраняется) неоднозначность кодирования измеряемой величины, обусловленная колебаниями подвижной системы, поскольку последний счетный импульс привязан к определенной (нулевой) позиции и момент ее достижения может использоваться как признак окончания счета. В следящем режиме, т.е. при малых отклонениях относительно установившегося значения или достигнутой ранее отметки шкалы, устранение неоднозначности усложняется в связи с необходимостью различения направлений перемещения указателя (в одном направлении перемещения счетные импульсы должны суммироваться с ранее накопленными, а в другом — вычитаться).

В третьем варианте конструкции стрелка (указатель) несет флажок, перекрывающий зазор между излучателем и фотоприемником. При этом в нулевом положении излучатель и фотоприемник неподвижны, а в положении установившегося отклонения указателя последнее считывается при помощи подвижного диска с расположенными на нем излучателем и фотоприемником (это могут быть одни и те же элементы, считывающие последовательно нулевое и установившееся положения указателя). В качестве подвижного элемента в таких компенсационных устройствах могут использоваться диски и барабаны, вращающиеся с постоянной скоростью. В качестве считывающих элементов наряду с флажками можно использовать стрелки, выполненные из прозрачной пластмассы и покрытые поляроидными пленками с взаимно ортогональными плоскостями поляризации. При этом отпадает необходимость в размещении осветителя и фотоприемника на подвижном диске (подвижными являются только стрелки измерительного и компенсационного механизмов).

К четвертому варианту конструкции можно отнести АЦП пространственного кодирования, выполненные с использованием кодовой маски и набора дискретных фотоприемников, в частности, на кодирующих ЭЛТ. В качестве элементов, квантующих световой поток, могут быть использованы световоды, выполняющие также и функции кодирования (разветвление и собирание световых пучков соответственно их распределению по разрядам кода). Преобразование в последовательный (единичный) код может осуществляться также с помощью многоэлементных фотоприемников с электронной разверткой — сканисторов. В принципе возможны и варианты аналогового преобразования отклонения указателя в электрический сигнал при помощи других позиционно-чувствительных фотоприемников (фотопотенциометров, продольных фотоэлементов, сплошных сканисторов) с последующим кодированием полученного сигнала. Однако такие АЦП достаточно сложны и их применение можно считать оправданным только в случае нелинейного преобразования сигналов. Такие преобразователи следует относить не к измерительным устройствам, а к устройствам функционального преобразования и обработки данных, которые будут рассмотрены отдельно.

Простейшие варианты АЦП пространственного кодирования

могут быть выполнены на основе совмещенного со шкалой световодного раstra, приемные торцы которого сканируются связанной с подвижной частью устройства (рамкой измерительного механизма) щелевой диафрагмой [А. с. 470646, СССР]*. При использовании многощелевой диафрагмы и двух цилиндрических волоконнооптических шкал (основной и нониусной) может быть существенно повышена разрешающая способность преобразования.

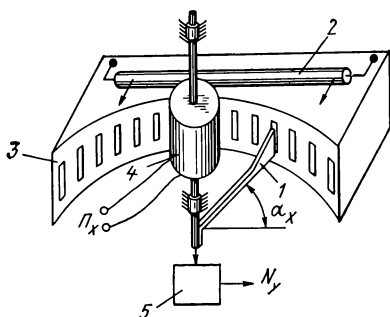


Рис. 1. АЦП пространственного кодирования на основе измерительного механизма

Еще более просто может быть реализован АЦП пространственного кодирования на основе измерительного механизма с прозрачной стрелкой-световодом, связанной с одним излучателем и набором фотоприемников или одним фотоприемником и набором излучателей. На рис. 1 показана конструкция АЦП пространственного кодирования с указателем-световодом 1, сканирующим излучатель 2 с многощелевой диафрагмой 3, образующими излучающий растр; по оси измерительного механизма 4, преобразующего входной параметр Π_x в угол поворота α_x , расположен связан с неподвижным торцом световода фотоприемник 5. На его выходе при отклонении α_x появляется сигнал N_x с числом импульсов, соответствующим количеству щелей, последовательно пройденных указателем-световодом в пределах угла α_x . Разрешающая способность преобразования определяется общим количеством щелей. Если выходной код N_x снова преобразовать в аналоговый сигнал Π_x' , который одновременно сравнить с Π_x , то на основе указанного устройства можно реализовать преобразование параметра одного вида Π_x (например, эффективного значения напряжения или активной мощности переменного тока) в параметр другого вида Π_x' , эквивалентный Π_x по энергетическому воздействию (например, напряжению или мощности постоянного тока).

Простота таких измерительных устройств (см. рис. 1) заключается в том, что их можно реализовать практически без изменения измерительного механизма, простой заменой обычной стрелки — указателя световодом. Конструкция излучающего раstra также сравнительно проста. Выбор фотоприемника облегчается тем, что он является точечным и сопрягается с практически неподвижным (вращающимся вокруг собственной оси) торцом световода, который к тому же может быть фокусирующим. В качестве фотоприемника может быть использован высокочувствительный фоторезистор, фотодиод с усилителем, лавинный фотодиод.

Несмотря на конструктивную простоту устройств прямого оптоэлектронного преобразования, в практике электрических измере-

* Здесь и далее А. с. — сокращение слов «авторское свидетельство».

ний более широкое распространение получили устройства компенсационного типа, в особенности для точного измерения интегральных характеристик периодических сигналов [12, 62]. Здесь компенсация вращающего момента измерительного механизма осуществляется обычно плавным или дискретным (при аналого-дискретном преобразовании) изменением противодействующего момента, создаваемого механически связанным с ним компенсационным механизмом, поэтому оптоэлектронный преобразователь (нуль-орган) такого компаратора работает в области малых отклонений и к нему не предъявляется требование высокой стабильности (достаточно лишь обеспечение высокой чувствительности). Учитывая возможность перекомпенсации (изменения знака рассогласования вращающих моментов измерительного и компенсационного механизмов), в качестве нуль-органа электромеханического компаратора целесообразно использовать классический фотокомпенсационный усилитель с дифференциальным фоторезистором. При этом требования к стабильности измерительного и компенсационного механизмов могут быть ослаблены, если вместо противодействующего момента регулировать (путем масштабирования в цепи измеряемого сигнала) вращающий момент измерительного механизма до сравнения его с фиксированным значением противодействующего момента [А. с. 416858, СССР]. Одновременно (за счет увеличения опорного противодействующего момента) могут быть ослаблены и требования к чувствительности оптоэлектронного нуль-органа, если функция преобразования является нелинейной с монотонно растущей производной (например, в случае преобразования эффективных значений напряжения или тока).

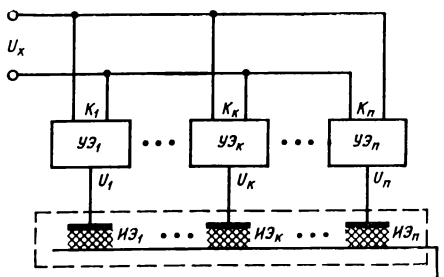
Еще один характерный пример использования оптоэлектронных преобразователей в автокомпенсационных устройствах — установки для проверки аналоговых показывающих приборов в оцифрованных точках шкалы [А. с. 197003, СССР]. Тщательное исследование всех влияющих факторов, включая выбор фотоприемника, привязку импульса считывания в оптоэлектронном преобразователе к середине штриха оцифрованной отметки шкалы и к стрелке поверяемого прибора, учет погрешностей от эксцентриситета и параллакса при совмещении указанных положений, учет динамики следящей системы — все это позволило оценить результирующую среднеквадратичную погрешность поверки на уровне 0,01%, что обеспечивает возможность поверки приборов класса 0,1. При этом погрешность поверяемого прибора определяется отклонением сигнала, соответствующего совмещению стрелки (указателя) с серединой штриха данной оцифрованной отметки шкалы, от соответствующего номинального значения.

2. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ БЕЗ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ С ВТОРИЧНЫМ ДИСКРЕТНО- АНАЛоговым ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ

Описываемые ниже устройства в определенной степени противоположны тем, которые описаны в предыдущем параграфе: во-первых, в них используют не оптоэлектронные, а электроннооптические преобразователи; во-вторых, они не только не нуждаются в подвижных электромеханических узлах, но и исключают их применение. Устройства, описанные выше, представляют собой опто-

Рис. 2. Обобщенная схема дискретно-аналогового преобразователя:

$ИЭ_1, \dots, ИЭ_n$ — дискретные электроннооптические индикаторные элементы (индексы шкалы); $УЭ_1, \dots, УЭ_n$ — управляющие элементы, U_1, \dots, U_n — пороговые напряжения индикаторных ячеек; K_1, \dots, K_n — коэффициенты преобразования управляющих ячеек; U_x — входной сигнал



электронные дискретизаторы непрерывных пространственных сигналов (перемещений), а приведенные ниже — электроннооптические преобразователи кодов в пространственное перемещение светового индекса или светового столба, которое воспринимается визуально как аналоговое (непрерывное). В принципе в устройствах этой группы возможно и полностью аналоговое преобразование электрической величины в перемещение (например, в структурах с распределенными параметрами, т.е. с непрерывно изменяемым вдоль электродов градиентом напряжения, при пороговых свойствах заключенного между электродами электроннооптического вещества — жидкого кристалла, люминофора и т.п.). Однако, как неоднократно отмечалось в литературе, такие устройства из-за неидеальности пороговых свойств электрооптического вещества имеют не резкую границу, а более или менее размытую зону отсчета [36]. В связи с этим в устройствах данной группы используется преимущественно дискретно-аналоговое преобразование, обобщенная схема которого показана на рис. 2. Поскольку при этом физическая реализация $ИЭ_i, УЭ_i$ не конкретизируется, параметры U_i, K_i ($i=1, \dots, n$) могут быть заданы в различных сочетаниях: $U_i=\text{const}, K_i=K(i)=\text{var}; U_i=U(i)=\text{var}; K_i=\text{const}; U_i=U(i)=\text{var}; K_i=K(i)=\text{var}$.

Во всех сочетаниях должен быть задан тем или иным способом так называемый параметрический сдвиг, т.е. закон дискретного изменения параметра вдоль шкалы. Ниже приводятся примеры устройств с различными способами задания параметрического сдвига [36].

Простейший вариант реализации соотношения $U_i=\text{const}; K_i=\frac{U_x}{n} i$ с помощью резистивного делителя РД показан на рис. 3.

Технологически элементы РД могут быть совмещены с индикаторными элементами на одной подложке, например, один из гребнеобразных электродов может быть выполнен в виде дискретно профилированного резистора [Пат. 3834794, США]*.

Простейшим вариантом реализации соотношения $K_i=\text{const}, U_i=\text{var}$ является параллельное подключение к U_x всех индикаторных ячеек $ИЭ_1, \dots, ИЭ_n$, пороговые напряжения которых изменяются пропорционально номеру ячейки, например за счет изменения концентрации электрооптического вещества в ячейках [А.с. 433409, СССР].

* Здесь и далее «Пат» — сокращение слова «патент».

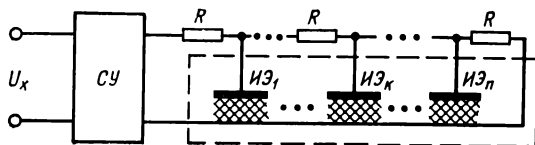


Рис. 3. Дискретно-аналоговый преобразователь с резистивным делителем напряжения:

$СУ$ — согласующее устройство; R — сопротивление звеньев $РД$; $ИЭ_k$ (где $k=1, \dots, n$) — индикаторные элементы; U_x — измеряемое напряжение

Примером комбинированного возбуждения дискретно-аналогового отсчетного устройства является схема (рис. 4), в которой индикаторные элементы $ИЭ_1, \dots, ИЭ_n$ представляют собой жидкокристаллические ячейки с пороговыми напряжениями, зависящими от дополнительного управляющего сигнала U_y , подводимого к ячейкам через трансформатор Tr и дополнительные элементы емкостного делителя C ; U_y может представлять собой напряжение повышенной частоты, изменяющее порог динамического рассеяния жидкого кристалла.

Для индикаторных элементов с нечетко выраженными пороговыми свойствами наряду с управляющими элементами, осуществляющими параметрический сдвиг, используются также ключевые (пороговые) элементы. В простейшем случае такими пороговыми элементами могут служить диоды, транзисторы, негатроны на халькогенидных стеклах и другие элементы [36].

Все описанные выше устройства формируют, во-первых, единичный код, управляющий индикаторными ячейками, а во-вторых, все элементы кода формируются параллельно, что дает аналоговый отсчет в виде столба определенной высоты или ширины. Однако формирование единичного кода является наименее экономным в связи с большим количеством управляющих элементов, а

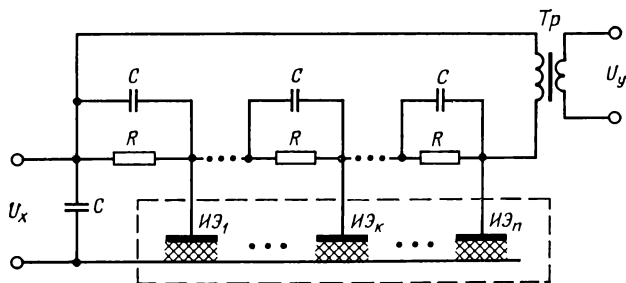


Рис. 4. Дискретно-аналоговый преобразователь с комбинированным возбуждением

параллельное возбуждение является наименее экономичным по потребляемой мощности, что может оказаться ощутимым для определенных видов индикаторных элементов (светодиодных, газоразрядных) и для приборов с автономным питанием. Устранение этих недостатков связано с использованием позиционного (например, двоичного) кодирования и последовательного возбуждения индикаторных элементов с помощью регистров сдвига. При этом индикаторные элементы могут подключаться к промежуточным выходам регистра или входить непосредственно в состав регистра, т.е. служить элементами формирования импульсов сдвига. Первый вариант обеспечивает более высокое быстродействие, а второй — сокращение аппаратных затрат за счет совмещения функций счета (при счетно-импульсном преобразовании) и индикации. Устройства подобного типа с промежуточным преобразованием, а также позиционным или число-импульсным кодированием и принято называть дискретно-аналоговыми [88], однако следует отметить, что описанные ранее устройства по существу также являются дискретно-аналоговыми, так как предполагают предварительное равномерное квантование измеряемой величины по уровню. Различие состоит не в наличии или отсутствии кодирования, а в характере кодирования (единичное параллельное или позиционное последовательное) и соответственно этому — в характере дешифрации (преобразования управляющих кодов).

Простейший вариант дискретно-аналогового показывающего прибора с оптоэлектронным регистром сдвига [65] показан на рис. 5, а.

На рис. 5, б показан пример реализации оптронного регистра сдвига с электронным тактированием, использованного в измерительных приборах с числоимпульсным преобразованием [А.с. 262279, СССР]. Оптическая связь $\Phi P'$ каждой БОЯ с ЭЛИ предыдущей ячейки реализует функцию сдвига, а связь ЭЛИ данной ячейки с $\Phi P''$ той же ячейки реализует функцию памяти. Импульсы сдвига возникают вследствие поочередной коммутации шин управления 1, 2 к источнику питания.

Дискретно-аналоговые показывающие приборы на оптоэлектронных регистрах сдвига достаточно просты в реализации, однако ввиду последовательного управления имеют низкое быстродействие, что является определенным недостатком при системном использовании; кроме того, в таких приборах для получения выходного позиционного кода необходимы дополнительные оптоэлектронные кодопреобразователи. В связи с этим представляют интерес и такие структуры дискретно-аналоговых показывающих приборов, в которых первичный код является параллельным позиционным (именно он передается во внешние цепи), а для управления индикаторными элементами используются различные кодопреобразователи (в том числе преобразователи параллельного кода в последовательный с буферным регистром параллельного кода, осуществляющим быструю выборку кода для последующей медленной индикации). Используются также и преобразователи параллельных кодов (дешифраторы), в том числе оптоэлектронные с оптическими линзами-сборками. Показано, что наиболее экономичным по количеству межсоединений и элементов дешифратора является матрично-групповой или многоканальный метод дешифрации, требующий, однако, специальных мер по устранению так называемого кросс-эффекта, т.е. паразитного возбуждения индика-

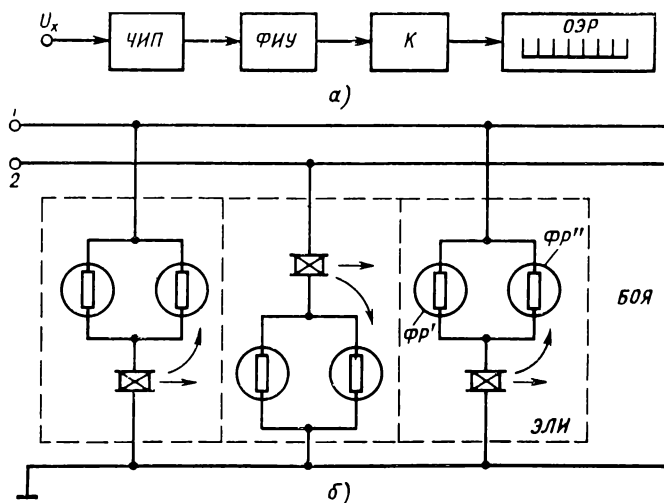


Рис. 5. Дискретно-аналоговый прибор с оптоэлектронным регистром сдвига:

а — блок-схема прибора; *ЧИП* — число-импульсный преобразователь; *ФИУ* — формирователь импульсов управления; *К* — коммутатор; *ОЭР* — оптоэлектронный регистр сдвига, излучающие элементы которого образуют индексы шкалы прибора; *б* — схема регистра сдвига; *ФР'*, *ФР''* — фоторезисторы; *БОЯ* — би-стабильные оптронные ячейки; *ЭЛИ* — электролюминесцентные излучатели; *1, 2* — шины управления

торных элементов, находящихся на пересечениях выбранных и невыбранных шин дешифратора. При этом индикаторные элементы могут объединяться в однокоординатное (линейное) или двухкоординатное (матричное) отсчетное устройство. Второй вариант проще в конструктивном и технологическом отношении, так как сокращает маршруты межсоединений, но значительно уступает первому в наглядности индикации. В практических разработках пока использован преимущественно второй вариант [10, 68], однако можно согласиться с выводом авторов работы [88] о том, что устройства с двухкоординатным (матричным) отсчетом мало перспективны по эргономическим соображениям. В этом смысле матричный отсчет не лучше поразрядного, т.е. двух раздельных аналоговых отсчетов в старшем и младшем разрядах. Более того, последний вариант даже предпочтительнее, так как при сравнимой сложности восприятия и одинаковых (по затратам оборудования) дешифраторах требует меньшего количества индикаторных элементов: при двухдекадном отсчете $10+10=20$ элементов, при матричном отсчете $10 \times 10 = 100$ элементов. Это может иметь существенное значение, если в качестве индикаторных элементов используются такие относительно дорогостоящие и дефицитные элементы, как полупроводниковые светодиоды. Кроме того, при подекадном отсчете принципиально не возникает кросс-эффект, так как цепи дешифрации и индикации старшей и младшей декад пространственно разделены. Попутно отметим, что наряду с прост-

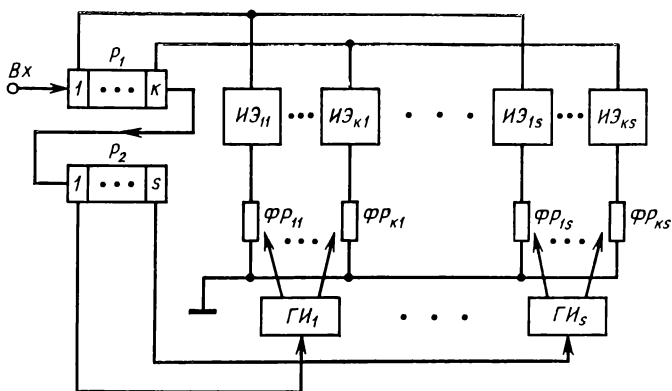


Рис. 6. Дискретно-аналоговый прибор с групповой коммутацией: P_1 , P_2 — сдвиговые регистры с k и s ячейками и соответствующим количеством промежуточных выходов; «Вх» — счетный вход; $ИЭ_{ij}$ ($i=1, \dots, k$; $j=1, \dots, s$) — индикаторные элементы; $ГИ_j$ — групповые излучатели; ΦP_{ij} — фоторезисторы, связанные с $ГИ_j$

ранственным разделением декад к тому же результату приводит и разделение во времени, т. е. подекадная коммутация дешифратора. В качестве примера построения дискретно-аналогового счетно-индикаторного устройства с разновременной групповой (например, подекадной) коммутацией рассмотрим схему, показанную на рис. 6 [А. с. 398875, СССР]. Исходным состоянием P_1 и P_2 является «1». При подаче на «Вх. 1» счетных импульсов, количество которых пропорционально измеряемому параметру, с выходов 2, ..., k , возбуждаются последовательно $ИЭ_2, \dots, ИЭ_k$, подготовленные к включению с помощью $ГИ_j$. При переполнении регистра младшего разряда P_1 последний возвращается в исходное состояние, а P_2 поступающим на его вход импульсом переводится в состояние «2», возбуждая $ГИ_2$ и тем самым подготавливая к включению $ИЭ_{22}, \dots, ИЭ_{2k}$ ($ИЭ_{21}$ включается сигналом с выхода «1» P_1). Далее процесс индикации счетных импульсов происходит аналогично до тех пор, пока последний импульс не зафиксируется соответствующим элементом $ИЭ_{ks}$. Практически для получения 100-элементной отсчетной шкалы удобно принимать $k=s=10$. Вместо оптронного группового управления с помощью $ГИ$ и ΦP можно использовать (в случае излучающих $ИЭ$) групповое управление модуляторами света, помещенными перед соответствующими $ИЭ$.

Описанное устройство обеспечивает упрощение дешифрации и сокращение межсоединений, однако не уменьшает количество индикаторных элементов. Возникает вопрос о возможности реализации однокоординатного отсчетного устройства с тем же (минимальным) количеством индикаторных элементов, что и при двухдекадном отсчете (20 шт. вместо 100 шт. в схеме рис. 6). Очевидно, что эта задача может быть решена только при мультипли-

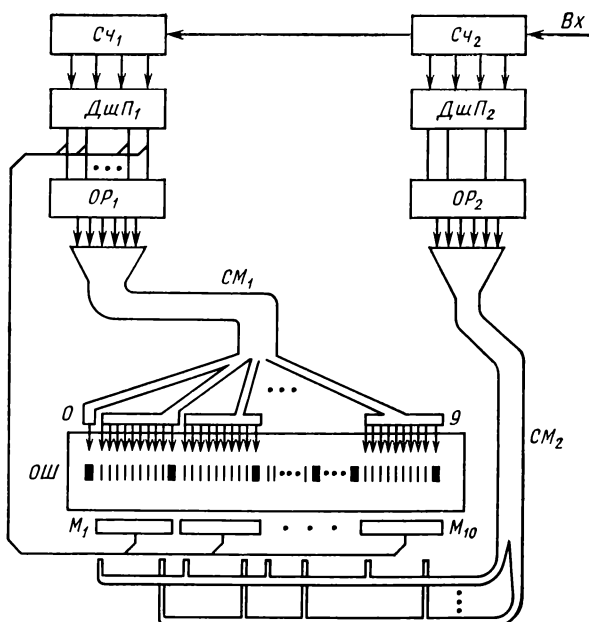


Рис. 7. Дискретно-аналоговый прибор со световодными мультипликаторами:

$C\check{c}_1, C\check{c}_2$ — двоичные счетчики старшего и младшего разряда (десятков и единиц); $ДшП_1, ДшП_2$ — двоично-десятичные дешифраторы с памятью; OP_1, OP_2 — оптические регистры-излучатели; CM_1, CM_2 — световодные мультипликаторы; $ОШ$ — отсчетная шкала; M_1-M_{10} — модуляторы света

цировании индикаторных элементов. На рис. 7 показана схема устройства дискретно-аналогового преобразования, реализующего такую возможность. До входных торцов CM_1, CM_2 структурная схема в точности соответствует подекадному отсчету с выходов OP_1, OP_2 . Благодаря CM_1 излучатель каждого десятка возбуждает также (на $ОШ$) световые штрихи предшествующих ему единиц, в результате чего OP_1 в целом соответственно k включенным излучателям возбуждает $10k$ световых штрихов. Одновременно с выходов $ДшП$ возбуждаются (переводятся в состояние прозрачности) $k+1$ модуляторов, через которые с помощью OP_2 и CM_2 дополнительно высвечиваются штрихи j единиц во всех десятках, где j — количество возбужденных излучателей в регистре единиц OP_2 . Однако поскольку открыты $k+1$ модуляторов, эти штрихи выводятся на $ОШ$ только для $k+1$ десятков. В результате на $ОШ$ образуется отсчет из k полных десятков и единиц в $(k+1)$ -м десятке (последние дублируются в каждом предшествующем десятке, что повышает достоверность отсчета).

Наличие памяти в дешифраторах позволяет не только получить одновременное возбуждение линеек излучателей в регистрах

(k излучателей в OP_1 , j излучателей в OP_2) и соответствующих световых штрихов на $OШ$, но и индцировать входную информацию, заданную в параллельном двоичном коде, что повышает быстродействие и расширяет функциональные возможности устройства, т.е. обеспечивает его сопряжение с АЦП различного принципа действия (счетно-импульсного, кодо-импульсного). Перспективность таких структур (см. рис. 7) определяется также возможностью использования малоэлементных светодиодных линеек и упрощением схем управления (дешифрации) по сравнению с многоэлементными индикаторами.

3. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Одной из традиционных областей применения средств оптоэлектроники в измерительной технике является область усиления сигналов низкого уровня с фотогальванометрическими усилителями. Такой усилитель содержит высокочувствительный гальванометр с зеркальцем, дифференциальный фоторезистор с измерительной схемой, электронный усилитель, осветитель с оптическими элементами.

В последнее время в измерительных усилителях широко используют оптронные развязывающие узлы, служащие для гальванического разделения цепей по постоянному току и улучшения подавления синфазных помех в дифференциальных усилителях. При этом основная трудность заключается в получении высокой стабильности коэффициента передачи усилителя по оптронному каналу, для обеспечения которой используют либо компенсационные схемы, либо широтно-импульсную (частотно-импульсную, фазо-импульсную) модуляцию с восстановлением постоянной составляющей сигнала.

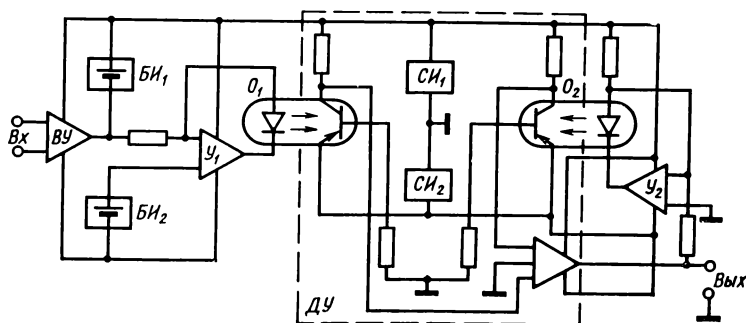


Рис. 8. Прецизионный масштабный преобразователь с оптронным разделением цепей:

$ВУ$ — входной усилитель; $У_1$, $У_2$ — согласующие усилители; $БИ_1$, $БИ_2$ — батарейные источники питания; $СИ_1$, $СИ_2$ — сетевые источники питания входной цепи; $ДУ$ — дифференциальный усилитель; $О_1$, $О_2$ — оптроны; $Вх$, $Вых$ — вход и выход устройства

На рис. 8 показана схема прецизионного масштабного преобразователя [Пат. 3818235, США] с гальваническим (оптронным) разделением входных и выходных цепей. При идентичности оптронов O_1 , O_2 и одинаковом токе смещения светодиодов напряжение $U_{вых} = U_{вх}$ благодаря цепи автокомпенсации на дифференциальном усилителе ДУ.

Повышение стабильности схем масштабных преобразователей с оптронными развязками, работающими в режиме преобразования динамических параметров (временных, фазовых, частотных), основано на том, что оптроны при достаточном быстродействии практически не искажают указанные параметры, а модулирующие и демодулирующие электронные узлы, согласующиеся с оптронами по входу и выходу, выполняются достаточно прецизионными. В работе [100] описан пример построения измерительного усилителя (масштабного преобразователя) с оптоэлектронным устройством гальванического разделения входных и выходных цепей, содержащим широко-импульсный модулятор, оптрон, ограничитель-формирователь и демодулятор (фильтр). В устройстве использованы три операционных усилителя типа К1УТ402 и оптрон типа Б83(Б). В динамическом диапазоне 0—10 В устройство обеспечивает стабильность коэффициента преобразования не хуже 0,1% при входном сопротивлении 100 кОм.

Другое применение оптронов в измерительных усилителях постоянного тока — оптоэлектронные модуляторы для усилителей низких уровней сигнала, построенных по схеме МДМ (модулятор-демодулятор) [46]. В лучших конструкциях фоторезисторных оптронных модуляторов на частотах порядка десятков — сотен Гц при ширине полосы в несколько единиц Гц получены уровни шумов порядка 0,1 мкВ и температурные смещения нулевого уровня около 0,1 мкВ/°С при общей величине смещения нулевого уровня в несколько единиц мкВ.

Кроме этого, существует еще одна область применения оптронов в электроизмерительной технике — преобразование переменного тока в постоянный. В данном случае применяют преимущественно оптронные пары типа лампочка накаливания — фоторезистор, обеспечивающие преобразование переменных токов по эффективному (среднеквадратическому) значению. Такие оптронные узлы используют в компараторах переменного и постоянного токов, измерительных преобразователях эффективных значений, калибраторах и стабилизаторах переменного тока, в корреляторах инфранизких частот и других электроизмерительных устройствах. Поскольку основная особенность таких оптронных узлов заключается в выполнении нелинейного функционального преобразования, их широко используют также в различных аналоговых моделирующих устройствах; более подробное описание функциональных оптронных преобразователей дано в гл. 2. Здесь отметим возможность использования оптронов в преобразователях мгновенных и амплитудных значений сигналов переменного тока. Обеспечиваемое при этом гальваническое разделение цепей особенно полезно при измерении высоких напряжений и больших токов в линиях электропередач (ЛЭП).

На рис. 9 приведена схема измерения в ЛЭП [Пат. 47—27907, Япония]. При этом усилитель U_1 является инвертирующим, а U_2 — суммирующим, в связи с чем на выходе U_2 восстанавливается сигнал исходной формы. Устройства подобного типа можно исполь-

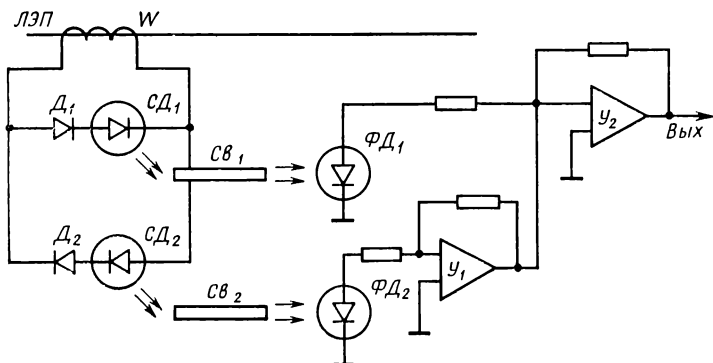


Рис. 9. Измерительный преобразователь напряжений в ЛЭП с оптронным разделением цепей:

W — обмотка связи; D_1, D_2 — диоды; CD_1, CD_2 — светодиоды; CV_1, CV_2 — световоды; FD_1, FD_2 — фотодиоды; Y_1, Y_2 — усилители

зовать для осциллографического измерения напряжений в ЛЭП. При отсутствии в схеме инвертора Y_1 и введении емкостной обратной связи в Y_2 она выполняет функцию преобразования средневывпрямленных значений напряжения (тока).

Наряду с рассмотренными некогерентными преобразователями и регистраторами в последнее время в измерительную технику стали проникать когерентные (лазерные) измерительно-регистрирующие средства. Как обычно, новые средства стали применять сначала в рамках традиционных технических решений, например, в гальванометрах со световым указателем, где введение лазера позволило увеличить разрешающую способность, уменьшить расходимость луча, обеспечить регистрацию на термочувствительной бумаге [94]. В лазерных осциллографах для повышения интенсивности луча предложен режим регулируемой добротности с повышением мощности излучения в течение импульса регистрации [А.с. 336603, СССР]. В дальнейшем не только режим управления интенсивностью (модуляции) лазерного луча, но и режимы его отклонения (сканирования) в измерительно-регистрирующих устройствах стали приобретать определенную специфичность; на смену механическим отклоняющим устройствам пришли электронные, точнее, электрооптические, магнитооптические, акустооптические. Для лазерных осциллографов особый интерес представляют отклоняющие устройства на жидких кристаллах, обеспечивающие аномально большие углы отклонения луча (десятки угл. градусов) [А.с. 305416, СССР]. Дальнейшее развитие этой перспективной области измерительной техники приобретает все более узкую специализацию, связанную с решением задач лазерной микрорегистрации, методы и средства которой будут рассмотрены в гл. 3.

Ряд приложений оптоэлектроники к измерительной технике связан с использованием различных комбинированных физических эффектов — фотоэлектрических, фотоманитных, фототермических и др.

Прецизионные измерители напряженности магнитного поля или тока могут быть построены на основе эффекта оптической ориентации атомов [48]. Сущность этого эффекта заключается в том, что фотоны поляризованного светового излучения, взаимодействуя с атомами камеры поглощения, помещенной в магнитное поле, вызывают преломление атомов, сопровождаемую стимулированным резонансным излучением определенной частоты, зависящей от напряженности магнитного поля. Высокая точность преобразования определяется тем, что коэффициенты зависимости частоты от напряженности являются физическими константами, а частота — один из тех параметров, для измерения которых метрология располагает наиболее точными и совершенными методами.

В работе [113] описан новый эффект возникновения разности потенциалов на поверхности тонких ($500\text{--}2700\text{ \AA}$) пленок молибдена и вольфрама при их облучении короткими ($\sim 5\text{ нс}$) импульсами лазерного света ($\sim 50\text{ мВ}$ на 1 кВт падающей мощности в видимой и ближней ИК-области). Это открывает возможность использования подобных фотодатчиков в устройствах контроля и стабилизации интенсивности излучения в лазерных регистраторах, технологических установках (например, для лазерной подгонки прецизионных резисторов в микросхемах), лазерных дальномерах, локаторах и других устройствах, в которых использовано мощное импульсное излучение лазеров.

Контроль может осуществляться путем сравнения лазерной термоЭДС с опорным сигналом, а стабилизация — путем изменения добротности лазера.

Широки и многообразны применения средств оптоэлектроники в устройствах ввода и вывода информации в измерительных системах. Поскольку устройства вывода (отображения) будут рассмотрены отдельно, остановимся на некоторых применениях средств оптоэлектроники в устройствах ввода дискретной (цифровой) и аналоговой (графической) информации.

Основными элементами ввода цифровой информации являются устройства считывания с перфолент и перфокарт, а при ручном вводе — клавиатуры с элементами запоминания и преобразования кодов. В оптоэлектронных клавишных устройствах используют различные прерыватели светового потока для избирательного возбуждения фотоприемников. При нажатии клавиш могут избирательно включаться модулирующие (светоклапанные) ячейки, например, выполненные на жидких кристаллах [Пат. 3844637, США]. Кроме этого, каждая клавиша может быть связана с определенной кодирующей маской, введение которой между излучателем и многоэлементным (например, матричным) фотоприемником определяет некоторую кодовую комбинацию [Пат. 3818485, США]. Преимущество второго варианта оптоэлектронного задания кода заключается в отсутствии контактных элементов коммутации и возможности введения с помощью одиночных клавиш сложных кодовых комбинаций (команд) без каких-либо промежуточных преобразований. В оптоэлектронных перфоприемниках (устройствах считывания с перфолент и перфокарт) используют обычно общий излучатель и матричный фотоприемник, возбуждаемый избирательно через перфорационные отверстия. В связи с трудностями согласования размеров перфокарт (перфолент) и фотоприемных матриц, а также критичностью последних к погрешностям ориентации между носителями информации и фотоприемниками устанавливают световод-

ные кабели (фоконы), выполняющие необходимые геометрические преобразования и интегрирование светового потока.

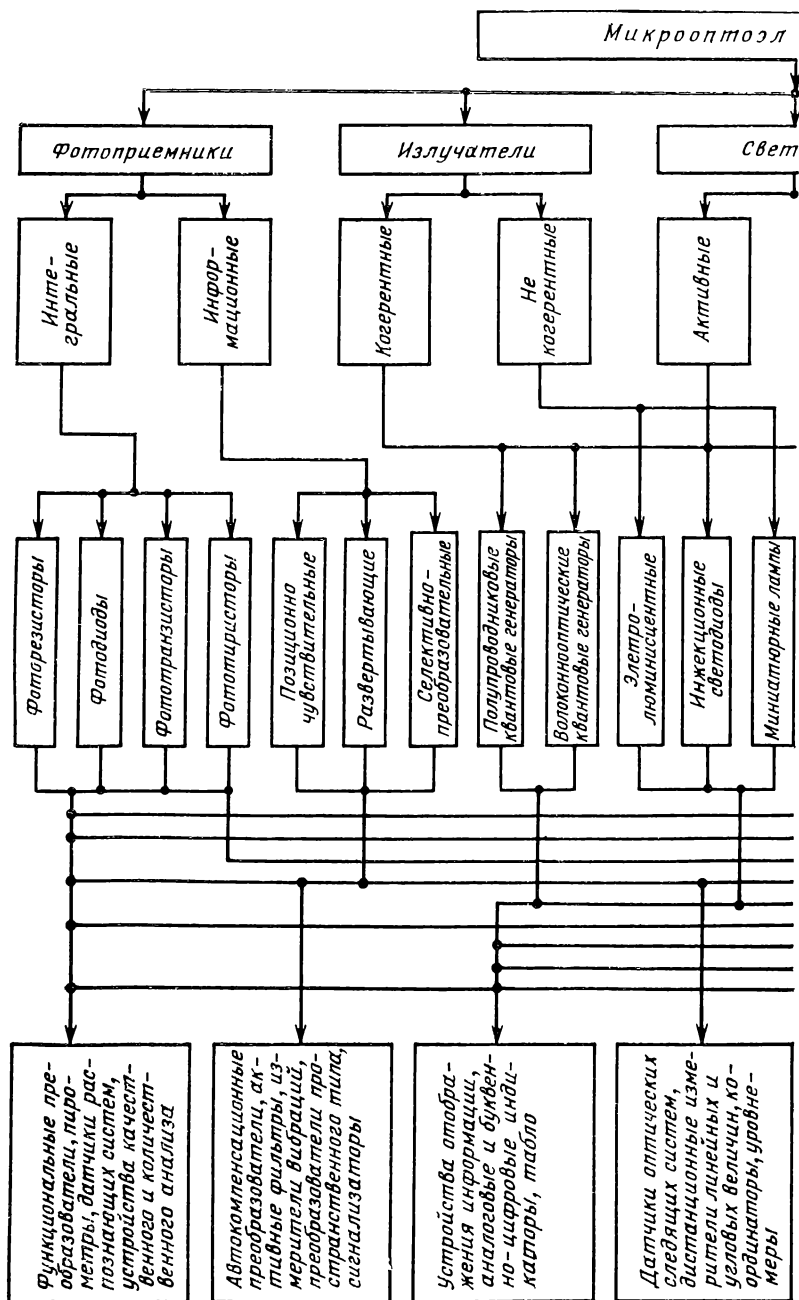
В устройствах считывания и кодирования графически заданных функций используют одномерное непрерывное или дискретное (шаговое) перемещение носителя относительно линейки или раstra кодирующих фотоприемников, связанных с элементами дешифратора (кодопреобразователя). При использовании волоконных жгутов (световодов) последние могут выполнять как функции считывания, так и функции кодирования и дешифрации, а также устранения неоднозначности кодирования при освещении (или затемнении) смежных жгутов оптических волокон (например, путем выдачи сигнала, разрешающего считывание состояний фотоприемников только при возбуждении центральной части любого из светопроводов). Наиболее экономичны считывающие устройства на сканисторах, которые преобразуют пространственное положение ординаты графика (световой или теневой полосы) во временной интервал; при этом легко осуществляется квантование преобразованного сигнала (заполнение интервала счетными импульсами) и принципиально исключается его неоднозначность.

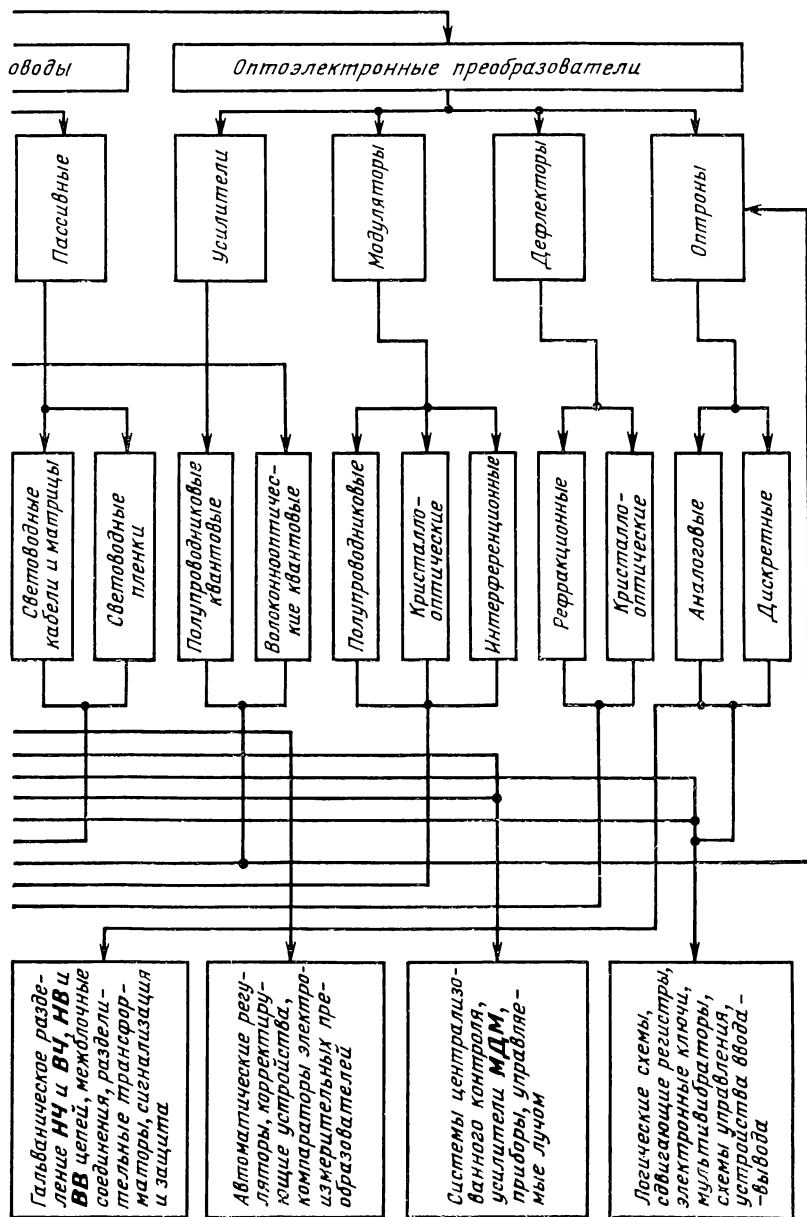
Одним из наиболее массовых приложений оптоэлектроники к измерительной технике является использование развязывающих и коммутирующих оптронов. Большой частью их используют для передачи дискретных (кодированных) или частотно-временных сигналов, например, в дешифраторах, схемах управления электролюминесцентными и газоразрядными табло, в цепях гальванического разделения измерительных устройств с время-импульсным или частотно-импульсным выходом и счетно-индикаторных устройств. Вместе с тем развязывающие и коммутирующие оптроны применяют в качестве коммутаторов аналоговых сигналов или элементов регуляторов в масштабных преобразователях, в частотозадающих цепях генераторов, в параметрических и компенсационных стабилизаторах, а также в цепях управления фазовращателей, фазовых детекторов и фильтров, автоматической регулировки усиления, регулировки гистерезиса релейных схем и других узлах электроизмерительных устройств [92].

Помимо упомянутых приложений оптронов можно отметить широкое применение светодиодов в индикаторах полярности напряжений, а также в различных пробниках и устройствах контроля правильности монтажа, в цепях сигнализации перегрузок и повреждений [54, 96].

Провести достаточно полную и строгую систематизацию всех возможных применений оптоэлектроники в электроизмерительной технике не представляется возможным в связи с исключительным разнообразием измерительных задач и средств их решения. Можно, однако, дать некоторую систематизацию для класса задач, связанных с микроминиатюризацией электронной измерительной аппаратуры [16].

В соответствии с таким подходом из всей совокупности средств оптоэлектроники выделены элементы и структуры, с одной стороны, поддающиеся миниатюризации, а с другой стороны, не требующие использования таких элементов и узлов, которые принципиально или технически не могут быть миниатюризованы. Выделенные элементы и структуры составляют четыре основных класса: фотоприемники (Φ), излучатели (I), световоды (C), оптоэлектронные (оптронные) преобразователи (O).





Фотоприемники делятся на интегральные (ИФ) и информационные (ИнФ). К ИФ относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. Среди ИнФ различают позиционно-чувствительные, развертывающие и селективно-преобразовательные.

Позиционно-чувствительные Φ предназначены для определения местоположения единичных излучающих объектов, спроецированных на их чувствительную поверхность. В эту подгруппу устройств входят разрезные фоторезисторы и фотодиоды, продольные фотоэлементы, фотоприемники с радиальным электрическим полем, с эффектом фокусировки, фотопотенциометры, дрейфовые время-импульсные Φ .

Развертывающие Φ осуществляют одномерное либо двумерное разложение изображения, являясь в известной степени твердотельными аналогами передающих телевизионных трубок, и не содержат сканирующих систем, выполняющих функции развертки или коммутации элементов изображения. Сюда относятся сплошные и дискретные сканисторы, видисторы, Φ с эффектом Суля и эффектом Ганна, дрейфовые сканисторы, фотодиодные матрицы, фотонейристорные линии и др.

Селективно-преобразовательные Φ используются для выделения из всего оптико-параметрического поля наиболее существенной при решении поставленной задачи информации. Эта подгруппа устройств содержит селекторы спектра излучения, распознающие Φ .

Класс излучателей включает источники когерентного (КИ) и некогерентного (НИ) излучения. В группу КИ миниатюрного исполнения входят полупроводниковые и волоконно-оптические квантовые генераторы. В последних в качестве активной среды используют специальные оптические волокна с активирующими присадками. Группа НИ миниатюрного исполнения объединяет электролюминесцентные И и светодиоды, а также миниатюрные накальные и газоразрядные лампы.

Световоды представлены двумя видами: активными С, используемыми в волоконно-оптических квантовых генераторах и усилителях, и пассивными С, к числу которых относятся световодные кабели, световодные матрицы-фоконы, пленочные С и др.

Оптоэлектронные (оптронные) преобразователи делятся на четыре группы: усилители, модуляторы, дефлекторы и оптроны.

Миниатюрные когерентные усилители, подобно КИ, могут быть выполнены на полупроводниковых или волоконно-оптических активных элементах.

Миниатюрные модуляторы можно строить, используя некоторые электрооптические явления в полупроводниках (смещение края полосы поглощения под действием электрического поля, давления, температуры; поглощение фотонов свободными носителями тока и др.), интерференцию излучения, а также эффекты прохождения и отражения излучения, наблюдаемые в жидких кристаллах.

В дефлекторах используют явления рефракции, дифракции и электрооптические свойства кристаллов (электрооптических, магнитооптических, акустооптических).

В зависимости от способа преобразования различают дискретные и аналоговые оптроны. В оптронах используют временную и пространственную модуляцию оптического сигнала, что предполагает наличие в структуре оптрона модулятора или (и) дефлектора. При прочих равных условиях это снижает допустимую степень

миниатюризации, а в ряде случаев и быстроедействие оптрона, однако расширяет его функциональные возможности. Приложения указанных элементов приведены на рис. 10.

Следует отметить, что возможности миниатюризации измерительной аппаратуры с применением оптоэлектронных элементов и узлов связаны не только с тем, что по степени интеграции компонентов оптоэлектронные структуры не уступают электронным, но также и с особыми свойствами оптоэлектронного преобразования: гальванической развязкой цепей, возможностью реализации двумерных и трехмерных структур, естественностью реализации параллельного пространственного преобразования элементов изображения или информационных параметров и др. Поэтому эффект миниатюризации при использовании оптоэлектронных элементов может быть получен и тогда, когда эти элементы не являются миниатюрными, однако экономия в количестве элементов и межсоединений по сравнению с электронными структурами с избытком компенсирует увеличение размеров.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПТРОННОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ, ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЗАДАЧАМИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Для информационных систем представляют интерес все виды преобразований с входными, промежуточными и выходными пространственными (оптическими) сигналами — P : $S \rightarrow P$; $D \rightarrow P$, $P \rightarrow P$, $P \rightarrow S$, $P \rightarrow D$. Здесь $S \rightarrow P$, $D \rightarrow P$ — электроннооптические преобразования, $P \rightarrow P$ — оптические, $P \rightarrow S$, $P \rightarrow D$ — оптоэлектронные. Прежде чем определить области преимущественного или предпочтительного применения указанных преобразований в информационных системах, выясним их общие свойства и особенности безотносительно к данному или любому другому конкретному использованию. Начнем с собственно оптических преобразований. В последнее время интерес к исследованиям в этой области в значительной степени стимулируется развитием голографии и когерентной оптики применительно к созданию оптических вычислительных машин [75]. Отметим свойства оптических, в особенности когерентных преобразований, которые привлекают внимание проектировщиков ЭВМ.

Рассмотрим схемы когерентных оптических корреляторов, осуществляющих корреляционный анализ фотозаписей анализируемых функций [32]. Первый метод корреляционного анализа, использованный в корреляторе С-100, реализуется по оптической схеме, представленной на рис. 11.

Благодаря подавлению постоянной составляющей опорного сигнала с помощью ФПС на выходе АС получим одномерное распределение напряженности поля световой волны:

$$E(\omega_x, \xi) = \frac{E_0}{\lambda F} \int_{-L/2}^{L/2} f_0(x) f(x - \xi) \exp(-j\omega_x x) dx, \quad (4)$$

где E_0 — амплитуда; λ — длина волны света; ω_x — пространственная частота; F — фокусное расстояние астигматической системы; L — пространственный интервал интегрирования, определяемый входной апертурой астигматической системы.

Для обращения выражения (4) в функцию кросс-корреляции $f_0(x)$ и $f(x)$ в плоскости пространственных частот астигматической системы на ее оптической оси устанавливают диафрагму, которая выделяет сигнал в области нулевой пространственной частоты, чем обеспечивается необходимое требование $\exp(-j\omega_x x) = 1$. Поскольку фотодетектор ФД является квадратичным, его показания соответствуют квадрату функции кросс-корреляции. При $f_0(x) = f(x)$ уст-

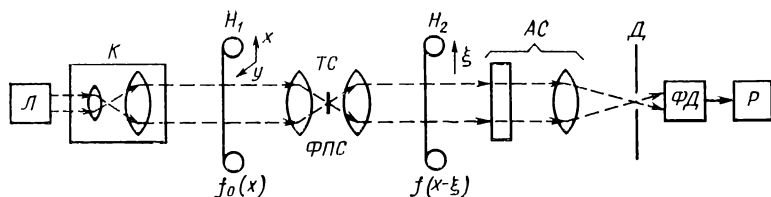


Рис. 11. Когерентный оптический коррелятор, использующий фото-записи опорной и сигнальной функций:

Л — лазер; К — коллиматор; H_1 , H_2 — носители с записями опорной $f_0(x)$ и сигнальной (со сдвигом) $f(x-\xi)$ функций; ТС — телескопическая система линз; ФПС — фильтр постоянной составляющей; АС — астигматическая система из цилиндрической и сферической линз; Д — диафрагма; ФД — фотодетектор; Р — регистратор

ройство (см. рис. 11) вычисляет автокорреляционную функцию сигнала.

Второй метод корреляционного анализа фотозаписей сигналов, основанный на умножении их спектров в плоскости пространственных частот, реализуется в схеме, показанной на рис. 12.

В задней фокальной плоскости АС, т.е. на носителе H , формируется спектр Фурье $F_0(\omega_x)$ опорной функции $f_0(x)$ без постоянной составляющей, исключаемой ФПС; в результате его перемножения с записью спектра Фурье сигнальной функции $F(\omega_x)$, размещенной на том же носителе, получим амплитуду модулированной световой волны $E(x) = E_0 F_0(\omega_x) F(\omega_x)$, где E — амплитуда немодулированного сигнала; $\omega_x = \frac{2\pi x}{\lambda F}$ — пространственная частота.

Вторая астигматическая система линз AC_2 выполняет обратное преобразование Фурье функции $E(x)$, в результате которого на выходе AC_2 имеем

$$\begin{aligned} E(\omega_x, \xi) &= E_0 \int_{-L/2}^{L/2} F_0(\omega_x) F(\omega_x) \exp(-j\omega_x \xi) d\omega_x = \\ &= E_0 \int_{-L/2}^{L/2} f_0(x - \xi) f(x) dx, \end{aligned} \quad (5)$$

где ξ — координата в задней фокальной плоскости AC_2 .

Известны также корреляторы с применением амплитудных масок, вращающихся в противоположных направлениях и образующих перестраиваемые муаровые картины [32]. При этом возможна замена поступательного перемещения фотопленки вращательным перемещением масок, что дает возможность выполнения покадровой обработки на неподвижном носителе.

В отношении выбора формы представления сигналов на входе оптической системы отметим то обстоятельство, что избыточность двумерного представления может быть использована не только для многоканальной обработки одномерных функций, но также для дву-

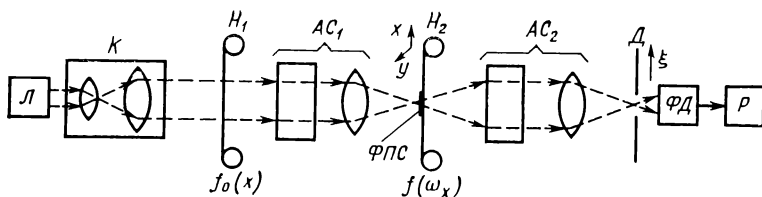


Рис. 12. Когерентный оптический коррелятор, использующий фото-записи опорной и спектра Фурье сигнальной функций:

Л — лазер; К — коллиматор; H_1 , H_2 — носители фотозаписей опорной $f_0(x)$ и спектра Фурье сигнальной $F(\omega_x)$ функций; AC_1 , AC_2 — астигматические системы линз; Д — перемещаемая (ξ) диафрагма; ФД — фотодетектор; Р — регистратор; ФПС — фильтр постоянной составляющей

мерного представления функций на плоскости с помощью точек с координатами x , $f(x)$ или столбцов с координатой x и длиной столбца $f(x)$. В работе [35] показано, что первый вариант (контурное представление) имеет преимущество перед вторым (силуэтное представление) по чувствительности к форме сигнала. Вместе с тем оба указанных варианта двумерного представления обладают важным преимуществом перед одномерным представлением — простотой двумерного транспаранта и возможностью его дискретной реализации, тогда как одномерный транспарант должен быть по необходимости аналоговым. Кроме усложнения реализации одномерное аналоговое (амплитудное) представление связано также с зависимостью от свойств материала транспаранта. С другой стороны, двумерное пространственное представление, помимо устранения указанного влияния, позволяет стабилизировать яркость излучения, которая зачастую (например, при вычислении так называемой нормированной функции кросс-корреляции) не является информативным параметром. Выполнение же стабилизации в оптическом тракте упрощает реализацию электронной части устройства. В работе [1] приведена схема коррелятора электрических сигналов с нормировкой в оптическом тракте (рис. 13).

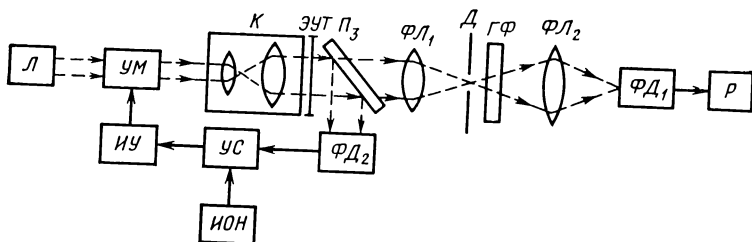


Рис. 13. Когерентный коррелятор с нормировкой в оптическом тракте:

Л — лазер; УМ — управляемый модулятор; К — коллиматор; ЭУТ — электронно-управляемый транспарант; ПЗ — полупрозрачное зеркало; ФЛ₁, ФЛ₂ — фокусирующие линзы; Д — диафрагма; ГФ — голографический фильтр; ФД₁, ФД₂ — фотодетекторы; Р — регистратор; ИОН — источник опорного напряжения; УС — устройство сравнения; ИУ — интегрирующий усилитель

Поскольку прямой тракт оптического преобразования в целом сошел с рассмотренными ранее структурами, отметим лишь то обстоятельство, что для более точного выполнения условия нормировки необходимо обеспечить идентичность фотодетектора прямого тракта ΦD_1 и фотодетектора нормирующей обратной связи ΦD_2 .

Дискретная форма представления не только повышает точность ввода информации и обеспечивает независимость от свойств носителя, о чем говорилось выше, но и позволяет существенно изменить характер ввода и обработки данных. В частности, при дискретной форме представления наряду с электронно-управляемыми транспарантами могут быть использованы оптически управляемые транспаранты, что открывает возможность построения когерентных оптических ЦВМ [87]. Не входя пока в обсуждение всех относящихся сюда вопросов, отметим принципиальное отличие подходов к построению (с применением оптических средств) универсальных ЦВМ и аналоговых специализированных ЭВМ рассмотренных выше типов. В работе [75] показано, как средствами голографии в когерентных оптических системах может быть реализовано дискретное (двоичное) преобразование. Однако кажущаяся простота преобразования «точечных голограмм» оказывается весьма обманчивой. Именно поскольку для преобразования одной дискретной единицы информации требуются, в принципе, те же оптические элементы, что и для обработки сложных изображений (сигнальный, опорный и приемный транспаранты, фокусирующие линзы и диафрагмы), то при каскадировании простейших логических элементов количество оборудования очень быстро возрастает. При параллельной же обработке во многих отношениях полезное свойство ассоциативности голограмм (вообще оптических спектральных преобразований) оказывается серьезным препятствием к реализации сложных логических схем в связи с неоднозначностью кодирования. Следовательно, при переходе от аналоговых оптических вычислительных устройств к дискретным необходимо решить две проблемы: во-первых, выбрать оптимальным образом основание счисления и тем самым степень интеграции компонентов в структуре, во-вторых, обеспечить однозначность (единственность и однозначность) оптического преобразования.

На примере работы [63] покажем один из возможных вариантов решения указанных проблем. В первую очередь авторы данной работы приняли за базовую не двоичную, а десятичную систему счисления. Далее для кодирования чисел авторы использовали микроинтерферограммы простейшей формы, обеспечив при этом однозначность преобразования двух интерферограмм в третью при выполнении базовых операций суммирования и умножения (тем самым и дуальных по отношению к ним операций вычитания и деления). Для создания простейшей интерферограммы синтезирован излучатель чечевицеобразной формы, обеспечивающий распределение световой энергии в виде двулучевого (развернутого на 180°) веера. Авторы показали, что при расположении на носителе нескольких отдельных диафрагм чечевицеобразной формы, с различной угловой ориентацией осей, их интерферограммы в результате суперпозиции в дальней зоне формируют многолучевую световую веер из $2n$ парциальных лучей, исходящих из общего центра, где n — число диафрагм. Дальняя зона для видимого света составляет около 1 м, что, естественно, ограничивает быстродействие ЦВМ и недопустимо увеличивает их габаритные размеры. Это затруднение

преодолевается путем введения микролинзы-коллиматора, создающей эффект дальней зоны на удалении, равном фокусному расстоянию. Однозначность этой суперпозиции по существу означает принципиальную возможность реализации операции суммирования. Практическая реализация предполагает также решение задач мультиплицирования и адресации интерферограмм. Анализ работы [63] показывает, что именно решение этой задачи является камнем преткновения и приводит к недопустимому усложнению подобных арифметических устройств. Так, для реализации перемножения двух одноразрядных десятичных чисел необходимо 100 параллельных оптических каналов с согласованными оптическими фильтрами в каждом канале. Реализация операции суммирования также существенно избыточна, поскольку суммирование выполняется дважды: в интерферограмме каждого тракта (первое и второе слагаемое) суммируются лучи, соответствующие единицам счета, а затем суммируются обе интерферограммы.

В отличие от интерферометрических структур, в картинных (матричных) вычислительных устройствах [29] проще всего реализуется операция поэлементного перемножения (на пассивных матричных картинах-транспарантах). Однако для реализации полного набора арифметических и логических операций здесь также, помимо типовых пассивных оптических элементов (зеркал, призм, коллиматоров, фазовых пластин, пассивных картин-транспарантов), необходим достаточно широкий набор активных (управляемых) элементов-модуляторов, дефлекторов, усилителей изображений, матричных модуляторов с памятью, а также многоэлементных (матричных) фотоприемников.

Рассмотрим возможность реализации матричных устройств, «картинной» логики и, в частности, арифметических устройств, базирующихся на идее (использованной ранее в аналоговом варианте) двумерного или двухкоординатного представления числа в плоскости информационной картины [33].

Целое двоичное число A будем рассматривать [33] как двумерную функцию вида

$$A(x, y) = \sum_{i=1}^n a(x - x_i) \delta_{i0}, \quad (6)$$

где $a(x - x_i) = \begin{cases} y & \text{при } (i-1)l \leq x - x_i \leq il \\ 0 & \text{при } x - x_i > il, \quad x - x_i < (i-1)l, \end{cases}$

$x_i = i \frac{l}{2}$, δ_{i0} — символ Кронекера, а целое число B — как двумерную функцию вида

$$B(x, y) = \sum_{i=1}^n b(y - y_i) \delta_{i0}, \quad (7)$$

где $b(y - y_i) = \begin{cases} x & \text{при } (i-1)l \leq y - y_i \leq il \\ 0 & \text{при } y - y_i > il, \quad y - y_i < (i-1)l. \end{cases}$

В соответствии с выражениями (6), (7) транспарант числа A является фильтром со столбцовой диаграммой прозрачности, при-

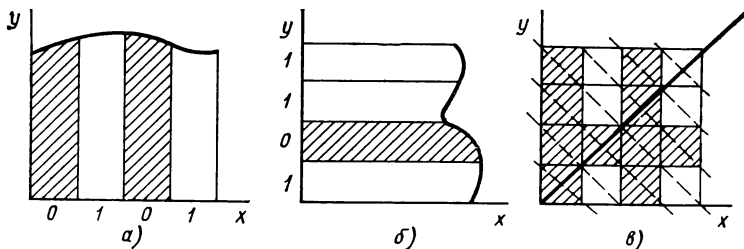


Рис. 14. Арифметические операции над числами, представленными одномерными транспарантами:

а, б — соответственно фильтры A и B ; в — результат перемножения (AB)

чем непрозрачные столбцы соответствуют нулевым, а прозрачные — единичным разрядам числа A ; аналогично транспарант числа B является фильтром со строчной диаграммой прозрачности, а произведение прозрачностей, соответствующее последовательному прохождению указанных фильтров, представляет собой двумерную матрицу, из которой может быть получена информация как о сумме чисел A, B , так и об их произведении. Действительно, как видно из рис. 14, сумма чисел $A+B$ считывается по диагонали, показанной сплошной линией, а произведение $A \cdot B$ находится по диагоналям, показанным штриховыми линиями, причем преобразование этой двумерной функции в двоичное число сводится к суммированию состояний ячеек с одинаковыми разрядами вдоль штриховой линии. Считывание может осуществляться последовательно (например, с помощью дефлектора), однако при этом неизбежна потеря быстродействия и к тому же не исключаются логические (в частности, счетные) операции в электронной части устройства. Возможно также параллельное считывание с использованием методов и средств распознавания образов, однако при этом необходимо располагать мультипликатором изображений и согласованными фильтрами с картинными изображениями всех сумм и произведений, что значительно усложняет реализацию. Наконец, возможно оптоэлектронное параллельно-последовательное считывание, например, при помощи расположенных вдоль диагоналей считывания (штриховыми линиями на рис. 14, в) последовательно соединенных сканисторов, выходы которых подключены ко входам параллельного двоичного сумматора [А.с. 463969, СССР].

В заключение рассмотрим подход к созданию оптических ЦВМ, основанный на изучении элементной базы оптических и электронных преобразований [50].

Отмечая перспективность специализированных когерентных оптических вычислительных устройств аналогового типа, авторы работы [50] справедливо отмечают, что разработки цифровых вычислительных устройств на основе «картинной» логики оказались непригодными для реализации универсальных ЭЦВМ в связи с тем, что они не могли в полной мере удовлетворить или игнорировали требования к элементной базе. Один из основных выводов работы [50] заключается в том, что в элементной базе оптических ЦВМ наряду с оптическими элементами должны быть представлены активные электрооптические элементы (преобразователи).

На основе проведенного анализа авторы работы [50] определили следующую номенклатуру элементов, необходимых для построения электроннооптических вычислительных устройств: 1) лазерный источник света; 2) многопозиционный дефлектор света с произвольной выборкой; 3) многоэлементный световой модулятор (транспарант) с электронным управлением и оперативной памятью (ЭУТ); 4) многоэлементный световой модулятор-транспарант с оптическим управлением (ОУТ); 5) оперативный оптический накопитель — запоминающая оптическая среда; 6) многоэлементный приемник оптического изображения — матрица фотоприемников; 7) когерентный инвертор изображения (элемент «НЕ»); 8) когерентный усилитель изображения (усилитель яркости). Электронноуправляемый транспарант с памятью (ЭУТ) необходим для построения или поэлементного ввода оптической информации. После заполнения всего кадра ЭУТ просвечивается тактовым световым импульсом и изображение числовой картины поступает на входную плоскость устройства оптической обработки. Отсюда ясно, что ЭУТ обладают низкой оперативностью ввода и потому пригодны главным образом для сопряжения с электронными средствами управления, а также клавиатурой ввода данных сравнительно небольшого формата. Для повышения скорости ввода и увеличения формата данных, подлежащих дальнейшей обработке, используется оптически управляемый транспарант (ОУТ) совместно с двухкоординатным дефлектором света.

Заключая проведенный обзор и анализ методов и средств оптической обработки информации, отметим, что не все перечисленные элементы оптических вычислительных устройств необходимы для построения информационных систем и, в частности, информационно-измерительных систем (ИИС). Именно, поскольку ИИС, как правило, используют обработку в реальном масштабе времени, для них необязательно использование оптических накопителей (в частности, голографических ЗУ) с громадным объемом памяти. Что же касается повышения оперативности ввода данных за счет его параллельной организации, то это преимущество может оказаться нереализованным из-за того, что данные фактически поступают последовательно, а изготовление голограммы в реальном масштабе времени встречает значительные технические трудности.

С другой стороны, некоторые свойства базовых элементов, несущие в отношении универсальных ЦВМ, могут оказаться весьма существенными для ИИС. Именно в ЦВМ входная информация поступает в цифровой форме, тогда как в информационных системах контроля и управления, в частности в ИИС, информация поступает в аналоговой форме и зачастую выполняемые над ней преобразования имеют своей целью выделение информационных признаков и устранение влияния различных неинформативных параметров в реальном масштабе времени. Естественно, что в этом случае функциональную обработку рационально выполнять в тракте аналогового или аналого-дискретного, а не цифрового преобразования. В связи с этим используемые базовые элементы, точнее говоря элементарные преобразователи, должны обладать дополнительным важным свойством — гибридностью, т.е. пригодностью к использованию как в цифровых, так и в аналоговых структурах. Это значит, что физически преобразователи должны быть бесконечнозначными (аналоговыми), а фактически реализованное количество устойчивых состояний при их использовании в аналого-ди-

скретных или дискретных узлах обработки может определяться выбранной точностью квантования или выбранной системой счисления.

Далее, если задача функционального преобразования сужена применительно к ИИС для измерения электрических величин, то оптические преобразователи целесообразно использовать только в промежуточных (аналоговых или аналого-дискретных) звеньях преобразования. Тем самым ОУТ малоперспективны для таких приложений, равно как инвертор и усилитель яркости. Наиболее употребительными элементами электроизмерительных ИИС могут быть лазеры, электроннооптические преобразователи типа модуляторов и дефлекторов света, оптоэлектронные преобразователи типа матричных и других позиционно-чувствительных фотоприемников, а также пассивные оптические элементы типа коллиматоров, линз, призм, зеркал, световодов, поляризаторов, фазовых пластин и др.

2. АНАЛОГОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ОПТРОНАХ

Наиболее многочисленную группу аналоговых оптронных преобразователей составляют множительно-делительные устройства, выполненные на мостовых схемах или (и) операционных усилителях. Одна из простейших схем такого типа [А. с. 297045, СССР] приведена на рис. 15. При токе смещения 10 мА, $U_{x1} = U_{x2} = \pm 10$ В можно получить $U_{вых} = \pm 0,5$ В с нелинейностью порядка $\pm 0,2\%$ в сравнительно узком динамическом диапазоне вблизи рабочей точки.

Более сложная схема оптронного множительного устройства приведена на рис. 16 [А. с. 468266, СССР].

Если цепи питания ИП отключены, то согласно рис. 16

$$U_{вых} = U_3 \frac{R_{\Phi 2}}{R_4 + R_{\Phi 2}}; \quad k_2 = \frac{U_{вых}}{U_3} = \frac{R_{\Phi 2}}{R_4 + R_{\Phi 2}}, \quad (8)$$

где $R_{\Phi 2}$ — сопротивление фоторезистора ΦP_2 ; k_2 — коэффициент передачи цепи $R_4 - \Phi P_2$.

Аналогично для цепи $R_1 - \Phi P_1$ получим коэффициент передачи

$$k_1 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{\Phi 1}}{R_1 + R_{\Phi 1}}, \quad (9)$$

где $R_{\Phi 1}$ — сопротивление ΦP_1 .

При $R_1 = R_4$ и идентичности фоторезисторов ΦP_1 , ΦP_2 ($R_{\Phi 1} = R_{\Phi 2}$), освещаемых общим источником СД, согласно формулам (8), (9) имеем

$$k_1 = k_2; \quad U_{вых} = \frac{U_2}{U_1} U_3.$$

Изменение характеристик ΦP_1 , ΦP_2 во времени или в связи с изменениями температуры (при различных ТКС) приводит к нарушению идентичности ΦP_1 , ΦP_2 и соответственно этому — к погрешности преобразования. Для устранения указанных влияний выполняется автокалибровка, обеспечивающая автоматическое поддержание равенства $R_{\Phi 1} = R_{\Phi 2}$. Для этого образуется симметричная мостовая схема из элементов R_2 , R_3 , ΦP_1 , ΦP_2 , подключенная к

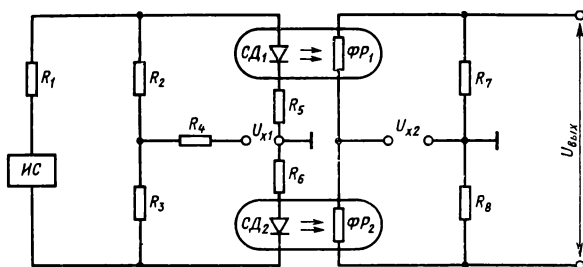


Рис. 15. Аналоговое оптронное множительное устройство прямого преобразования:

ИС — источник смещения; R_1 — R_8 — резисторы; CD_1 — ΦP_1 , CD_2 — ΦP_2 — оптронные пары на светодиодах и фоторезисторах; U_{x1} , U_{x2} — входные напряжения, $U_{\text{вых}} = k U_{x1} U_{x2}$ — выходное напряжение

ИП по входу и к OY_2 по выходу. Условием баланса токов от источника ИП является (при равенстве R_2 , R_3) равенство $R_{\Phi 1}$, $R_{\Phi 2}$. Регулируемым элементом служит ЖКМ, изменяющий световой поток от CD к ΦP_2 ; РД служит для начальной калибровки в оптическом тракте.

Схема оптоэлектронного множительного устройства переменного тока [А. с. 489123, СССР] приведена на рис. 17.

На выходах левой и правой мостовых схем, состоящих из резистивных элементов R_1 , R_2 , $\Phi P'_1$, $\Phi P'_2$, и R_3 , R_4 , $\Phi P''_1$, $\Phi P''_2$ соответственно, при наличии расстроек по сопротивлениям возникают напряжения

$$U'_m = k'_m U_0 \delta R'_\Phi, \quad U''_m = k''_m U_1 \delta R''_\Phi, \quad (10)$$

где k'_m , k''_m — конструктивные постоянные мостовых схем;

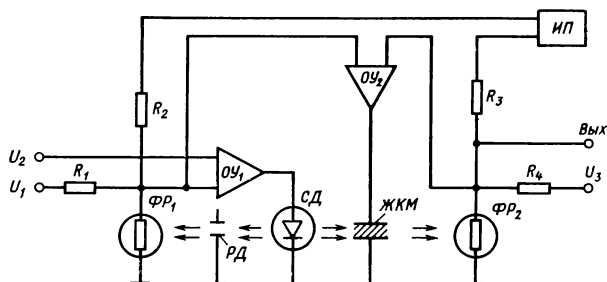


Рис. 16. Аналоговое оптронное множительно-делительное устройство компенсационного преобразования:

U_1 , U_2 , U_3 — входные напряжения; R_1 , R_4 — резисторы; ΦP_1 , ΦP_2 — фоторезисторы; OY_1 , OY_2 — операционные усилители; CD — светодиод; ИП — источник питания; Вых — выход; РД — регулируемая диафрагма; ЖКМ — жидкокристаллический модулятор

$$\delta R'_{\Phi} = \frac{R'_{\Phi 1} - R'_{\Phi 2}}{R'_{\Phi 1}}, \quad \delta R''_{\Phi} = \frac{R''_{\Phi 1} - R''_{\Phi 2}}{R''_{\Phi 1}} - \text{относительные изменения}$$

сопротивлений фоторезисторов, которые можно выразить через соответствующие световые потоки;

$$\delta R'_{\Phi} = \alpha' (\Phi' + \Phi''); \quad \delta R''_{\Phi} = \alpha'' (\Phi' + \Phi''), \quad (11)$$

где α' , α'' — коэффициенты фоточувствительности левых и правых половин ДФР; Φ' , Φ'' — левый и правый световые потоки (нижний или верхний в зависимости от полярностей сигналов).

В результате сравнения $U_{M'}$ с U_2 на выходе ОУ вырабатывается напряжение

$$U - (U_2 - k'_M U_0 \delta R'_{\Phi}) k_Y, \quad (12)$$

где k_Y — коэффициент усиления ОУ.

Соответственно этому световой поток

$$\Phi'' = \beta'' U. \quad (13)$$

Последовательная подстановка формул (10)–(13) дает

$$\Phi' + \left(1 + \frac{1}{k_Y k'_M \alpha' \beta'' U_0}\right) \Phi'' = \frac{U_2}{k'_M \alpha' U_0}. \quad (14)$$

Подбирая элементы схемы из условия $k_Y k'_M \alpha' \beta'' U_0 \gg 1$, получим из выражения (14)

$$\Phi' + \Phi'' = \frac{U_2}{k'_M \alpha' U_0}. \quad (15)$$

Подставляя в формулу (10) $U_{M''} = U_{\text{вых}}$, а также выражения (11), (15), получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{k''_M \alpha''}{k'_M \alpha'} \frac{U_1 U_2}{U_0}. \quad (16)$$

Из формулы (16) видно, что при $k'_M = \text{const}$, $k''_M = \text{const}$ выходной сигнал не зависит от нелинейности оптронных пар, а их неидентичность, влияющая на результирующую погрешность преобразования, во-первых, весьма мала, так как левые и правые части ДФР находятся в одинаковых оптических и температурных условиях, а, во-вторых, ее влияние ослабляется из-за того, что α' , α'' входят в формулу (16) симметрично. Для обеспечения правильной работы схемы на переменном токе (отсутствия фазовых погрешностей) необходимо формировать опорное напряжение U_0 из U_2 . Схемы формирования опорных напряжений с сохранением формы сигналов (синхронности и синфазности) рассмотрены в работе [62].

В описанных выше схемах умножение или деление аналоговых сигналов выполняется не за счет естественных нелинейностей оптронов, а за счет параметрических свойств цепей, в которые они включены (мостовых схем, операционных усилителей). Такие структуры умножителей [62] перспективны для построения быстродейст-

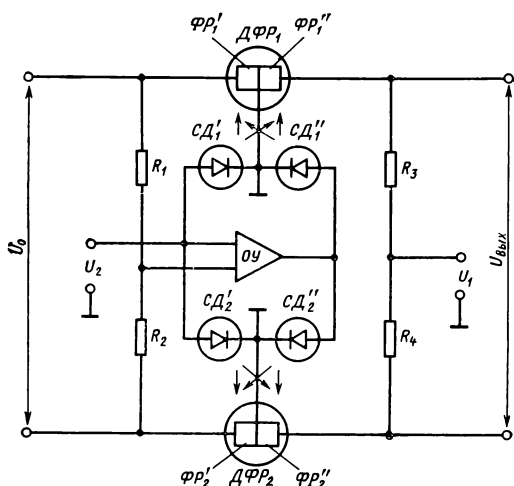


Рис. 17. Аналоговое оптронное множительное устройство переменного тока:

$ДФР_1$, $ДФР_2$ — дифференциальные фоторезисторы, содержащие левые ($ФР_1'$, $ФР_2'$) и правые ($ФР_1''$, $ФР_2''$) резистивные элементы; $СД_1'$, $СД_2'$ и $СД_1''$, $СД_2''$ — соответствующие светодиоды оптронных пар (косыми стрелками показано наличие перекрестных световых потоков); R_1 — R_4 — резистивные элементы мостовой схем; ОУ — операционный усилитель (дифференциальный); U_1 , U_2 — перемножаемые напряжения; U_0 — опорное напряжение; $U_{вых}$ — выходное напряжение

вующих ваттметров, в которых операции перемножения мгновенных значений и интегрирования структурно разделены. Однако в практике электрических измерений более широкое распространение получили схемы ваттметров и вольтметров на естественных квадраторах, квадратичность и инерционность которых определяются тепловыми эффектами. Известны и оптронные схемы такого типа, использующие резисторные оптроны с лампочками накаливания, в том числе фотокомпенсационные схемы для измерения эффективных значений периодических сигналов [Пат. 1315766, Франция].

Сочетание оптронного квадратора в цепи сигнала и в цепи компенсирующей обратной связи операционного усилителя позволяет реализовать преобразователь эффективных значений по методу взаимобратных преобразований, аналогичный активному линейному преобразователю на термопарах [А.с. 423144, СССР]. Недостаток этой схемы заключается в том, что оптроны должны быть идентичны в широком динамическом диапазоне. На рис. 18 приведена схема [А.с. 599220, СССР] с квадратичными оптронами, лишенная указанного недостатка, т.е. построенная по принципу стабильного светового потока, соответствующего стабильному тепловому потоку в традиционных схемах [62]. Источник опорного напряжения с помощью R_1 , R_8 создает опорный сигнал, соответствующий опорному световому потоку, а ОУ₁ и ОУ₃ суммируют входной и выходной (модулированный) сигналы переменного тока с сигналами постоянного тока цепи обратной связи, образуемыми путем сравнения (и усиления с помощью ОУ₂, ОУ₄) выходных сигналов оптронов ОК₁ и ОК₂ с опорным сигналом. Благодаря тому, что оптроны ОК₁, ОК₂ работают в одной точке, обеспечить их идентичность значительно легче, чем в схеме [А.с. 423144, СССР].

Реализуемая точность прямого функционального преобразования на оптронах — единицы процентов; в автокомпенсационных схемах с взаимобратными преобразованиями — десятки доли про-

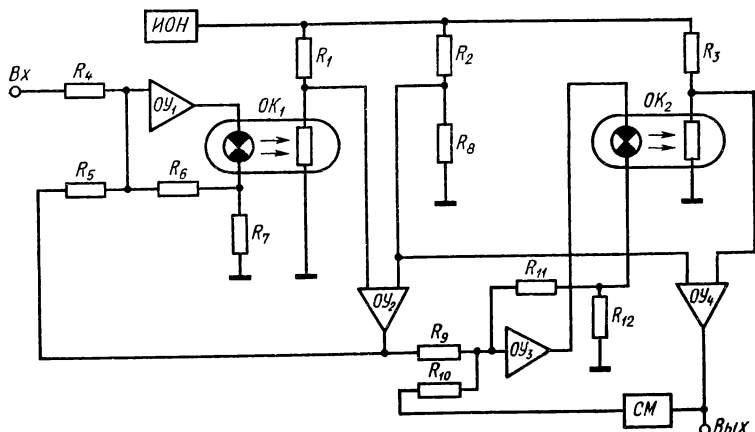


Рис. 18. Аналоговый оптронный преобразователь эффективных значений напряжения со стабильным световым потоком:

OK_1 , OK_2 — квадратичные оптроны; OY_1 — OY_4 — операционные усилители; $СМ$ — симметричный модулятор; R_1 — R_{12} — резисторы; $ИОН$ — источник опорного напряжения; «Вх», «Вых» — вход и выход устройства

цента; в стабилизированных схемах (рис. 18) — сотые доли процента. Быстродействие автокомпенсационных схем с инерционными квадраторами невелико: время реакции на скачок — несколько секунд; для автокомпенсационных схем с безынерционными нелинейными или параметрическими элементами (например, типа рис. 16, 17) — десятые доли секунды; для схем прямого преобразования (см. рис. 15) быстродействие определяется практически инерционностью фоторезисторов (единицы — десятки миллисекунд).

3. ДИСКРЕТНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОПТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЯХ И СУММАТОРАХ

При определении интегральных характеристик периодических сигналов методами обработки дискретизированных и квантованных значений погрешность преобразования будет определяться погрешностью дискретизации во времени (выборки и фиксации отдельных отсчетов), погрешностью квантования по уровню (кодирования отсчетов) и погрешностью функционального преобразования (суммирования, умножения). При десятичном поразрядном суммировании и использовании четырехразрядного десятичного представления (разрешающая способность — 0,01%) для суммирования N отсчетов требуется $4N$ одноразрядных сумматоров с переносом в старший разряд. Для умножения двух четырехразрядных десятичных чисел можно использовать поразрядные десятичные умножители в соответствии с алгоритмом

$$(\alpha_0 10^0 + \alpha_1 10^1 + \dots + \alpha_{n-1} 10^{n-1})(\beta_0 10^0 + \beta_1 10^1 + \dots + \beta_{n-1} 10^{n-1}) = \sum_{i,j=0}^{n-1} \alpha_i \beta_j 10^{(i+j)} \quad (\alpha_i, \beta_j = 0, 1, \dots, 9), \quad (17)$$

откуда ясно, что для перемножения двух n -разрядных десятичных чисел требуется в общем случае n^2 поразрядных умножителей, а для четырехразрядного представления — 16 таких умножителей. Результат умножения в каждом разряде $\Pi_{ij} = \alpha_i \beta_j$ представляет собой число от 0 до 81 и может быть представлен (после дешифрации) 20-ю выходами — от 0 до 9 в разрядах десятков и единиц, которые затем подключаются к соответствующим входам сумматоров. Число сумматоров определится удвоенным количеством слагаемых одинаковой разрядности по всем разрядам $(i+j)$ и составит $2n^2$, т.е. при параллельном суммировании по выражению (17) для четырехразрядных десятичных чисел потребуется 32 сумматора.

Если суммирование результатов умножения, полученных для отдельных отсчетов, может быть выполнено в реальном масштабе времени, то для реализации этой операции потребуется $n + \lg_{10} N$ одноразрядных сумматоров, где n — разрядность суммируемых чисел; в частности, при $n=4$, $N=100$ потребуется 6 таких сумматоров. Итого, затраты оборудования на реализацию операции вида

$\sum_{k=1}^N a_k b_k$, где a_k, b_k — четырехразрядные числа, составят: 2 быстродействующих и прецизионных устройства выборки и фиксации, 2 быстродействующих и прецизионных АЦП, 16 десятичных перемножителей с дешифраторами, 38 десятичных сумматоров с переносом. По сравнению с аналоговыми функциональными преобразователями, реализующими функцию преобразования вида $\int u_x u_y dt$, затраты оборудования значительны, однако высокая точность преобразования (порядка сотых долей процента) и высокое быстродействие (в течение одного периода измерения u_x, u_y), по-видимому, их оправдывают.

В отношении технической реализации параллельных десятичных сумматоров и умножителей отметим, что в случае использования матриц излучателей и фотоприемников [А.с. 473182, СССР] они нуждаются в дополнительных дешифраторах и сложных межсоединениях. Для устранения этого недостатка следует отказаться от матричной адресации и применить аналоговое двухкоординатное адресное отклонение луча, например, с помощью ЭЛТ [А.с. 383072, СССР]. Преимуществом такого преобразователя является наличие только двух аналоговых входов и одного аналогового выхода. Это, несомненно, упрощает схему межсоединений, а также реализацию операций масштабирования и суммирования выходных сигналов умножителей в соответствии с выражением (17), поскольку эти операции выполняются в аналоговой форме сравнительно просто и с достаточной точностью. Что же касается операции аналогового умножения, то она производится также достаточно точно, так как практически не зависит от погрешности позиционирования луча, а определяется лишь погрешностью задания опорных напряжений, коммутируемых с помощью фотоприемников на выход умножителя. Количество опорных напряжений равно количеству неповто-

ряющихся произведений двух десятичных чисел, т.е. 37; таким образом, общее число шин (включая 2 входных и 1 выходную) составляет 40 шт., т.е. остается таким же, как для дискретного умножителя. Однако важно отметить, что шины опорных напряжений являются общими для всех используемых в схеме умножителей, что значительно упрощает межсоединения. Заметим, что для реализации выражения (17) в этом случае потребуется 8 цифроаналоговых преобразователей, 16 аналоговых оптронных умножителей, 6 аналоговых сумматоров и 6 делителей.

4. ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Среди электроннооптических функциональных преобразователей наибольшее распространение получили электрооптические модуляторы, использующие линейный электрооптический эффект Поккельса; магнитооптические модуляторы, использующие линейный магнитооптический эффект Фарадея; акустооптические модуляторы, использующие эффекты дифракции света на ультразвуковых волнах. Чаще всего преобразователи двух первых видов (электрооптические на эффекте Поккельса, магнитооптические на эффекте Фарадея) применяют для измерения высоких напряжений и больших токов, а акустооптические — в качестве растров при измерении линейных и угловых величин. Поскольку все эти устройства являются измерительными, стабилизации их характеристик уделялось определенное внимание и в схемы этих устройств вводились соответствующие усовершенствования; в ряде случаев стабилизация характеристик достигалась конструктивными или технологическими приемами, которые носят частный характер и потому здесь не рассматриваются.

В электрооптических модуляторах на линейном продольном электрооптическом эффекте Поккельса (направление поля совпадает с направлением распространения света) зависимость между интенсивностью света на выходе (после анализатора) и на входе (до поляризатора) выражается соотношением вида

$$K_M = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} U_M \right), \quad (18)$$

где λ — длина световой волны; n_0 — показатель преломления обыкновенного луча; r_{63} — электрооптический коэффициент; U_M — модулирующее напряжение [3].

Соотношение (18) может быть также представлено в виде

$$K_M = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U_M}{U_{\lambda/2}} \right), \quad (19)$$

где $U_{\lambda/2} = \lambda / 2 n_0^3 r_{63}$ — полуволновое напряжение. Если на электрооптический кристалл подан переменный модулирующий сигнал $U_M = U_{M0} \sin \Omega t$, то согласно формуле (19) передаточная функция модулятора

$$K_M = \sin^2 \left(\frac{\Phi_0}{2} \sin \Omega t \right) = \frac{1}{2} \left[1 - J_0(\Phi_0) - 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\Phi_0) \cos 2k\Omega t \right], \quad (20)$$

где $\Phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} U_{M0}$ — амплитуда фазовой модуляции (девиация фазы); $J_k(\Phi_0)$ — функция Бесселя k -го порядка.

При малых модулирующих напряжениях $\Phi_0 = \pi U_{M0}/U_{\lambda/2} \ll 1$ выражение (20) дает практически квадратичную зависимость от U_M ,

$$K_M = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{U_M}{U_{\lambda/2}} \right) \approx \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{U_M}{U_{\lambda/2}} \right)^2 = \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{U_{M0}}{U_{\lambda/2}} \right)^2 \sin^2 \Omega t, \quad (21)$$

т. е. модулятор Погкельса является квадратором мгновенных значений напряжения. В линейных амплитудных преобразователях, а также в собственно модуляторах этот режим обычно не используется из-за низкой эффективности (чувствительности). Однако для функциональных преобразователей эффективных значений напряжения и мощности его можно с успехом использовать. Далее, поскольку величину K_M в электроизмерительном устройстве необходимо преобразовать в электрический сигнал с помощью фотодетекторов, воспринимающих (одновременно или разновременно) интенсивности света $I_{вх}$, $I_{вых}$ на входе и выходе модулятора, то в общей погрешности оптронного преобразования необходимо учитывать погрешность фотодетектора (или детекторов) и погрешность измерения отношения сигналов на выходах фотодетекторов. Если световой поток $I_{вх}$ одновременно стабилен и по нему выполнена калибровка фотоприемника, то измерение K_M сводится к измерению $I_{вых}$. В диапазоне изменения $I_{вых}$ фотодетектор должен быть линейным. Если он к тому же является интегрирующим, то в соответствии с выражением (21) выходной сигнал фотодетектора

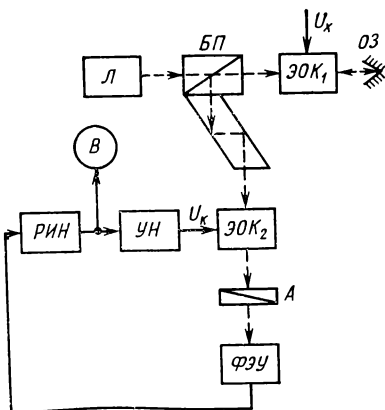
$$U_{вых} = \int k_{\Phi D} I_{вых}(t) dt = k_{\Phi D} I_{вых} \frac{\pi^2}{4U_{\lambda/2}^2} \int U_M^2(t) dt = p U_{MЭ}^2, \quad (22)$$

где $k_{\Phi D}$ — коэффициент чувствительности фотодетектора; p — постоянный коэффициент преобразования; $U_{MЭ}$ — эффективное значение напряжения U_M .

Поскольку в фотоприемнике трудно сочетать высокую чувствительность к световому потоку и высокую стабильность этой чувствительности, представляется целесообразным вместо прямого электрооптического преобразования выполнить компенсационное, когда фотодетектор используется как высокочувствительный нуль-орган, регистрирующий лишь отклонение интенсивности или положения светового луча относительно некоторого начального (нулевого) значения. Таким детектором может быть, например, фотоэлектронный умножитель или лавинный фотодиод, что упрощает реализацию. Примером подобного измерительного преобразователя может служить устройство [А. с. 479038, СССР], структурная схема которого приведена на рис. 19. Азимут оси пропускания биполяризатора ориентирован параллельно плоскости поляризации луча лазера; к одному из электрооптических кристаллов приложено из-

Рис. 19. Компенсационный оп-
тронный преобразователь на-
пряжения на электрооптиче-
ских кристаллах:

L — лазер; $БП$ — биполяризатор;
 $ЭОК_1$, $ЭОК_2$ — электрооптические
кристаллы; U_x , U_k — соответствен-
но измеряемое и компенсирующее
напряжения; $ОЗ$ — отражающее
зеркало; A — анализатор; $ФЭУ$ —
фотоэлектронный умножитель;
 $РИН$ — регулируемый источник на-
пряжения; $УН$ — усилитель напря-
жения; B — вольтметр



меряемое (U_x), а к другому — компенсирующее (U_k) напряже-
ния, причем кристаллографические оси $ЭОК_1$, $ЭОК_2$ ориентированы
под углом 45° к азимуту оси пропускания биполяризатора соот-
ветственно для прямого и бокового направлений светового луча.
Линейно поляризованный луч лазера L после прохождения бипо-
ляризатора $БП$ при отсутствии напряжения U_x на $ЭОК_1$ не изме-
няет поляризации, и, отразившись от $ОЗ$, возвращается в источник.
В направлении $ФЭУ$ в этом случае поток отсутствует, так как в
 $БП$ нет ортогонально поляризованной компоненты. При подаче
 U_x на $ЭОК_1$ световой поток L , пройдя его дважды (прямой и от-
раженный луч), приобретает эллиптическую поляризацию, и следо-
вательно, содержит компоненту, ортогональную азимуту оси про-
пускания $БП$ в прямом направлении. Эта компонента проходит
 $ЭОК_2$, который первоначально не изменяет поляризацию бокового
луча ($U_k=0$) и полностью пропускается анализатором A , воздей-
ствуя на $ФЭУ$. Последний вырабатывает сигнал управления на
 $РИН$, который выдает напряжения на $УН$ и, после усиления, на
 $ЭОК_2$. Напряжение U_k поворачивает плоскость поляризации
луча таким образом, что компенсирует поворот плоскости поляризации
в $ЭОК_1$. Изменение U_k проходит до тех пор, пока световой по-
ток на выходе A не исчезнет полностью. Очевидно, что при
идентичных кристаллах $ЭОК_1$, $ЭОК_2$ установившемуся состоянию
соответствует условие $U_x=U_k$, что дает пропорциональность
 U_x и напряжения, поступающего на вход вольтметра B . Схема
некритична к изменению чувствительности $ФЭУ$, а также интен-
сивности светового потока L ; кроме того (и это наиболее существен-
но), схема некритична и к изменениям параметров $ЭОК_1$, $ЭОК_2$
(в том числе, n_0 и r_{63}), если эти изменения одинаковы в обоих
кристаллах. Таким образом, в схеме реализуется способ стабили-
зации, использующий параллельные (в данном случае совмещен-
ные) каналы преобразования с идентичными оптронными эле-
ментами.

Отметим, что быстродействие в схеме рис. 19, определяемое
в основном $ФЭУ$, $РИН$ и $УН$, может оказаться недостаточным для
обеспечения компенсации U_k и $U_x(t) = U_{m0} \sin \Omega t$ на высоких ча-

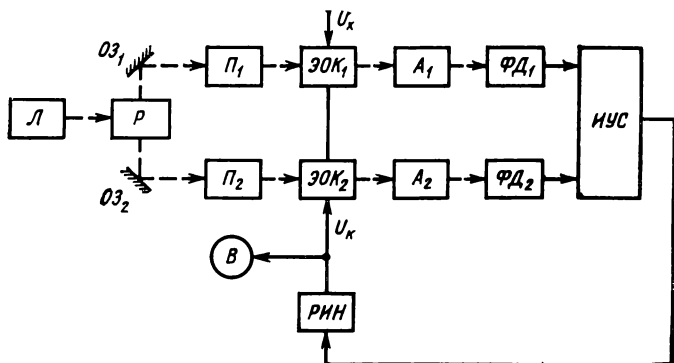


Рис. 20. Оптический преобразователь эффективных значений напряжения на электрооптических кристаллах с компенсацией в электронной части тракта:

Л — лазер; Р — расщепитель луча; ОЗ_1 , ОЗ_2 — отражающие зеркала; П_1 , П_2 — поляризаторы; А_1 , А_2 — анализаторы; ЭОК_1 , ЭОК_2 — электрооптические кристаллы; ФД_1 , ФД_2 — фотодетекторы; ИУС — интегрирующее устройство сравнения; РИН — регулируемый источник напряжения; В — вольтметр постоянного тока

стотах (Ω) в следящем режиме, т.е. в реальном масштабе времени: в этом случае имеет смысл использовать компенсацию не в оптической, а в электронной части тракта оптического преобразования, поскольку световые потоки не могут компенсироваться в среднем (интегрально), тогда как электрические сигналы, обусловленные этими потоками, легко компенсируются дифференциальными фотодетекторами, на каждый из элементов которых указанные световые потоки действуют раздельно (рис. 20).

В отличие от устройства (см. рис. 19) здесь необходимо обеспечить не только идентичность ЭОК_1 , ЭОК_2 , но также идентичность ФД_1 , ФД_2 , что, в принципе, выполнимо в узком динамическом диапазоне освещенностей и с учетом того, что к стабильности их чувствительности в указанном диапазоне не предъявляются жесткие требования; ЭОК_1 , ЭОК_2 в схеме (рис. 20) работают при малых коэффициентах модуляции K_m (режим квадратичного преобразования); ФД_1 , ФД_2 могут быть как активными, так и пассивными элементами.

При магнитооптическом эффекте Фарадея вращение плоскости поляризации магнитооптического кристалла, преобразованное с помощью поляризатора (П) и анализатора (А) в изменение интенсивности света, описывается соотношением

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} \cos^2 [\alpha + \varphi(i)], \quad (23)$$

где $I_{\text{вх}}$ — интенсивность света на входе П ; $I_{\text{вых}}$ — интенсивность света на выходе А ; α — угол между плоскостями поляризации П и А ; $\varphi(i)$ — дополнительный поворот плоскости поляризации, вносимый под воздействием тока i магнитооптическим кристаллом [78].

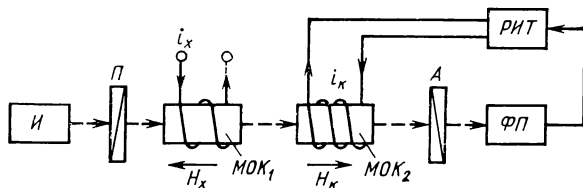


Рис. 21. Компенсационный оптронный преобразователь тока (трансформатор тока) на магнитооптических кристаллах:

И — излучатель; *П* — поляризатор; *А* — анализатор; *МОК*₁, *МОК*₂ — магнитооптические кристаллы; *i*_х — измеряемый ток; *i*_к — компенсирующий ток; *ФП* — фотоприемник; *РИТ* — регулируемый источник тока

Из соотношения (23) видно, что чувствительность к φ является наибольшей при $\alpha = \frac{\pi}{4}$. Если $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то

$$K_m = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \sin^2 \varphi(i) = \sin^2 si,$$

где s — постоянная величина,

т. е. получим зависимость, эквивалентную выражению (18). Простейшая схема магнитооптического устройства, получившая название трансформатора тока (по аналогии схему рис. 19 можно называть трансформатором напряжения), приведена на рис. 21 [112].

Если *МОК*₁, *МОК*₂ идентичны, а возбуждающие обмотки имеют числа витков w_1 , w_2 , то вследствие компенсирующей обратной связи через *РИТ*, при соответствующем выборе направления тока i_k , выполняется соотношение

$$i_x = \frac{w_2}{w_1} i_k, \quad (24)$$

которое и означает трансформацию тока.

Соотношение (24) выполняется как для постоянных, так и для переменных токов, однако для высоких частот ограничивающим фактором может быть не только быстродействие *ФП* и *РИТ*, но также и частотная зависимость возбуждающих обмоток. В связи с этим, подобно схеме рис. 20, здесь может быть предложен вариант компенсации не в оптической, а в электронной части тракта. Схема устройства показана на рис. 22.

Заметим, что отсутствие частотных ограничений позволяет значительно увеличивать число витков w_2 в катушке возбуждения *МОК*₂ и тем самым обеспечивать преобразование достаточно больших токов i_x .

Если после прохождения *МОК* лучи расщепляются без изменения поляризации и затем проходят анализаторы, плоскости поляризации которых взаимно повернуты на угол 45° , то на выходах соответствующих фотоприемников формируются сигналы

$$u_1 = \eta \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi \right) = \frac{\eta}{2} (1 - \sin 2\varphi);$$

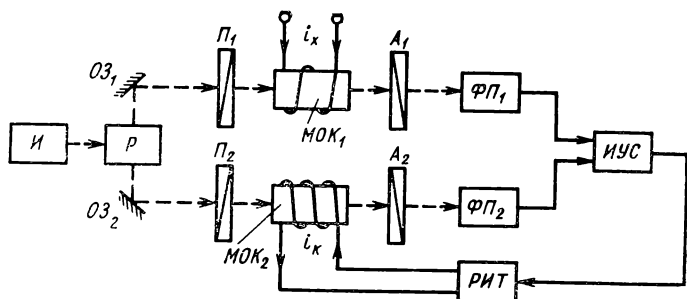


Рис. 22. Оптроновый преобразователь эффективных значений тока на магнитооптических кристаллах с компенсацией в электронной части тракта:

И — излучатель; *Р* — расщепитель луча; *ОЗ*₁, *ОЗ*₂ — отражающие зеркала; *П*₁, *П*₂ — поляризаторы; *А*₁, *А*₂ — анализаторы; *МОК*₁, *МОК*₂ — магнитооптические кристаллы; *i_x(t)* — преобразуемый переменный ток; *i_k* — компенсирующий постоянный ток; *ФП*₁, *ФП*₂ — фотоприемники; *ИУС* — интегрирующее устройство сравнения; *РИТ* — регулируемый источник постоянного тока

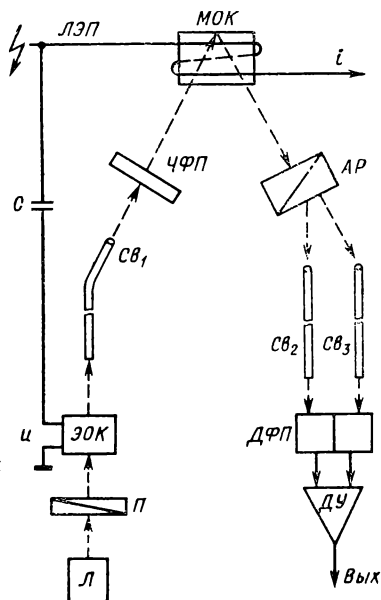
$$u_2 = \eta \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} + \varphi \right) = \frac{\eta}{2} (1 - \cos 2\varphi).$$

После вычитания постоянных составляющих, не несущих полезной информации ($\varphi = \varphi_0 \sin \omega t$), и мультипликативного смещения каждого из сигналов, пропорциональных $\sin 2\varphi$ и $\cos 2\varphi$, с сигналом несущей частоты ω , который подается в один из каналов сдвинутым по фазе на $\pi/2$, получают сигналы, пропорциональные $\sin 2\varphi \cdot \sin \omega t$, $\cos 2\varphi \cdot \cos \omega t$; затем оба сигнала суммируют и получают сигнал, пропорциональный $\cos(\omega t - 2\varphi)$. Тем самым благодаря указанному синхронно-фазовому преобразованию получают электрический сигнал со сдвигом фаз относительно опорного сигнала (преобразуемого тока i_x), соответствующим удвоенному сдвигу фаз в оптической части тракта. Используя этот опорный сигнал при фазовом детектировании с последующей фильтрацией гармоник несущей частоты, получают выходной сигнал, пропорциональный 2φ . Повышение чувствительности в таком фазометре обеспечивается не только указанным удвоением фазового сдвига, но также за счет того, что синхронно-фазовое детектирование существенно уменьшает влияние флуктуационных помех, в частности, собственных шумов фотоприемников. По данным [112] среднеквадратичная погрешность такого фазометра не превышает 0,3%.

Известны также различные схемы повышения чувствительности магнитооптических преобразователей с использованием модуляции светового потока [Пат. 3753101, США]. В их основе лежит сходный с предыдущим прием прохождения модулированного света по двум оптическим путям с синхронной демодуляцией и суммированием сигналов в электронной части тракта; различие заключается лишь в том, что расщепление лучей происходит на входе оптической части тракта, а на его выходе выполняется их смешение.

Рис. 23. Оптронный преобразователь мощности на электрооптическом и магнитооптическом кристаллах:

ЛЭП — линия электропередач напряжением u и током i ; C — разделительный конденсатор; ЭОК — электрооптический кристалл; МОК — магнитооптический кристалл; P — поляризатор; ЧФП — четвертьволновая фазовая пластинка; АР — анализатор-расщепитель (например, призма Волластона); ДФП — дифференциальный фотоприемник; $Св_1$ — $Св_3$ — световоды; ДУ — дифференциальный усилитель; «Вых» — выходной сигнал, соответствующий произведению ui



Рассмотренные выше методы и средства измерения напряжения и тока дают основание полагать, что при их совместном использовании может быть решена задача измерения мощности. Действительно, в последнее время предложен ряд способов и устройств, решающих эту задачу [Пат. 3675125, США; пат. 49—22905, Япония]. Практически во всех этих предложениях используется метод прямого преобразования, причем погрешности преобразования u , i в худшем случае складываются, результирующая точность измерения невысока (несколько процентов).

Рассмотрение акустооптических оптронных преобразователей начнем с фотоупругих модуляторов на двулучепреломлении. Принцип их действия сходен с электрооптическим, с той разницей, что разность фаз Φ возникает под действием механических напряжений, а не электрического поля:

$$\Phi = \frac{2\pi l}{\lambda} \Delta n = \frac{\pi l}{\lambda} n_0^3 r_e,$$

где $\Delta n = n_e - n_0$ — разность показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей; n_0 — показатель преломления среды в отсутствии деформации; l — длина кристалла в направлении распространения волны; e — деформация; r — упругооптический коэффициент.

При малых амплитудах фазовой модуляции Φ_0 эффективность модулятора

$$K_m \approx \frac{\Phi_0^2}{2} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} l^2 \varepsilon_0^2 n_0^6 p^2,$$

т.е. при линейной зависимости между амплитудой деформации и электрическим сигналом возбуждения УЗ колебаний зависимость сходна с приведенной выше для электрооптических кристаллов.

Анализ дифракционных акустооптических преобразователей обычно выполняют (по крайней мере для инженерных приложений) в приближении Рамана-Ната [97], сущность которого заключается в следующем. Если акустооптическая волна с волновым вектором \vec{K} и частотой Ω распространяется в направлении оси y , а световая волна с волновым вектором \vec{k} и частотой ω распространяется под углом θ к направлению оси x , то уравнение распространения световой волны будет

$$\nabla^2 E = \frac{[n(y, t)]^2}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (25)$$

где c — скорость света в свободном пространстве, $n(y, t)$ — показатель преломления в области взаимодействия. Принимая, что акустическая волна является плоской бегущей волной с синусоидальной АМ, представляют $n(y, t)$ в виде

$$n(y, t) = n_0 + \Delta n \sin(\Omega t - Ky), \quad (26)$$

где Δn — изменение показателя преломления. Электрическое поле возмущенной световой волны E периодически во времени и пространстве с периодами, определяемыми суперпозициями частоты ω и гармоник Ω , т.е. разложение E в ряд Фурье имеет вид

$$E = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} E_m(x) \exp[j(\omega + m\Omega)t - k(x \cos \theta - y \sin \theta) - mKy], \quad (27)$$

где $E_m(x)$ — амплитуда дифрагированного светового пучка m -го порядка с частотой $(\omega + m\Omega)$.

После подстановки формул (26), (27) в выражение (25) в 1-м приближении получают систему дифференциально-разностных уравнений

$$\frac{dE_m}{dx} + \frac{\varphi}{2l} (E_{m+1} - E_{m-1}) = -j \frac{mK}{\cos \theta} (\sin \theta - m \sin \theta_B) E_m, \quad (28)$$

где $\varphi = \frac{k\Delta n l}{\cos \theta}$, $\sin \theta_B = \frac{K}{2k}$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$;

θ_B — угол Брэгга в среде (без учета сдвига частоты дифрагированного света).

В предельном случае низкой частоты, пренебрегая $m \sin \theta_B$ в правой части системы уравнений (28), получают решение вида

$$E_m(x) = \exp\left(-\frac{1}{2} j m K x \operatorname{tg} \theta\right) J_m \left[\varphi \frac{\sin\left(Kx \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}\right)}{Kl \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}} \right], \quad (29)$$

где J_m — функция Бесселя m -го порядка.

Согласно выражению (29) нормированная интенсивность дифрагированного пучка m -го порядка на расстоянии $x=l$, сравнимом с периодом УЗ волны ($Kl=1$), при нормальном падении ($\theta=0$) равна

$$I_m = E_m(l) E_m^*(l) = J_m^2(\Phi_0), \quad (30)$$

где

$$\Phi_0 = \varphi(0) = k\Delta n l = \frac{2\pi l}{\lambda} \Delta n.$$

В случае стоячей акустической волны

$$I_m = J_m^2(\Phi_0 \cos \Omega t),$$

т.е. интенсивность света, в отличие от бегущей волны, промодулирована (при малых Φ_0) частотой 2Ω и ее гармониками.

Если при $\theta=\theta_B$ увеличивать частоту акустической волны Ω или (и) увеличивать l , то дифракционные эффекты высших порядков исчезают и преобладающее значение имеют лишь световые пучки 0 и ± 1 порядков.

Полагая $\theta \approx \theta_B$, приводят уравнения (28) к виду

$$\frac{dE_0}{dx} = -\frac{\varphi}{2l} E_1; \quad \frac{dE_1}{dx} + j \frac{2v}{l} E_1 = \frac{\varphi}{2l} E_0, \quad (31)$$

где $v \approx Kl(\theta - \theta_B)$.

При граничных условиях $E_0(0)=1$, $E_1(0)=0$ и при $x=l$ из уравнения (31) находим соотношение нормированных интенсивностей в нулевом и первом дифракционных максимумах:

$$I_1 = 1 - I_0 = \left[\frac{\varphi}{2 \sqrt{v^2 + \left(\frac{\varphi}{2}\right)^2}} \right]^2 \sin^2 \sqrt{v^2 + \left(\frac{\varphi}{2}\right)^2}. \quad (32)$$

В частности, при точном выполнении условия Брэгга, $v=0$, и малости φ из выражения (32) имеем

$$I_1 \approx \frac{\varphi^2}{2} = \frac{2\pi^2 l^2}{\lambda^2 \cos^2 \theta_B} (\Delta n)^2,$$

т.е. подобно рассмотренному выше получим в 1-м дифракционном максимуме квадратичное преобразование ε или линейное преобразование акустической мощности.

Дифракция Брэгга является и наиболее эффективным механизмом отклонения (сканирования) светового луча. Угол отклонения первого бокового максимума

$$\xi_1 = \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\lambda \Omega}{2\pi v},$$

где Λ — длина волны УЗ; v — скорость его распространения.

Изменяя Ω , получают сканирование по углу ξ_1 . Необходимое для выполнения условия Брэгга изменение угла падения θ не обязательно должно быть пропорциональным Ω ; с учетом расхо-

димости звукового и светового лучей θ может быть постоянным в конечной полосе частот. Кроме того, может быть использована конструкция из ряда пьезодатчиков, создающая волновой фронт, поворачивающийся с изменением Λ . И, наконец, помимо обычной дифракции Брэгга можно использовать анизотропную дифракцию с изменением плоскости поляризации света. При этом можно изменять Ω в достаточно широких пределах [111], не изменяя угла падения. Например, для кристалла α -кварца по расчетам [111] при расходимости падающего луча $\Delta\theta=10^{-3}$ рад и $\Delta\Omega=280$ мГц угол сканирования $\Delta\xi=0,82$ рад= 1° угл. На кристалле TeO_2 в режиме анизотропной дифракции Брэгга получено разрешение более 1000 дискретных позиций, что не является пределом и сравнимо с разрешающей способностью лучших дискретных электрооптических дефлекторов, которые, как известно, являются достаточно сложными многокаскадными устройствами. К тому же частотный режим управления положением дифракционных максимумов открывает возможность (и эта возможность уже используется практически в знакогенераторах) параллельного расщепления луча в несколько дискретных позиций простым заданием набора управляющих частот. Сказанное, наряду с достаточно высокой стабильностью ряда акустооптических материалов, а также универсальностью акустооптических преобразователей, выдвигает их на одно из первых мест среди других модуляторных и дефлекторных устройств.

На универсальности акустооптических преобразователей (впредь будем их обозначать *АОП*) следует остановиться отдельно. Во первых, как мы видели, в дифракционных *АОП* реализуется как квадратичный (по отношению к управляющему напряжению) режим модуляции интенсивности света в дифракционных максимумах, эквивалентный соответствующим режимам электрооптических и магнитооптических модуляторов, так и линейный (по отношению к частоте Ω) режим сканирования дифрагированных пучков. Последнее означает, в частности, возможность преобразования «частота — угол» с измерением последнего, например, при помощи позиционно-чувствительного фотоприемника [74].

Покажем, что на двух *АОП* управляемых сдвинутыми по фазе электрическими сигналами, может быть получено дискретное сканирование светового луча.

Известно, что две гармонические встречно направленные волны с равными амплитудами и разными частотами дают суперпозицию

$$F = 2A \cos\left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} x + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \times \\ \times \cos\left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} x + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right).$$

Отсюда видно, что в результате суперпозиции возникает модуляция во времени с частотой $\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2}$ и в пространстве с частотой

$$\frac{k_1 + k_2}{2}, \text{ где } k_1 = \frac{\Omega_1}{v}, \quad k_2 = \frac{\Omega_2}{v}, \quad v — \text{ скорость звука.}$$

Скорость модуляции

$$v_m = \frac{dx}{dt} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2} v. \quad (33)$$

Из выражения (33) интегрированием находим координату пространственной модуляции

$$x = v \int_{t_0}^t \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1 + \Omega_2} dt. \quad (34)$$

Если $\Omega_1, \Omega_2 = \text{const}$, $\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2 \ll \Omega_1 + \Omega_2$, то получим

$$x = \frac{v}{\Omega_1 + \Omega_2} \int_{t_0}^t \Delta\Omega dt = \frac{v}{\Omega_1 + \Omega_2} (\Phi_t - \Phi_0), \quad (35)$$

откуда видна возможность преобразования временной (фазовой) модуляции в пространственную, и наоборот. В частности, при $\Omega_1 = \Omega_2$ из выражения (33) находим

$$\Phi_t = 0, \quad x = x_0 = - \frac{v\Phi_0}{\Omega_1 + \Omega_2},$$

что означает возможность фазового управления сканированием света, т.е. преобразования фазового сдвига в перемещение.

Совместно с фокусирующими оптическими системами АОП обеспечивают реализацию интегральных преобразований, в частности, на двух АОП со встречными УЗ волнами может быть реализовано взаимнокорреляционное преобразование [Пат. 3641355, США].

5. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Среди оптоэлектронных функциональных преобразователей мы будем рассматривать только позиционно-чувствительные преобразователи, входной параметр которых является истинно пространственным, т.е. характеризуется линейными или угловыми координатами. В узком смысле их можно рассматривать как преобразователи линейных и угловых размеров (перемещений), однако в интересующих нас задачах электроизмерительной техники эти преобразователи являются оконечными звеньями устройств, первичные элементы которых являются преобразователями электрических параметров в оптические.

Наиболее распространенными аналоговыми функциональными оптоэлектронными преобразователями являются функциональные фотопотенциометры и фоторезисторы.

На рис. 24 показаны конструкции функциональных фотопотенциометров [84]. Для резистивного слоя РС (рис. 24,а), используют окисные пленки металлов, например SnO_2 ; для фотопроводящего слоя ФС — сублимированные в вакууме пленки CdS или CdSe, а для коллектора К — пленку индия, полученную термическим испарением в вакууме. Функциональная зависимость $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ опре-

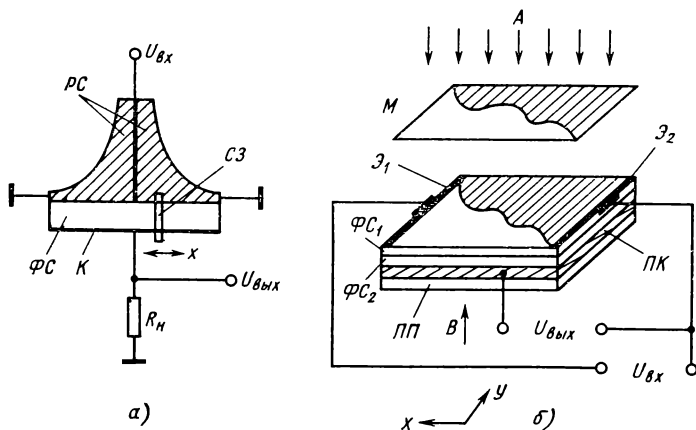


Рис. 24. Конструкции функциональных фотопотенциометров:

а — одномерная; PC — резистивный слой; FC — фотопроводящий слой; K — коллектор; $C3$ — световой зонд; R_H — нагрузочный резистор; $U_{вх}$, $U_{вых}$ — входное и выходное напряжения; б — двумерная; M — маска (транспарант); FC_1 , FC_2 — фоторезистивные слои; $ПК$ — прозрачный коллектор; $ПП$ — прозрачная подложка; $Э_1$, $Э_2$ — электроды; B — точечный излучатель

деляется профилем PC , однако распределение потенциала, задаваемое профилем PC , искажается шунтирующим действием темновых токов (вне $C3$) и отбором тока в цепь нагрузки, который, в свою очередь, зависит, помимо R_H , от вершины зонда и радиуса спада эффективного потенциала (в $e=2,71$ раз). В одномерной теоретической модели фотопотенциометра полагают, что ширина зонда во всей рабочей зоне значительно меньше радиуса спада, а влияние темновых токов вне $C3$ учитывают исходя из модели длинной линии с распределенными параметрами. Не останавливаясь на деталях аналитического описания, отметим, что для ряда широко применяемых элементарных функций (тригонометрических, логарифмических и др.) в конструкциях вида, приведенного на рис. 24, а, получены следующие физико-технические характеристики функциональных потенциометров [84]: точность воспроизведения функциональной зависимости — 1—1,5%; крутизна изменения $U_{вых}$ — 100 В/см; разрешающая способность — 10 мкм; временная нестабильность $U_{вых}$ — 0,2—0,4%/ч; температурная нестабильность $U_{вых}$ — 0,6—0,8%/°С; динамический диапазон по напряжению — 95%; допустимая мощность рассеяния — 50 мВт; освещенность — 200—300 лк; диапазон рабочих температур — (−20 ÷ +40°С); инерционность нарастания и спада фотопроводимости — 2—3,5 мс.

На рис. 24, б изображен вариант функционального фотопотенциометра, моделирующего двумерное параметрическое поле $\Phi(x, y)$. Маска (транспарант) M модулирует падающую плоскую волну A по интенсивности. Фоторезистивные слои имеют максимумы фотопроводимости в разных областях спектра: например, $FC_1(CdTe)$ и $FC_2(CdS)$ — соответственно в длинноволновой и

коротковолновой областях. К слою ΦC_1 через электроды $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ приложено напряжение $U_{вх}$, а с $ПК$ снимается $U_{вых} = \varphi(x, y)$. Точечный излучатель B сканирует поверхность ΦC_2 через $ПП$ и $ПК$. Функция $\varphi(x, y)$ определяется в основном характером модуляции M . При этом ΦC_1 в сочетании с M и A задает по существу начальное двумерное распределение потенциала, аналогичное одномерному распределению, задаваемому с помощью PC (рис. 24, а), а B выполняет роль считывающего светового зонда. Если ΦC_2 снабдить электродами, расположенными перпендикулярно $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$, а вместо двух источников света A, B с длинами волн, соответствующими полосами пропускания $\Phi C_1, \Phi C_2$, использовать один точечный источник, спектр излучения которого перекрывает полосы пропускания $\Phi C_1, \Phi C_2$, то с прозрачных коллекторов, примыкающих к $\Phi C_1, \Phi C_2$, могут быть сняты сигналы, координирующие положение светового зонда, т.е. может быть получен двумерный позиционно-чувствительный фотоприемник. Ниже мы покажем, что для этой цели могут быть использованы и более простые средства.

На рис. 25, а—в приведены различные варианты конструкций функциональных фоторезисторов [85].

Функция, описывающая форму электрода \mathcal{E}_1 (рис. 25, а), имеет вид

$$W(x) = l \left[\frac{R_\Phi}{R_H} \frac{K(x)}{1 - K(x)} - \frac{R_T}{R_\Phi} \right]^{-1},$$

где $K(x)$ — заданная зависимость $U_{вых}$ от $U_{вх}$; l — ширина $CЗ$; R_Φ, R_T — световое и темновое сопротивление ΦC .

Для щелевой конструкции (рис. 25, б) зависимость $W(x)$ имеет вид

$$W(x) = L \left[\frac{R_\Phi}{R_H} \frac{l}{L} \frac{K(x)}{1 - K(x)} - \frac{R_T}{R_\Phi} \right],$$

где l — ширина ΦC ; L — длина M .

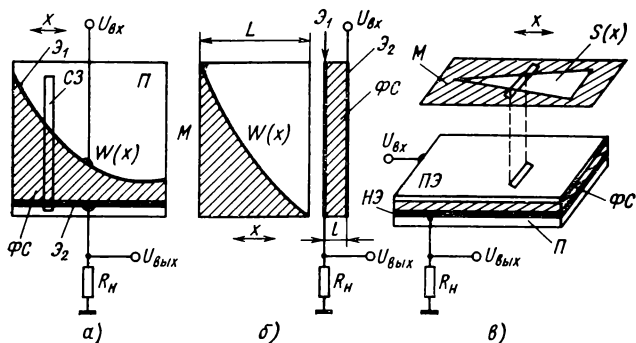


Рис. 25. Конструкции функциональных фоторезисторов:

а — поперечная; б — щелевая; в — продольная; $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ — электроды; $ПЭ$ — прозрачный электрод; $НЭ$ — непрозрачный электрод; $П$ — подложка; $CЗ$ — световой зонд; M — маска; ΦC — фотопроводящий слой; R_H — нагрузочный резистор; $U_{вх}, U_{вых}$ — входной и выходной сигналы; x — направление перемещения $CЗ$ или M

И, наконец, для продольной конструкции (рис. 25, в) изменение освещенной площади вдоль маски определяется зависимостью

$$S(x) = S_{\Pi} \left[\frac{R_{\Phi}}{R_{\Pi}} \frac{S_3}{S_{\Pi}} \frac{K(x)}{1 - K(x)} - \frac{R_T}{R_{\Phi}} \right],$$

где S_{Π} — полная площадь ΦC ; S_3 — площадь $C3$.

Преимущество функциональных фоторезисторов перед фотопотенциометрами заключается в упрощении расчета (замена распределенных параметров сосредоточенными) и технологии изготовления, а также возможности реализации токового режима работы. Вместе с тем функциональные фоторезисторы более критичны к неоднородности ΦC в зоне $C3$ (кроме варианта рис. 25, б) и обладают меньшей чувствительностью по отношению к интенсивности падающего света. Для уменьшения потерь света при формировании $C3$ могут быть использованы световоды. Неоднородность ΦC при изготовлении фоторезистора может быть скорректирована локальным изменением формы кривой $W(x)$. Более радикальным средством стабилизации характеристик функциональных фоторезисторов является вариант конструкции рис. 24, а с дополнительным электродом \mathcal{E}_3 , расположенным параллельно \mathcal{E}_2 на ΦC [А.с. 416768, СССР]; при этом $U_{\text{вых}}$ снимается с участка ΦC , заключенного между \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 , благодаря чему обеспечивается термокомпенсация, уменьшается влияние фоновой засветки и расширяется динамический диапазон. В свою очередь, по отношению к влиянию фоновой засветки более радикальным приемом является использование модулированного (импульсного) излучения, благодаря которому осуществляется временная селекция по фронту нарастания импульса фототока. В работе [85] приведены следующие технические характеристики функциональных фоторезисторов: точность воспроизведения функциональной характеристики — 1—1,5% для конструкции (рис. 25, а), 0,6—0,8% — для конструкции рис. 25, б и 0,7—0,95% — для конструкции рис. 25, в; крутизна изменения $U_{\text{вых}}$ — от 1—5 В/см до 10—15 В/см; разрешающая способность — от 4—10 мкм до 20—50 мкм; временная нестабильность $U_{\text{вых}}$ — 0,15—0,2%/ч; температурная нестабильность $U_{\text{вых}}$ — 0,05—0,15%; динамический диапазон по напряжению — от 20—50% до 90%; освещенность — 100—3000 лк; рассеиваемая мощность — порядка 100 мВт.

Оригинальная конструкция функционального фоторезистора предложена в а.с. 421014 (СССР). Подобно предыдущей конструкции здесь используются три электрода (коллектора) и узкий световой зонд, перемещающийся по ΦC перпендикулярно двум из указанных электродов; различие заключается в том, что параллельными являются крайние электроды, а средний электрод задает требуемую функциональную зависимость. Тем самым более полно используется площадь подложки и обеспечивается постоянство полного сопротивления, т.е. реализуется режим, эквивалентный потенциометрическому. Изменение яркости и ширины светового зонда, а также любые другие мультипликативные изменения параметров ΦC в этой конструкции практически не влияют на коэффициент преобразования.

Широкие возможности функционального преобразования открывают оптоэлектронные полупроводниковые преобразователи изображений — сканисторы, различные модификации которых разрабатываются и исследуются с начала 60-х годов, преимущественно

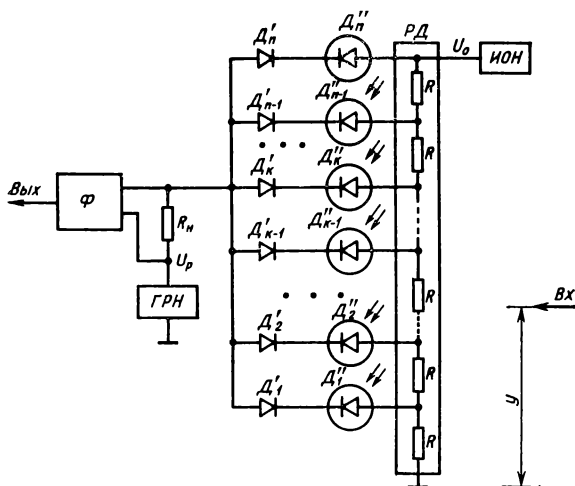


Рис. 26. Оптроэлектронный дискретный сканистор:

ИОН — источник опорного напряжения; ГРН — генератор развертывающего напряжения; R_H — нагрузочный резистор; Φ — формирователь; $D_1 - D_n$ — разделительные диоды; $D'_1 - D'_n$ — фотодиоды; РД — резистивный делитель с резисторами R ; U_o , U_p — опорное и развертывающее напряжения; стрелками показаны оптический вход и электрический выход устройства

для нужд телевидения. В последнее время сканисторы стали привлекать внимание и в качестве средств обработки информации [9].

Рассмотрим простейшую модификацию дискретного сканистора (рис. 26).

При $U_p = 0$ все диоды D'_k ($k = 1, \dots, n$) смещены в обратном направлении, а D''_k — в прямом, поэтому независимо от освещенности ток в нагрузке R_H определяется обратными токами D'_k :

$$U_H = R_H \sum_{k=1}^n I'_{0k}.$$

При $U_m < U_p < U_{m+1}$, где U_m , U_{m+1} — потенциалы на концах m -го элемента РД ($U_m = \frac{U_0 m}{Rn}$, $U_{m+1} = \frac{U_0 (m+1)}{Rn}$), все диоды D'_k при $k > m$ смещены в обратном направлении и их вклад в общий ток нагрузки определяется, как и в ранее рассмотренном случае, суммой соответствующих обратных токов $\left(\sum_{k=m+1}^n I'_{0k} \right)$. Однако при $k \leq m$ диоды D'_k смещены в прямом направлении и, следовательно-

но, D_k'' в обратном: при различной освещенности последних через них текут различные фототоки I_{fk}'' . Результирующий ток определяется суммой $\sum_{k=1}^m (I_{0k}' + I_{fk}'')$, причем направление составляющей полного тока обратно предыдущему. Таким образом, можно записать

$$U_H = R_H \left(\sum_{k=m+1}^n I_{0k}' - \sum_{k=1}^m I_{0k}'' - \sum_{k=1}^m I_{fk}'' \right). \quad (36)$$

Если n велико и нарастание фототока под действием освещенности происходит скачкообразно (что достаточно близко к действительности), то в выражении (36) можно от сумм перейти к интегралам:

$$U_H = R_H \left[\int_0^{L-y} I_0'(y) dy - \int_0^y I_0''(y) dy - \int_0^y I_f(y) dy \right], \quad (37)$$

где y — текущая координата вдоль сканистора; L — его полная длина; $I_0'(y)$, $I_0''(y)$ значения темновых токов диодов на единицу длины в точке y .

В частности, при $I_0' = I_0'' = I_0 = \text{const}$, $I_f(y) = k_F F(y)$, где k_F — фоточувствительность, $F(y)$ — световой поток, из выражения (37) имеем

$$U_H = R_H \left[I_0 (L - 2y) - k_F \int_0^y F(y) dy \right]. \quad (38)$$

Если U_p изменяется по линейному закону, то

$$\frac{dU_H}{dt} = C \frac{dU_H}{dy} = -CR_H [2I_0 + k_F F(y)],$$

где C — константа.

Таким образом, за вычетом постоянной составляющей (производной темнового тока), которую легко исключить, производная U_H по времени воспроизводит пространственное распределение фототока или освещенности $F(y)$, т. е. осуществляется преобразование пространственной модуляции во временную. Функцию дифференцирования в схеме (см. рис. 26) выполняет формирователь Φ . Возможность функционального преобразования определяется, во-первых, заданием различных функций $F(y)$ (режим функционального генератора [9]); во-вторых, возможностью неравномерного задания элементов R_i делителя РД; в-третьих, возможностью использования нелинейной развертывающей функции $U_p(t)$. В двух последних случаях при задании $y = y_0 = \text{const}$, $F(y_0) = F_0 = \text{const}$ реализуется режим время-импульсного функционального преобразователя, что представляет интерес для ряда приложений. В частности, возможно использование указанного режима для время-импульсного преобразования интегральных характеристик периодических сигналов, преобразованных предварительно (например, с помощью измерительного механизма электродинамической или ферродинамиче-

ской системы) в пространственную координату (отклонение светового луча) [А. с. 612404, СССР].

В работе [9] среди прочих вариантов сканисторных преобразователей рассмотрена возможность построения преобразователей изображений при замене обычных разделительных диодов $D'_1 - D'_n$ светодиодами. На этой основе допустимо дальнейшее усовершенствование время-импульсного функционального преобразователя. Именно, если указанные светодиоды оптически связаны со шкалой и с фотодиодами предыдущих ячеек, координата точечного источника y преобразуется в столбец высотой y , а на электрическом выходе дополнительно к время-импульсному представлению координаты y вырабатывается унитарный код n_y , соответствующий числу сработавших ячеек. Тем самым реализуется одновременно аналоговое и цифровое представление результата преобразования.

При наличии набора линейных (одномерных) сканисторов легко моделируются двумерные функции преобразования, в том числе арифметические операции над числами, заданными количеством или положением светящихся точек по строкам и столбцам сканисторной матрицы [9]. При этом задание светящейся точки или растра может быть параллельным (например, с помощью маски или транспаранта), а считывание — последовательным. Например, при выполнении операции $x \cdot y$ маска формирует светящийся прямоугольник из xy точек, а при считывании вырабатывается последовательность импульсов, количество которых равно числу светящихся точек. Точность выполнения операции, как и в матричных сумматорах, определяется только количеством дискретных ячеек, которое, в свою очередь, определяет быстродействие устройства. Если учесть реально достижимое время срабатывания одной дискретной ячейки (доли мкс) и необходимость разрешения соседних импульсов, а также реальные ограничения по достижимой степени интеграции матрицы излучателей или дискретного транспаранта, то в сканисторе 100×100 ячеек, пригодном для выполнения арифметических операций над двухразрядными десятичными числами, лучшим быстродействием (время развертки всего кадра) порядка 10 мс, что, несомненно, хуже, чем двухмерная адресация луча относительно матрицы фотоприемников (вариант, обсуждавшийся ранее). Вместе с тем благодаря последовательному считыванию в сканисторных дискретных функциональных преобразователях значительно уменьшается количество межсоединений.

Большой интерес представляет создание функционального оптоэлектронного преобразователя дифракционного типа на основе взаимодействия широкого светового пучка с УЗ волной. Известно, что при прохождении такого пучка через УЗ волну происходит модуляция фронта световой волны, амплитуда которой выражается соотношением

$$a = \frac{\pi \Delta n l}{\lambda} \sec \varphi \frac{\sin \left(\frac{\pi l}{\Lambda} \operatorname{tg} \varphi \right)}{\frac{\pi l}{\Lambda} \operatorname{tg} \varphi} \left[\sin 2\pi \left(\Omega t - \frac{z}{\Lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\Omega t + \frac{z}{\Lambda} \right) \right], \quad (39)$$

где l — длина пути в УЗ поле; λ — длина волны света; Δn — изменение показателя преломления под действием УЗ в направлении распространения света z ; Ω и Λ — частота и длина волны УЗ; φ — угол между направлением распространения света и фронтом УЗ волны. В результате интерференции дифрагированных пучков с первичным пучком возникает результирующая волна с амплитудной модуляцией светового потока в виде системы темных и светлых полос, причем зоны хорошей видимости следуют друг за другом (вдоль оси z) с пространственным периодом $L = \frac{2k\lambda^2}{\Lambda}$ ($k=0, 1 \dots$).

Однако, наряду с амплитудной позиционной характеристикой, которая может быть получена и другими методами модуляции (например, электрооптическими), в результате исследования указанной интерференционной картины было установлено, что фаза первой гармоники огибающей оптического сигнала также зависит от линейных и угловых перемещений источника света. Эта зависимость послужила основой создания фазовых позиционно-чувствительных преобразователей [42, 43]. Такие преобразователи обладают высокой позиционной чувствительностью — порядка $0,1^\circ/\text{угл. сек}$ и $0,3^\circ/\text{мм}$.

Ранее, при анализе электрооптических преобразователей, мы показали возможность выполнения дискретного сканирования света встречными УЗ волнами с управляемым фазовым сдвигом. Если сопоставить этот результат с рассмотренным здесь оптоэлектронным преобразователем угловых и пространственных перемещений в фазовый сдвиг, то становится очевидным, что путем сочетания указанных преобразователей получим однородный оптронный преобразователь вида $D-P-P-D$, где D — угол сдвига фаз, а P — пространственная координата. Преимущество такого дефлекторного преобразователя перед рассмотренными ранее модулятор-

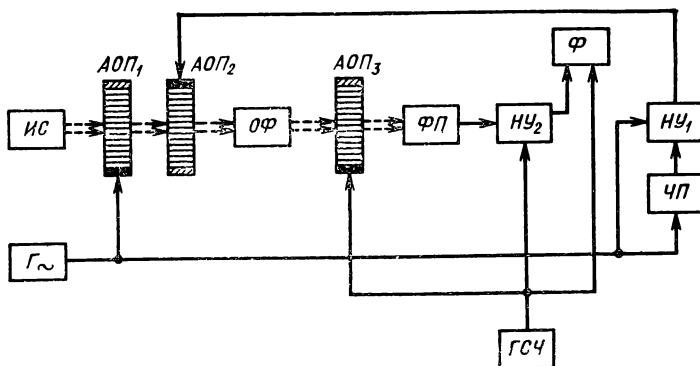


Рис. 27. Оptrонный акустооптический преобразователь угла сдвига фаз:

ИС — источник света; Γ — генератор переменной частоты; ГСЧ — генератор стабильной частоты; АОП₁, АОП₂ — акустооптические преобразователи встречно направленных бегущих УЗ волн; АОП₃ — акустооптический преобразователь стоячей УЗ волны; ОФ — оптический формирователь; ФП — фотоприемник; НУ₁, НУ₂ — нормирующие усилители; ЧП — четырехполюсник с исследуемой фазо-частотной характеристикой; Ф — фазометр

ными преобразователями заключается в том, что наряду с параметрической однородностью преобразования здесь обеспечивается структурная однородность, поскольку электроннооптическое ($D \rightarrow P$) и оптоэлектронное ($P \rightarrow D$) звенья реализуются на идентичных или сходных элементах — акустооптических ячейках. Такой преобразователь представляет интерес и в отношении прямого преобразования угла сдвига фаз радиочастотных сигналов. Соответствующая схема показана на рис. 27. На приведенной схеме $АОП_1$, $АОП_2$ образуют фазовый дефлектор, а $АОП_3$ выполняет функцию преобразования отклонения в фазовый сдвиг. Нормирующие усилители $HУ_1$, $HУ_2$ выполняют выравнивание амплитуд измерительного и опорного сигналов без искажения измерительного сигнала по фазе. $АОП_1$, $АОП_2$ для повышения стабильности могут быть помещены в общую кювету. В целом схема рис. 27, преобразующая фазовый сдвиг в диапазоне частот в фазовый сдвиг на фиксированной частоте, представляет собой аналог стробоскопического преобразователя с понижением частоты.

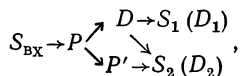
6. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ОПТРОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В заключение опишем структурные реализации некоторых универсальных функциональных оптронных преобразователей, в которых совмещаются функциональные возможности электроннооптических и оптоэлектронных преобразователей.

На рис. 28 показана схема универсального функционального преобразователя [А. с. 546904, СССР].

Преобразователь работает в двух режимах. В первом режиме (положения переключателей $П_1$, $П_2$, как показано на рис. 28) его используют для преобразования переменного напряжения ультразвуковых или радиочастот в напряжение постоянного тока (статический параметр S) или в фазу импульсной последовательности (динамический параметр D) с двумя выходами (линейным и функциональным), а также в положение светового луча (пространственный параметр P).

При этом общая диаграмма преобразований имеет вид



где $S_{вх}$ — электрический входной сигнал; P — промежуточный оптический сигнал на выходе дефлектора света $ДС$; D — промежуточный электрический сигнал с динамическим (фазовым) признаком; P' — выходной оптический сигнал пространственного преобразования или визуального контроля состояния; $S_1(D_1)$ $S_2(D_2)$ — выходные электрические сигналы со статическим или динамическим информационными признаками, находящиеся соответственно в линейной и функциональной зависимости от входного сигнала $S_{вх}$.

Во втором режиме работы преобразователя (положения переключателей $П_1$, $П_2$ противоположны показанным на рис. 28) используется дополнительно второй вход и второй формирователь, а дефлектор работает как дискретное сканирующее устройство с фазовым управлением (что исключает необходимость в стробировании I с помощью $ФСИ$ в этом режиме). В данном режиме

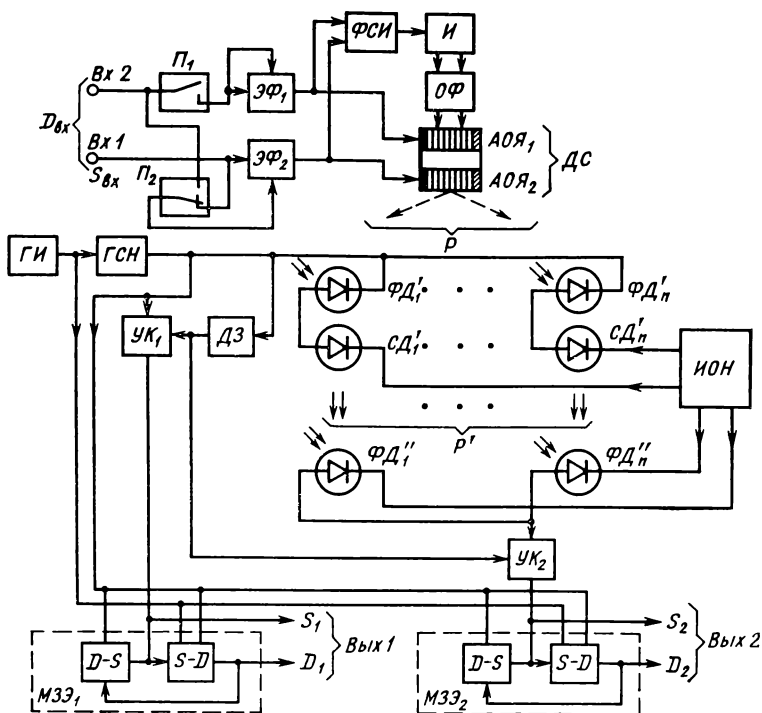


Рис. 28. Универсальный оптронный функциональный преобразователь с одномерным дефлектором и дискретным сканистором:

Π_1, Π_2 — переключатели вида преобразуемой величины; $Bx 1, Bx 2$ — входные клеммы; $\mathcal{E}\Phi_1, \mathcal{E}\Phi_2$ — электронные формователи; $\Phi СИ$ — формирователь строб-импульсов; $ОФ$ — оптический формователь; $И$ — излучатель (источник света); $ДС$ — дефлектор света с акустооптическими ячейками $АОЯ_1, АОЯ_2$; $\Phi Д'_1 - \Phi Д'_n$ и $\Phi Д''_1 - \Phi Д''_n$ — фотодиоды; $СД'_1 - СД'_n$ — светодиоды; $ГИ$ — генератор импульсов; $ГСН$ — генератор ступенчатого напряжения; $УК_1, УК_2$ — управляемые ключи; $ДЗ$ — дифференцирующее звено порогового действия; $ИОН$ — источник опорных напряжений; $МЗЭ_1, МЗЭ_2$ — многоэлектродные элементы с выходами «Вых 1», «Вых 2», состоящие из взаимнообратных преобразователей напряжение — фаза ($S-D$) и фаза — напряжение ($D-S$)

фаза переменного напряжения преобразуется по той же диаграмме переходов (где вместо $S_{вх}$ следует взять $D_{вх}$) в выходные сигналы $S_1(D_1), S_2(D_2)$.

Рассмотрим работу устройства в первом режиме. В этом случае на первый вход ($Bx 1$) подается переменное напряжение, которое поступает на основной и управляющий входы следящего формователя $\mathcal{E}\Phi_2$. Последний преобразует входное переменное напряжение в напряжение той же амплитуды и прямоугольной формы, управляющее работой дефлектора света $ДС$, в котором используется при этом одна ячейка $АОЯ_2$. $ДС$ периодически от-

клоняет луч света I в определенное положение, соответствующее входному напряжению, причем на время переднего и заднего фронта сформированного напряжения I гасится с помощью $ФСН$, чем обеспечивается стробирование луча в положении максимального отклонения. В результате засвечивается один из фотодиодов 1-й группы ($\Phi D'_1 — \Phi D'_n$). Прежде чем попасть на $ДС$, луч формируется с помощью $ОФ$ до размера, существенно меньшего длины волны $УЗ$ в $АОЯ_2$. $ИОН$ создает в каждой цепи последовательно соединенных фотодиода $\Phi D'_i$ и светодиода $СД'_i$ определенное запирающее напряжение. Луч света, отклоненный $ДС$ в определенное положение, соответствующее выходному напряжению $ЭФ_2$, тем самым преобразует его в промежуточный пространственный параметр P . В месте отклонения луч засвечивает один из фотодиодов ΦD_i , соединяющий соответствующий $СД'_i$ запертый определенным опорным напряжением U_{0i}' , с выходом генератора ступенчатого напряжения $ГСН$, синхронизированного генератором импульсов $ГИ$.

Развертывающее напряжение U_p с выхода $ГСН$ через $\Phi D'_i$ подается на $СД'_i$, который начинает излучать свет при превышении U_{0i}' напряжением U_p . Таким образом, $СД'_i$ индицирует состояние устройства и дает пространственное представление P' с n дискретными выходами. Светодиод $СД'_i$ возбуждает соответствующий фотодиод $\Phi D''_i$ второй группы, который коммутирует соответствующее опорное напряжение $ИОН$ на вход ключа $УК_2$, управляемого дифференцирующим звеном $ДЗ$. Последнее в момент сравнения U_p и U_{0i}' вырабатывает однополярный импульс, временное положение которого относительно момента запуска $ГСН(D)$ является промежуточным динамическим представлением преобразуемого сигнала. Уровни U_{0i}'' выбирают таким образом, чтобы обеспечить линейность указанного преобразования. Напряжение с выхода $ГСН$ в момент D открывания ключа $УК_1$ поступает на вход $МЗЭ_1$, запоминается им (за счет внутренней обратной связи между $S — D$ - и $D — S$ -преобразователями) и поступает на выход преобразователя в потенциальной (S_1) и эквивалентной фазо-импульсной форме (D_1). Одновременно в момент D с выхода $\Phi D''_i$ через ключ $УК_2$ на вход $МЗЭ_2$ поступает соответствующее опорное напряжение U_{0i}'' , которое запоминается им и поступает на другой выход преобразователя в потенциальной (S_2) и эквивалентной фазо-импульсной форме (D_2). Напряжение U_{0i}'' выбирают соответственно требуемой функции преобразования (нелинейной). Запоминание выборочных значений исключает неоднозначность преобразования при нахождении луча на выходе дефлектора в «мертвой зоне», т. е. между двумя фотодиодами $\Phi D'_i$.

Дифференцирующее звено $ДЗ$ имеет определенный порог срабатывания, при превышении которого оно отключается. Это необходимо для исключения ложного (неинформативного) импульса в момент обратного хода развертки $ГСН$, т. е. его возвращения в исходное (нулевое) состояние. Запоминающие элементы $МЗЭ_1$, $МЗЭ_2$ синхронизированы $ГИ$, $ГСН$ и работают аналогично.

Во втором режиме устройство работает в том же порядке, с той лишь разницей, что переключатели $П_1$, $П_2$ переводят в противоположное положение и используют оба входа устройства, а информативным входным параметром является $D_{вх}$, представляющий собой фазовый сдвиг между сигналами переменного тока, поступающими на $Вх1$, $Вх2$. Благодаря подключению входа управления следящего формирователя $\mathcal{E}\Phi_2$ (через $П_1$) к $Вх2$, являющемуся опорным, напряжения, вырабатываемые $\mathcal{E}\Phi_1$, $\mathcal{E}\Phi_2$ и поступающие на входы $АОЯ_1$, $АОЯ_2$, имеют одинаковую амплитуду при различных по амплитуде входных сигналах, что исключает влияние этого неинформативного параметра на работу ДС.

Узлы $\Phi D'_i$, CD'_i совместно с ИОН, ГСН и ДЗ образуют дискретный излучающий сканистор, а с дополнительным узлом $\Phi D''_i$ — преобразователь с двумя выходами — линейным и функциональным. Универсальность устройства определяется следующими возможностями: а) функционального преобразования параметров переменных напряжений (амплитуда, фазовый сдвиг); б) получения на 2-х выходах различных функциональных зависимостей, например, линейной и нелинейной зависимостей типа $k_1 \varphi$ и $k_2 \cos \varphi$, где k_1 , k_2 — коэффициенты, φ — фазовый сдвиг; в) варьирования этих зависимостей заданием различных опорных напряжений; г) получения различных форм представления — потенциальной (S), фазо-импульсной (D), пространственной (P), причем последняя обеспечивает, помимо возможности ввода в последующие устройства оптоэлектронного преобразования, возможность визуальной индикации состояний. Кроме того, в подобной структуре (при наличии двух одномерных ДС или одного двухмерного) возможна реализация двухмерных функциональных преобразований с матричным расположением $\Phi D'_i$, CD'_i , $\Phi D''_i$, однако при этом считывание остается последовательным, а время считывания, определяемое временем развертки ГСН, увеличивается в связи с увеличением количества элементов n ; если же n не увеличивается, то в \sqrt{n} раз уменьшается разрешающая способность. Указанный недостаток устраняется в описываемой ниже схеме параллельного преобразователя.

Схема преобразователя приведена на рис. 29, а [А.с. 540268, СССР]. На рис. 29, б показан вариант реализации $\Phi П_j$, исключаящий неоднозначность преобразования при аналоговом задании входных переменных x , y , когда луч на выходе ДД попадает между $\Phi П_j$ и $\Phi П_{j+1}$; он содержит основной фотоприемник $\Phi П'_j$, вспомогательный (блокирующий) фотоприемник $\Phi П''_j$ и излучатель $И_j$; через «а_j» обозначены входы $\Phi П'_j$, через «б» — общий вход $\Phi П'_j$, подключенный к шине питания u_n , через «г» — общий вход $И_j$, подключенный к шине сброса, через «в» — общий выход $\Phi П'_j$, являющийся выходом преобразователя, на котором формируется функция преобразования $f(x, y)$, и через «д» — оптический выход $И_j$, используемый для последующей матричной обработки или визуального контроля состояния.

Данная схема является усовершенствованной схемой функционального преобразователя [А.с. 383072, СССР] с использованием ЭЛТ и матрицы фотоприемников; с помощью введенных структур-

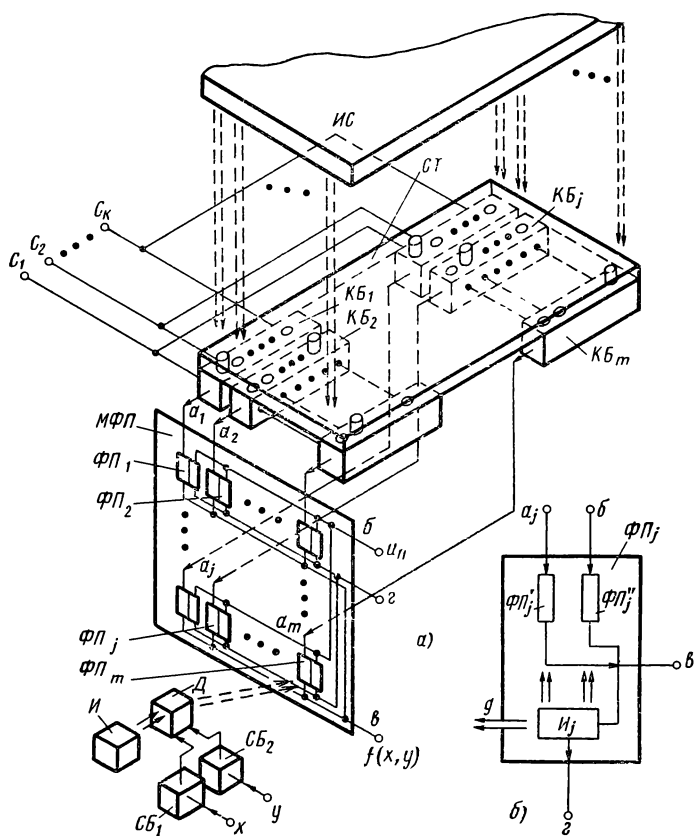


Рис. 29. Универсальный оптронный функциональный преобразователь с двухмерным дефлектором и матрицей фотоприемников:

ИС — источник света (плоский); СТ — сменный транспарант (например, перфокарта); КБ₁—КБ_т — оптоэлектронные кодирующие блоки, содержащие k (по числу входов констант C_1, \dots, C_k) оптоэлектронных ключей; МФП — матрица фотоприемников; ФП₁—ФП_т — фотоприемники; И — излучатель (точечный), например, лазерный диод; ДД — двухкоординатный дефлектор; СБ₁, СБ₂ — согласующие блоки; x, y — информационные входы

ных усовершенствований решаются следующие задачи: а) обеспечение как дискретного преобразования в многозначном алфавите C_1, \dots, C_k , так и аналого-дискретного преобразования входных переменных (x, y); б) устранение неоднозначности при аналого-дискретном преобразовании; в) обеспечение гибкой перестройки функций преобразования путем смены СТ [30]; г) получение визуальной информации о состоянии и запоминание состояний в оптической форме.

Преобразователь (см. рис. 29) работает следующим образом. Оптоэлектронные ключи, размещенные в кодирующих блоках $KB_1—KB_m$ и возбуждаемые источником параллельного светового потока $ИС$ через транспарант $СТ$ и соответствующие входные отверстия каждого блока, подключают фотоприемники $\Phi\Pi'_j$ ($j=1, \dots, m$) матрицы $МФП$ к шинам задающих источников напряжения, создающих сетку уровней (констант) C_1, \dots, C_k , которые определяют базис (алфавит) логического преобразования со значностью k или совокупность дискретных значений двухмерной функции преобразования входных переменных — $f(x, y)$. Матрица состоит из $m=k^2$ ячеек $\Phi\Pi_j$. Адресация, т.е. выбор шины и соответствующей ей константы для каждой ячейки $\Phi\Pi_j$, осуществляется индивидуально с помощью транспаранта $СТ$, выполняющего совместно с KB_j операцию настройки на определенную логическую или математическую функцию преобразования. Следовательно, меняя транспарант (транспаранты отличаются расположением отверстий относительно оптоэлектронных ключей каждого кодирующего блока), можно оперативно и гибко изменять функцию преобразования (набор функций сводится к набору перфокарт). Ячейки $\Phi\Pi'_j$ возбуждаются от $И$ с помощью двухкоординатного дефлектора $ДД$, преобразующего входные переменные x, y , точнее, пропорциональные им выходные сигналы $СВ_1, СВ_2$, в координату светового луча. Возбужденная ячейка $\Phi\Pi_j$ ($j=1, \dots, m$) переводится в состояние проводимости и подключает соответствующую константу C_i ($i=1, \dots, k$) на выход преобразователя.

В случае аналого-дискретного преобразования, когда входные переменные изменяются непрерывно, во избежание неоднозначности, т.е. подключения на выход преобразователя более одной константы, каждая возбужденная ячейка $\Phi\Pi_j$ вырабатывает импульс сброса, устанавливающий остальные ячейки в исходное состояние. Кроме того, ячейки $\Phi\Pi_j$ обладают памятью, которая необходима для запоминания предыдущего состояния в случае, когда отклоненный луч попадает в «мертвую зону», т.е. между двумя ячейками $\Phi\Pi_j, \Phi\Pi_{j+1}$. Это достигается тем, что вспомогательный фотоприемник $\Phi\Pi'_j$, возбужденный одновременно с основным ($\Phi\Pi_j$), подключает к шине питания u_n излучатель $И_j$, который имеет оптическую связь с $\Phi\Pi'_j, \Phi\Pi'_j$. Тем самым возбужденное состояние запоминается и самоблокируется до поступления импульса сброса при возбуждении соседней ячейки. Собственный импульс сброса, поступающий в общую шину, воздействует и на оптронную цепь возбужденной ячейки, однако последняя, в отличие от остальных, после сброса подтверждает свое состояние, а следующие импульсы сброса (во избежание автоколебательного режима) блокируются.

В режиме многозначного преобразователя устройство по рис. 29 реализует k -значную функцию двух переменных, а в режиме аналого-дискретного преобразователя — любую математическую функцию двух переменных с k произвольными уровнями квантования. Кроме того, ввиду наличия излучателей в ячейках $\Phi\Pi_j$ может быть получен дополнительный оптический выход «д» для визуальной индикации состояния. В режиме функционального генератора, когда входные переменные x, y принимают непрерывный или дискретный ряд значений, оптические выходы «д» формируют изо-

бражение, характеризующее траекторию сканирующего луча. Поэтому, помимо функциональной обработки, может быть получено визуальное отображение входных переменных, что представляет интерес для ряда приложений, например, для устройств отображения (индикации, регистрации), а также для настройки преобразователя или диагностики неисправностей.

Быстродействие преобразователя определяется быстродействием *ДД* и *ФП*, т.е. может быть весьма высоким (десятые и сотые доли мкс). По сравнению с аналогичными электронными реализациями параллельных *АЦП* данный преобразователь не нуждается в большом количестве пороговых элементов и дешифраторе. Точность преобразования, как и в электронных *АЦП*, определяется практически точностью задания констант C_1, \dots, C_n , а разрешающая способность — их количеством. Таким образом, обладая достоинствами электронных *АЦП*, такой оптронный *АЦП* лишен их недостатков и имеет более широкие функциональные возможности. Устранение неоднозначности может быть реализовано и другими средствами, например, с помощью волоконнооптических фоконов. Двухмерность также может быть использована двояко: как для преобразования двухмерных функций, так и для многоканального преобразования одномерных функций. В последнем случае вместо одного двухмерного дефлектора необходим один параллельный расщепитель и набор одномерных дефлекторов. В качестве дефлекторов могут быть использованы электрооптические и акустооптические преобразователи, а также ЭЛТ. Вместо матричных в схеме вида, приведенного на рис. 29, могут быть использованы другие позиционно-чувствительные фотоприемники, однако при этом либо уменьшается быстродействие преобразователя (например, в случае дискретного сканисторного фотоприемника), либо снижается точность преобразования (например, в случае сплошного сканистора, видистора и других аналоговых элементов [31]), либо оба указанных параметра ухудшаются одновременно. Возможны также и другие варианты ПЗУ, используемых для настройки преобразователей, однако оптоэлектронный вариант, показанный на рис. 29, отличается простотой реализации и возможностью унификации с МФП.

На рис. 30 показана схема оптронного преобразователя с калибровкой по тестовым сигналам.

Преобразователь работает следующим образом. В такте калибровки переключатели P_1, P_2 находятся в положении, показанном на рис. 30 (положение «1»). При этом на вход *ЭОП*, соответственно последовательным положением коммутатора K_1 , поступают аналоговые тестовые сигналы с выходов $(1, \dots, m)$ ГТС. Эти сигналы, общее количество которых (m) совпадает с количеством корректируемых неинформативных параметров оптронного преобразования, проходят прямой тракт (*ЭОП*, *ОП*, *ОЭП*) и преобразуются *СПАК* в соответствующую последовательность кодов, которые несут информацию о влиянии указанных неинформативных параметров тракта. Полученные коды сравниваются в *КК* с кодами, поступающими от *ГЧ* через коммутатор K_2 , эти коды соответствуют идеальному преобразованию вида $F_{0k}(x_i)$ при подстановке в качестве x_i номинальных значений тестовых сигналов.

На основании полученной разности кодов, преобразованной с помощью *ЛПКА* в аналоговый сигнал, вырабатывается корректирующий сигнал путем воздействия *ЛПКА* через P_2 и K_3 на со-

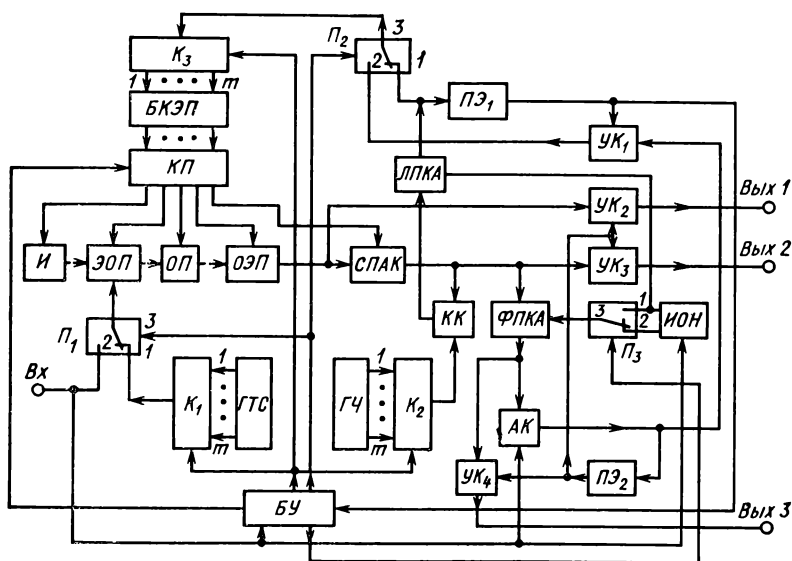


Рис. 30. Универсальный оптронный функциональный преобразователь с калибровкой по тестовым сигналам:

Π_1 — Π_3 — переключатели; K_1 — K_3 — коммутаторы; $KП$ — коммутатор с памятью; $ГТС$ — генератор тестовых сигналов; $ГЧ$ — генератор чисел; $БКЭП$ — блок коммутируемых элементов с памятью; $БУ$ — блок управления; $И$ — излучатель; $ЭОП$ — электроннооптический преобразователь; $ОП$ — оптический преобразователь; $ЭЭП$ — оптоэлектронный преобразователь; $СПАК$ — следящий преобразователь аналог-код; $КК$ — компаратор кодов; $АК$ — аналоговый компаратор; $ЛПКА$ и $ФПКА$ — линейный и функциональный преобразователи код-аналог; $ПЭ_1$, $ПЭ_2$ — пороговые элементы; $УК_1$ — $УК_4$ — управляемые ключи; $ИОН$ — источник опорных напряжений постоянного и переменного тока; «Вх» — вход преобразователя; «Вых 1»—«Вых 3» — выходы преобразователя

ответствующие корректирующие элементы $БКЭП$. Поскольку $БКЭП$ обладает памятью, при окончании работы коммутатора (его остановке на последней позиции) корректирующие элементы запоминают те состояния, которые они получили в результате последовательного подключения к выходу $ЛПКА$. Установившееся значение каждого корректирующего сигнала соответствует такому корректирующему воздействию на j -й неинформативный параметр преобразования, точнее, j -й элемент или узел оптронного тракта, подключенный с помощью $КП$, при котором сигнал на выходе тракта соответствует j -му калиброванному значению. При этом наряду с j -м корректирующим сигналом включены и предшествующие ($j-1$) сигналов, поскольку элементы $БКЭП$ и $КП$ обладают памятью.

В следующем (рабочем) такте переключатели Π_1 , Π_2 находятся в положении, обратном тому, которое показано на рис. 30 (положение «2»). При этом на вход преобразователя поступают не тестовые, а информационный сигнал x . Все корректирующие

воздействия первоначально отключены. В результате сравнения (в *КК*) кода преобразованного значения $F(x)$ с кодами, поступающими с выхода *ГЧ*, последовательно включается 1-й, 2-й и т. д. элементы *БКЭП*. При достижении в *ПЭ*₁ минимального порогового уровня последний выдает в *БУ* сигнал на остановку коммутатора, т. е. на прекращение подключения корректирующих сигналов. Оработка первой ступени коррекции на этом закончена. Одновременно *ПЭ*₁ включает *УК*₁, через который (а также через *П*₂) на вход включенного последним элементом *БКЭП* поступает дополнительный корректирующий сигнал с выхода *АК*. Этот сигнал вырабатывается на основе рассогласования входного сигнала x и сигнала x' на выходе *ФПКА*, дающего обратную расчетной функции преобразования выходного кода. При достижении на выходе *АК* минимального рассогласования срабатывает пороговый элемент *ПЭ*₂, который через ключи *УК*₂, *УК*₃ разрешает прохождение на выходы «Вых 1», «Вых 2» аналоговых и цифровых результатов функционального преобразования, а через *УК*₃ — выходного сигнала *ФПКА*, т. е. результата линейного преобразования x .

В варианте преобразователя переменного тока используется выход *ИОН* по переменному току, который служит для питания *ФПКА* с целью получения выходного сигнала того же вида, что и входной сигнал x (связь *ИОН* со входом обеспечивает их синхронизацию). Естественно, что в этом случае *АК* должен сравнивать сигналы переменного тока, например, по их тепловому действию или интегральному световому потоку.

Следует отметить, что схема такого преобразователя (см. рис. 30) является достаточно общей и конкретный вид корректируемого оптронного преобразования здесь несуществен.

ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИНДИКАЦИИ

К электроннооптическим средствам отображения, согласно принятой во введении терминологии, следует отнести преобразователи информации с входным электрическим аналоговым сигналом или позиционным кодом и выходным оптическим сигналом (изображением). В первом случае будем иметь дело с графическими устройствами, а во втором случае — с цифровыми устройствами отображения. По характеру фиксации изображений устройства отображения можно разделить на устройства представления информации оператору (индикаторы) и устройства накопления информации на различных носителях (регистраторы). Не углубляясь далее в терминологию, отметим, что здесь мы остановимся преимущественно на средствах цифровой (знаковой) индикации и регистрации, однако некоторое внимание мы уделим также графической индикации и регистрации, обладающим меньшей информативностью и точностью при большей наглядности и компактности отображения. Наглядность особенно полезна в индикаторах, а компактность — в регистраторах, что и определяет характер дальнейшего рассмотрения аналоговых индикаторов и регистраторов.

1. ОБЩИЙ ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ

Электроннооптические методы и устройства индикации отличаются большим разнообразием.

В табл. 1 приведены различные физико-химические эффекты, используемые для индикации. Они классифицированы по характеру возбуждаемой среды (твердое тело, жидкость, газ) и характеру воздействия (электрическое, магнитное, тепловое, механическое, оптическое). Все эффекты, представленные в табл. 1, являются одианными, т. е. обусловлены только одним силовым воздействием. Благодаря нумерации отдельных эффектов ссылки на них могут быть представлены сочетанием букв, характеризующих воздействие и среду, и цифры, указывающей условный номер в соответствующей группе эффектов; например, обозначение «Т—Ж—1» расшифровывается как «первый из группы тепловых эффектов в жидкостях».

В табл. 2 приведены примеры используемых (или принципиально пригодных) для индикации двойных эффектов, сочетающих электрическое и магнитное (ЭМ), электрическое и тепловое (ЭТ) и другие комбинированные воздействия. Среди них имеются мало-

Т а б л и ц а 1

Воздействие	Физико-химические эффекты, используемые для индикации, в зависимости от среды		
	Твердое тело (Т)	Жидкость (Ж)	Газ (Г)
Электрическое (Э)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Излучение тел накаливания 2. Электролюминесценция 3. Инжекционная электролюминесценция 4. Электрохромный эффект в пленках окислов 5. Модуляция и отклонение луча в электрооптических кристаллах 6. Электростатическое управление упругими элементами 7. Лазерный эффект в полупроводниках 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Электрофорез в дисперсных средах 2. Электрохемолуминесценция 3. Электрохемохромный эффект 4. Эффект Д. Р. в Ж. К. 5. Эффект Г. Х. в Ж. К. 6. Эффект УПД в Ж. К. 7. Твист-эффект в Ж. К. 8. Эффект управляемого двулучепреломления в Ж. К. 9. Холестерическо-нематический переход в Ж. К. 10. Воздействие пондеромоторных сил на жидкие диэлектрики 11. Электростатическое управление упругими отражательными элементами в жидкости 12. Электростатическое управление заряженной контрастной жидкостью 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Свечение ионизированного газа (газовый разряд) 2. Стимулированное излучение в газе (лазерный эффект)
Магнитное (М)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Модуляция и отклонение луча в магнитооптических кристаллах 2. Магнитное управление элементами перемещения (электромагнитные реле, ферродины) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разделение магнитных и немагнитных жидкостей в эмульсиях 2. Перемещение магнитных частиц в суспензиях 3. Воздействие пондеромоторных сил на жидкие магнетики 	—

	3. Перемещение доменной стенки в магнитных пленках	4. Магнитное управление упругими отражательными элементами в жидкости 5. Магнитное управление намагниченной контрастной жидкостью	—
Тепловое (Т)	1. Термохромный эффект 2. Агрегатный переход (Т—Ж) с изменением оптических свойств	1. Термохромный эффект в холестерических Ж. К. 2. Агрегатный переход (Ж—Г) с изменением оптических свойств	—
Вибрационное, механическое (В)	1. Вибрационные (механические) модуляторы и дефлекторы света с перемещением излучателей или световодов 2. Механические модуляторы света отражательного типа 3. Акустооптические модуляторы и дефлекторы света (твердотельные)	1. Перемещение контрастных частиц в коллоидах при вибрационном воздействии 2. Механическая модуляция Ж. К. 3. Механическая подача контрастной жидкости через клапаны 4. Механическое перемещение отражательных элементов в жидкости 5. Акустооптические модуляторы и дефлекторы света (жидкостные)	—
Оптическое, лучевое (О)	1. Фотолюминесценция 2. Катодолюминесценция 3. Катодохромный эффект 4. Фотохромный эффект 5. Индуцированное излучение в твердом теле (лазерный эффект)	1. Воздействие ИК лазерного излучения на Ж. К. 2. Индуцированное излучение в жидкости (лазерный эффект)	—

Таблица 2

Примеры используемых для индикации двойных эффектов с учетом среды			
Воздействие	Твердое тело (Т)	Жидкость (Ж)	Газ (Г)
ЭМ	---	Ориентация ЖК магнитным полем при электрическом возбуждении	Электромагнитное возбуждение газового разряда
ЭТ	Модуляционные эффекты, связанные с тепловым разрушением доменов в сегнетоэлектриках	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тепловое воздействие на ЖК, управляемые электрическим полем 2. Тепловая конвекция в коллоидах с проводящими частицами 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Агрегатный переход Ж—Г (с последующим разрядом в газе) 2. Электротепловое возбуждение газового разряда
ЭВ	Вибрационное сканирование луча, электрическая модуляция	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вибрационное воздействие на ЖК, управляемые электрическим полем 2. Вибрационное воздействие в коллоидах с проводящими частицами 	Электрохимическое возбуждение газового разряда
ЭО	Электрооптическая пространственная модуляция (преобразование изображений)	Воздействие ИК или УФ излучением на ЖК, управляемые электрическим полем	Электрооптическое возбуждение газового разряда
МТ	Модуляционные эффекты, связанные с тепловым разрушением доменов в ферромагнетиках	Тепловая конвекция в коллоидах с магнитными частицами	---

МВ	—	Вибрационное возбуждение в коллоидах с магнитными частицами	—
МО	Магнитооптическая пространственная модуляция (преобразование изображений)	—	—
ТВ	—	Агрегатный переход Ж—Г, механическое перемещение эластичных элементов	—
ТО	Оптическое возбуждение (окрашивание), тепловое гашение (обесцвечивание)	—	—
ВО	Радиационное излучение, механическая модуляция, люминесценция	—	—

появление в последнее время большого количества патентов, однако широкого практического применения они еще не получили.

Индикаторные устройства с модуляторами и дефлекторами света на электрооптических кристаллах (Э—Т—5; ЭТ—Т, табл. 2) пока слишком дороги и находят применение преимущественно в прецизионных лазерных системах индикации (см. также Э—Т—7, О—Ж—2, Э—Г—2); то же самое можно сказать об устройствах с применением магнитооптических (М—Т—1; МТ—Т, табл. 2) и акустооптических (В—Т—3, В—Ж—5) модуляторов и дефлекторов света. Все перечисленные разновидности индикаторных устройств будут отдельно рассмотрены ниже.

Электростатически управляемые упругие элементы или электро-статические реле (Э—Т—6) разрабатывают и применяют по своему прямому назначению (т.е. как элементы коммутации) достаточно успешно, однако в технике индикации (т.е. как элементы модуляции светового потока [11]) их используют редко. При этом основные трудности заключаются в обеспечении необходимого качества модуляции и в устранении взаимного влияния элементов (кросс-эффекта) в матричных структурах. Проводимые усовершенствования, заключающиеся в использовании пленочных консольных структур и сеточных экранов, находящихся под фиксированным потенциалом, а также в электроннолучевом управлении матричными мембранными модуляторами, помещенными в ЭЛТ вместо люминесцирующего экрана [Пат. 3746785, США], не изменяют ситуацию в принципе. Более того, именно в последнем случае (решетка упругих мембран в качестве экрана ЭЛТ) очевидна искусственность этих усовершенствований по сравнению с непосредственным использованием ЭЛТ в качестве индикатора.

Магнитное управление элементами перемещения (М—Т—2) представляет собой, по-видимому, самый старый способ индикации, который в настоящее время сохранил свои позиции главным образом в конструкциях с ферродинами и в мозаичных панелях с поворотными флажками, окрашенными (с противоположных сторон) в контрастные цвета. Такие индикаторы целесообразно использовать для отображения относительно медленно меняющейся справочной информации коллективного пользования (на вокзалах, в метро и т.п.).

Эффект перемещения доменной стенки в магнитных пленках в зависимости от их намагниченности (М—Т—3) сам по себе довольно интересен и в принципе может быть использован для аналоговой индикации, однако он непригоден для непосредственного наблюдения, требует значительного оптического увеличения и принятия специальных мер по обеспечению необходимой контрастности (например, использования лазерной подсветки). Данные о практическом использовании этого эффекта для целей индикации отсутствуют.

Термохромный эффект (Т—Т—1) изучался в основном на предмет создания термоиндикаторов, обладающих высокой чувствительностью к изменению температуры, причем в этом случае зачастую не требуется обеспечивать обратимость эффекта. Применительно к индикации исследовался обратимый термохромный эффект в термоласках серебряно-ртутного и медно-ртутного йодида, обладающих гистерезисом термооптических свойств и соответственно этому обеспечивающих запоминание информации [49]. Нагрев осуществляется пленочными резистивными нагревателями,

на поверхности которых нанесен термохромный материал и которым придана, например, форма сегментов синтезируемого знака. Кроме того, может использоваться возбуждение термохромных пленок лазерным лучом. Все эти варианты термохромных индикаторов не вышли пока за рамки лабораторных исследований.

Индикаторные устройства, в которых использован агрегатный переход «твердое тело — жидкость» ($T-T-2$), пока можно отнести к гипотетическим. Их ближайшими прототипами можно считать термоиндикаторы плавления, которые в режиме циклической индикации должны обеспечивать обратимость эффекта и возможность многократного использования. Публикаций по этому вопросу практически нет. Имеются сведения и практические разработки по индикаторам на смежном агрегатном переходе «жидкость — пар» ($T-J-2$) [93]. К сожалению, эти данные не могут быть использованы для оценки свойств и характеристик обратимых индикаторов плавления. Более того, в некоторых отношениях свойства индикаторов плавления могут быть противоположны свойствам индикаторов испарения. Если, например, для индикаторов плавления использовать такие материалы, как парафин и стеарин, то, как показывают пробные эксперименты, обеспечение необходимой контрастности требует выполнения зеркальной отражающей поверхности, тогда как в испарительных индикаторах используется шероховатая поверхность покровного стекла и зачерненная задняя стенка. Кроме того, испарительные индикаторы весьма чувствительны к качеству герметизации (попаданию пузырьков воздуха), тогда как в индикаторах плавления столь жесткие требования к качеству герметизации не предъявляются.

Практическая разработка матричного испарительного индикатора выполнена фирмой Princeton Material Science. В индикаторе используются взаимно перпендикулярные прозрачные электроды и расположенные на их пересечениях прозрачные нагревательные элементы. В качестве жидкости, смачивающей шероховатую поверхность покровного стекла и делающей ее прозрачной в невозбужденном состоянии, используется скипидар или четыреххлористый углерод. При подаче через электроды постоянного или переменного тока (рассеиваемая мощность порядка 2 Вт/см^2) происходит избирательное испарение жидкости и замутнение покровного стекла. Быстродействие по включению (время испарения) — единицы, а по выключению (время конденсации) — десятки миллисекунд.

Индикаторы с использованием вибрационных (механических) светомодулирующих и отклоняющих устройств на светодиодах ($B-T-1$) пока нахо-

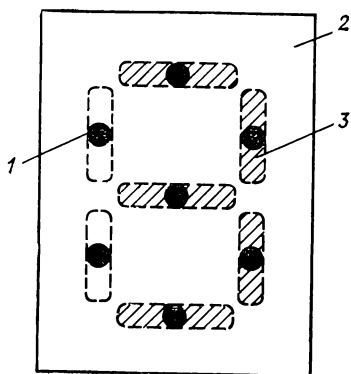


Рис. 32. Цифровой индикатор на вибрирующих светодиодах (вид спереди):

1 — экранирующие площадки; 2 — панель; 3 — сегменты

дятся в стадии разработки. Конструкция семисегментного цифрового индикатора на вибрирующих световодах [А.с. 430407, СССР] показана на рис. 32 (вид со стороны лицевой панели). Сегменты 3 образованы выходными торцами вибрирующих световодов, все входные торцы которых сведены к одному общему излучателю (сегменты, соответствующие возбужденным световодам, заштрихованы). В исходном (невозбужденном) положении излучение выходных торцов световодов экранируется площадками 1. При возбуждении световоды сканируют (в обе стороны от экранирующей площадки) световые сегменты 3. Количество вибраторов равно числу сегментов (7 шт.). Вместо 7 вибраторов и 7 световодов могут быть использованы 1 вибратор и 1 световод при двухкоординатном возбуждении: в этом случае формируется фигура Лиссажу в форме «8», а набор всех цифр от 0 до 9 реализуется при помощи модулятора света, блокирующего те или иные фрагменты изображения. Этот вариант конструктивного решения соответствует классификационной группе ЭВ—Т табл. 2, т.е. совместному использованию механического (вибрационного) сканирования и электрической модуляции. В принципе аналогичное решение может быть реализовано и при непосредственном магнитном или электрическом управлении сканированием, если световод снабдить магнитным или электропроводящим покрытием и поместить во вращающееся электромагнитное или электростатическое поле. Варьируя физические реализации, — например, заменяя твердый световод жидким или заменяя вибрирующий световод вибрирующим точечным излучателем (лазерным диодом) [Пат. 1548788, ФРГ], получим новые конструктивные модификации индикаторных устройств. К числу таких модификаций следует отнести и варианты последовательного синтеза изображений с помощью отражательных или излучающих растров и считывающих световодов, относительное расположение элементов которых изменяется с помощью вращающегося барабана или подвижной шторки [Пат. 1356932, Англия].

Механические модуляторы света отражательного типа (В—Т—2) имеют несколько конструктивных модификаций, которые можно свести к двум основным вариантам: а) механические (вибрационные) переключатели направления излучения; б) механические (вибрационные) переключатели «рассеивание — поглощение». В качестве примера реализации модулятора вида «а» можно привести конструкцию матрицы, вдоль столбцов которой направлены входные лучи, а вдоль строк — выходные (или наоборот) [Пат. 3622792, США]. В точках пересечения строк и столбцов помещены пьезоэлементы, которые под воздействием поданных на них напряжений изгибаются и отражают продольные лучи в перпендикулярном направлении. Примером реализации модулятора вида «б» является конструкция плоского индикатора [Пат. 2133121, ФРГ] с шероховатой отражающей поверхностью покровного стекла и подвижными элементами из упругого светопоглощающего материала, которые приводятся в соприкосновение с шероховатой поверхностью стекла при помощи магнитострикционных или пьезоэлектрических вибраторов.

Аналогичный результат может быть получен при использовании механического перемещения отражательных элементов в жидкости (В—Ж—4). В одной из подобных конструкций [Пат. 3864024, США] имеется передняя прозрачная панель, склеенная с ней эла-

стичная задняя стенка и жидкость между ними. Избирательно накладывая на заднюю стенку механическую нагрузку и тем самым приводя ее в соприкосновение с панелью, получают световой и (или) цветовой контраст при соответствующем выборе материала стенки и заполняющей жидкости. И, наконец, аналогичный результат может быть получен при электростатическом или магнитном [Пат. 3812490, США] избирательном возбуждении гибкой мембраны из электропроводящего или магнитного материала, помещенного в контрастирующую с ним по цвету диэлектрическую или диамагнитную жидкость (Э—Ж—11, М—Ж—4).

Фотолюминесценцию применительно к устройствам индикации (О—Т—1) используют двояко: для визуализации стимулирующего ИК-излучения или коротковолнового (радиационного) излучения.

В первом случае используют широко распространенные катодолюминесцентные ЭЛТ в режиме ИК стимуляции [53]: при этом люминофор из сульфида цинка активируют свинцом и медью, благодаря чему он приобретает способность запасать и в течение десятков секунд сохранять энергию, полученную от возбуждающего электронного пучка. В момент возбуждения такого люминофора интенсивность его люминесценции невелика; после прекращения возбуждения экран облучается извне стимулирующим ИК-излучением, которое освобождает запасенную экраном энергию и усиливает люминесценцию возбужденных ранее участков. Такое отсроченное считывание информации может быть полезным для радиолокационного индикатора, с помощью которого осуществляется сначала многократное сканирование, а затем ИК-подсветка экрана, визуализирующая траектории попавших в зону наблюдения подвижных объектов.

Во втором случае (визуализация радиационного излучения) [А. с. 439829, СССР] слой люминофора наносят на металлическую (например, молибденовую) подложку, а между ними помещают слой титана, насыщенный тритием, что дает возможность визуализировать слабые радиационные потоки. Такие индикаторы удобны для постоянной подсветки мнемосхем в условиях слабой внешней освещенности или в качестве аварийных источников излучения, поскольку они расходуют только внутреннюю энергию радиоактивного распада. Для индикации изменяющейся информации в конструкции таких индикаторов должны быть введены механические модулирующие элементы, на управление которыми расходуется энергия, в связи с чем эти индикаторы (ВО—Т, табл. 2) теряют свое основное достоинство — автономность работы.

Катодолюминесцентные индикаторы (О—Т—2) представляют собой группу наиболее полно изученных и широко применяемых индикаторных устройств на ЭЛТ; в связи с этим они будут далее рассмотрены отдельно. Катодохромные (О—Т—3) и фотохромные (О—Т—4) индикаторные устройства можно скорее отнести к экспериментальным, чем к серийным, однако несомненная перспективность и преемственность с катодолюминесцентными приборами оправдывает их совместное рассмотрение. Далее следует отметить также интенсивные исследования по лазерным методам записи и стирания на фотохромных и катодохромных носителях (ТО—Т, табл. 2), в связи с чем целесообразно совместно рассмотреть как перечисленные электронно-лучевые, так и лазерно-лучевые методы и средства индикации.

Переходя к обзору жидкостных индикаторов, отметим, что их

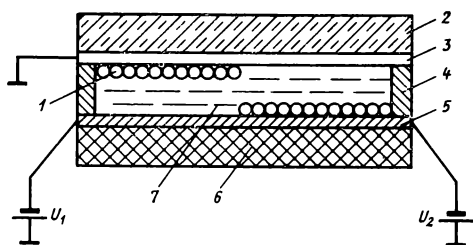


Рис. 33. Электрофоретический индикатор (вид сбоку):

1 — пигментные частицы (белые); 2 — покрывное стекло; 3, 5 — соответственно прозрачный и непрозрачный электроды; 4 — прокладка; 6 — основание (подложка); 7 — суспензионная жидкость (черная); U_1 , U_2 — источники напряжения

разнообразие порождается в первую очередь способностью жидкостей к образованию различных дисперсных сред — эмульсий (жидкость в жидкости), суспензий и коллоидов (твердые частицы в жидкости), аэрозолей (частицы жидкости в газе).

В электрофоретических индикаторах (Э—Ж—1) используют известное явление электрофореза — миграции взвешенных в суспензионной жидкости заряженных пигментных частиц под действием электрического поля. Специалисты японской фирмы Matsushita Electric Industrial Co, Ltd предложили использовать это явление для создания индикаторов [69].

Конструкция электрофоретической индикаторной ячейки показана на рис. 33. Электроды выполняются из окиси индия; прокладка толщиной около 100 мкм — из полиэфирной пленки; суспензия — из частиц двуокиси титана, покрытых полиэтиленом, или комплексного соединения, содержащего смесь тетрафтордибромэтана, трихлортрифторэтана, масел и красителей. Выбор материала пигментных частиц и суспензионной жидкости обеспечивает равномерную плотность, химическую устойчивость и контрастность. Направление тока определяет соотношение цвета фона и знака на нем: белый на черном фоне или черный на белом. Контрастность в экспериментальных панелях составляла до 40:1 при напряжении 75 В и потребляемой мощности порядка 200 мкВт/см². Быстродействие по включению и выключению панелей — порядка десятков мс; долговечность в непрерывном режиме работы при частоте переключения 1 Гц составляла 3 тыс. ч; температурный диапазон — (–15 ÷ +50)°С. Технические и эксплуатационные характеристики электрофоретических индикаторов таковы, что их вполне можно использовать в автономных приборах — тестерах, часах, калькуляторах. Этому способствует также свойственная им долговременная память. Фактическое распространение электрофоретических индикаторов зависит от воспроизводимости свойств, в частности, повторяемости размеров пигментных частиц, поскольку именно эти факторы определяют их технологичность в серийном производстве.

Среди других оптических эффектов в дисперсных средах, пригодных для создания индикаторов, следует отметить возможность разделения магнитной и немагнитной жидкостей двух контрастных цветов в эмульсии при помощи локально сосредоточенных магнитных полей (М—Ж—1) [Пат. 3648269, США], а также возможность избирательного возбуждения пигментных магнитных частиц в суспензиях (М—Ж—2). По-видимому, избирательное возбуждение контрастирующих частиц в суспензиях и коллоидах возможно также при локальном вибрационном воздействии (В—Ж—1). Поскольку обеспечить равномерную плотность частиц в суспензии

технологическими средствами затруднительно (для этого необходимо иметь высокую воспроизводимость изготовления пигментных частиц), в такого рода индикаторах целесообразно использовать сочетание локальных воздействий на заряженные или намагниченные частицы с интегральным воздействием, обеспечивающим перемешивание или конвекцию частиц в суспензии, например, с помощью направленного теплового потока или вибрации (комбинированные эффекты ЭТ—Ж—2, ЭВ—Ж—2, МТ—Ж, МВ—Ж, табл. 2).

Электрохемолюминесценция, или электрофлорный эффект [76], представляет собой фотолюминесценцию в некоторых органических жидкостях (электрофлорах), возникающую под воздействием электрического поля. Люминесцирующие электрофлоры возбуждаются УФ-излучением с длинами волн (0,3—0,4) мкм, причем яркость свечения примерно пропорциональна интенсивности облучающего света, а его спектр соответствует обычно голубому цвету. Поляризующее напряжение составляет 3—5 В. Химические реакции, сопровождающиеся излучательной рекомбинацией ион-радикалов органических соединений в проводящих растворах, приводят к излучению на электродах с некоторой временной задержкой относительно момента переключения направления тока, причем интенсивность излучения достигает максимума через несколько секунд, а затем падает. Излучение более интенсивно в области катода, так как время жизни отрицательных ион-радикалов больше, чем положительных. При постоянном напряжении и перемешивании раствора излучение вокруг катода наблюдается непрерывно. В качестве органических компонентов электрофлорных композиций используются ароматические углеводороды антрацен, хризен, нафтацен, перилен и др., а также изобензофураны и изоиндолы, в качестве растворителя — диметилформамид, в качестве электролита — тетраэтиламмонийбромид и др. Возбужденное состояние электрофлорных ячеек сохраняется некоторое время после воздействия тока (величиной 3—10 мА), и постепенно (в течение нескольких минут) люминесценция затухает вследствие молекулярной диффузии. Ожидаемая область применения электрохемолюминесцентных индикаторов — радиолокационные устройства отображения, а также трехмерные индикаторы, составленные в виде набора плоских матричных панелей. Подобные реализации индикаторов объемных изображений (так называемые многослойные объемные индикаторы) [39] предложены также на основе ряда других индикаторных элементов — жидкокристаллических матриц, фотохромных панелей, плазменных панелей.

Электрохемохромный эффект в жидкостях (Э—Ж—3) во многих отношениях сходен с электрохромным эффектом в твердых телах; в связи с этим они будут рассмотрены совместно.

Электрооптические эффекты в нематических жидких кристаллах получили наиболее широкое развитие и практическое применение. Столь же широко применяют термохромный эффект в холестерических жидких кристаллах (Т—Ж—1). В меньшей степени изучены эффекты, обусловленные механической модуляцией жидких кристаллов (В—Ж—2), а также лучевым (лазерным) воздействием (О—Ж—1). Кроме того, ряд воздействий на жидкие кристаллы (ЖК) могут быть не основными (возбуждающими), а сопутствующими (ориентирующими, стирающими), таковы указанные в табл. 2 комбинированные эффекты: ориентация магнитным полем (ЭМ—Ж);

тепловое, вибрационное и лучевое воздействия на ЖК, управляемые электрическим полем (ЭТ—Ж, ЭВ—Ж, ЭО—Ж). Поскольку количество основных и сопутствующих эффектов в ЖК, а также конструктивных модификаций индикаторов на ЖК весьма внушительно, дать их общую характеристику в кратком обзоре не представляется возможным. Уместность отдельного рассмотрения свойств и характеристик индикаторов на ЖК станет еще более очевидной, если учесть, что количество патентных публикаций последних лет по ЖК сравнимо с количеством патентных публикаций по всем остальным индикаторным устройствам, вместе взятым.

Воздействия пондеромоторных сил на жидкие диэлектрики (Э—Ж—10) и жидкие магнетики (М—Ж—2) могут быть использованы для создания аналоговых индикаторных устройств, однако в связи с низкой чувствительностью к полю, а также критичностью к наклону и вибрации они вряд ли получают практическое применение.

Среди механических и электрических воздействий на жидкости представляет интерес подача контрастной жидкости через клапаны (В—Ж—3). Если, например, установить набор прозрачных панелей с полостями в виде контуров индицируемых знаков и снабдить каждую такую панель входным и выходным клапанами, через которые подается контрастная жидкость (например, черная на белом отражательном фоне), то может быть получен высококонтрастный пакетный индикатор [Пат. 48—11677, Япония]. Прямая и обратная подачи жидкости могут быть выполнены через один клапан, если в канале подачи создается последовательно давление и разрежение. Возможно также создание знаков синтезирующего индикатора подобного типа (например, сегментного). Помимо непосредственно механического управления давлением — разрежением может быть применено также косвенное управление с использованием промежуточного агрегатного перехода Ж—Г, которое приводит к значительному изменению объема и давления пара, передаваемого путем перемещения эластичных элементов-клапанов (ТВ—Ж, табл. 2). И, наконец, вместо знакопеременного механического воздействия (давление — разрежение) может быть использовано знакопеременное электрическое или магнитное воздействие, если жидкость соответственно заряжена или намагничена (Э—Ж—12, М—Ж—5).

Физические эффекты в газообразных веществах, пригодные для индикации, связаны в основном с газовым разрядом (Э—Г—1), который широко изучен и используется в газоразрядных и плазменных индикаторах. Поскольку последние будут рассмотрены отдельно, мы ограничимся здесь указанием на то, что, помимо широко распространенного электрического стимулирования газового разряда, могут быть использованы различные комбинированные воздействия (см. табл. 2): электромагнитное (ЭМ—Г), электротепловое (ЭТ—Г—1—2), электромеханическое (ЭВ—Г), электрооптическое (ЭО—Г). Среди конструктивных реализаций отметим электромеханически управляемый газоразрядный индикаторный элемент, показанный на рис. 34 [А. с. 439945, СССР]. Когда конденсатор 8 заряжен до U_n , а $U_y = 0$, между магнитоуправляемыми контактами 3 происходит газовый разряд. При подаче в обмотку 4 управляющего сигнала ($U_y \neq 0$) контакты 3 замыкаются, излучение прекращается, а конденсатор 8 разряжается через резистор 6 до напряжения, обусловленного соотношением сопротивлений резисторов 6 и 7. При последующем отключении U_y конденсатор 8 до-

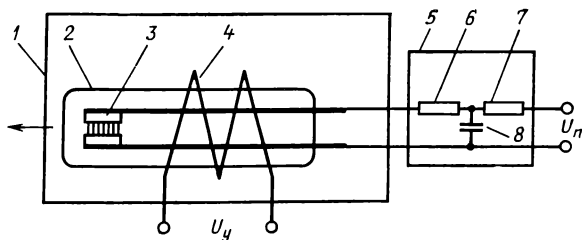


Рис. 34. Газоразрядный индикатор с электромеханическим управлением:

1 — магнитоуправляемое газоразрядное реле; 2 — прозрачная колба; 3 — магнитоуправляемые контакты; 4 — управляющая обмотка; 5 — зарядно-разрядная цепь; 6, 7 — резисторы разряда, заряда; 8 — накопительный конденсатор; U_y — источник управляющего сигнала; $U_{п}$ — источник питания

заряжается до $U_{п}$, контакты 3 размыкаются и между ними снова возникает газовый разряд. Модулирующие газоразрядные ячейки выполняют в форме сегментов или точек, поэтому из них могут быть синтезированы сегментные дискретные [А. с. 499610, СССР] или аналоговые индикаторы. Очевидное преимущество последних перед широко применяемыми газоразрядными индикаторами — гальваническое разделение цепей управления и питания, а также снижение управляющих напряжений; недостаток таких индикаторов — ограниченный ресурс, однако в их ближайших аналогах (магнитоуправляемых герконах) он доведен до вполне приемлемой величины (10^8 и более срабатываний), что позволяет рассчитывать на сходный результат и в газонаполненных реле.

В табл. 2 имеются два комбинированных эффекта, которые не упоминались в связи с рассмотрением одианрных эффектов, — это электрооптическая и магнитооптическая пространственная модуляция или преобразование изображений (ЭО—Т, МО—Т). В этом случае используют модулирующие свет и модулируемые светом запоминающие среды — сегнетоэлектрические и магнитодоменные, причем в общем случае запись и считывание изображений выполняются светом с различными спектральными и энергетическими параметрами. Для первичной модуляции электрооптических свойств используют также фотопроводники: при этом выбор модулирующих сред может быть еще более широким, в частности ими могут быть жидкие кристаллы, аморфные полупроводники, термопластики, эластомеры и др., а запись и считывание могут выполняться одним и тем же (в том числе белым) светом. Устройства, реализующие указанные эффекты, являются не только индицирующими, но и регистрирующими, в связи с чем они получили широкое распространение в оптоэлектронных ЗУ.

Ниже приводится описание основных групп индикаторных устройств, получивших или получающих наиболее широкое распространение, причем объединение в указанные группы базируется на сходстве конструктивных решений и эксплуатационных характеристик, а порядок следования групп соответствует их распространности.

2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ (ЭЛЕКТРОХРОМНЫЕ) ИНДИКАТОРЫ

В основу создания электрохимических (электрохромных) индикаторных устройств положены визуальные эффекты окрашивания различных оксидных пленок в связи с инжекцией в них электрических зарядов при электролитических реакциях. В качестве электрохромных материалов используются окиси ниобия, молибдена, ванадия и вольфрама; в качестве противоэлектродов используются графит, палладий и другие материалы, причем в ряде конструкций вводятся дополнительные ионопористые и электрокаталитические слои; разнообразны также применяемые электролиты, которые зачастую снабжаются различными присадками, обеспечивающими высокую обратимость электрохромных реакций, увеличение количества циклов окрашивания и стирания, улучшение контрастности, увеличение времени запоминания. В принципе, в электрохромных индикаторах (ЭХИ) могут быть использованы как жидкие, так и твердые электролиты. Помимо электрического возбуждения ЭХИ, возможно также наложение тепловых воздействий. И, наконец, наряду с наиболее распространенными дискретными (сегментными, мозаичными) ЭХИ предложены аналоговые ЭХИ, в которых длина окрашенного участка пропорциональна количеству электричества [Пат. 3839857, США]. Большей частью окрашивание оксидных слоев изменяет цвет ЭХИ от светло-серого (белого) до темно-синего и обратно (при изменении полярности тока) с промежуточными тонами в зависимости от количества электричества, полученного в каждом полупериоде коммутации. По данным работы [17] можно указать следующие усредненные параметры ЭХИ: управляющее напряжение — несколько В; потребляемая мощность — порядка единиц мВт/см²; быстродействие (время цикла окрашивания) — десятки — сотни мс; время запоминания — порядка 1 с; температурный диапазон — ($-50 \div +100^\circ \text{C}$). Приведенные параметры получены для опытных образцов индикаторов, однако уже сейчас несомненно то, что эти индикаторы могут заменить ряд других индикаторов, например, жидкокристаллические, поскольку преимущество последних в потребляемой мощности (единицы и десятки мкВт/см²) для большинства приложений не является решающим, а по другим параметрам они уступают ЭХИ. Как показано в работе [67], ЭХИ вполне совместимы с интегральной технологией и их можно изготавливать групповым методом. В связи с этим стоимость ЭХИ может быть сравнимой со стоимостью жидкокристаллических индикаторов.

3. ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ

В настоящее время в специальной литературе достаточно освещены вопросы классификации различных физико-химических эффектов в жидких кристаллах (ЖК) и пути их практического использования [14, 114]. Широкое практическое применение получили следующие эффекты: динамического рассеяния (ДР) в нематических ЖК, оптического накопления (памяти) в смесях нематических и холестерических ЖК, «гость — хозяин» (ГХ) в смесях нематических ЖК с красителями или с холестерическими ЖК, а так-

же управляемая полем дифракция (УПД) в доменных структурах нематических ЖК, вращение плоскости поляризации в закрученных структурах нематических ЖК (твист-эффект), двулучепреломление, фазовый переход (УПФП) холестерической структуры в нематическую, тепловая (в частности, лазерная) адресация холестерических и смектических ЖК, механическое (вибрационное) управление модуляционными ячейками на ЖК и другие, т. е. почти все одинарные эффекты в ЖК (см. табл. 1).

Менее широко используют двойные комбинированные эффекты в ЖК (табл. 2). В частности, несмотря на сравнительную изученность эффектов ориентации ЖК магнитным полем и фотоупругих эффектов [37], их практическое применение совместно с электрооптическими эффектами (ЭМ—Ж, ЭВ—Ж—1 по табл. 2) нам неизвестно.

В настоящее время запатентовано индикаторное устройство на ЖК [Пат. 3637291, США], которое возбуждается (просветление) электрическим полем и гасится (замутнение) воздействием тепла с последующим охлаждением (ЭТ—Ж—1, табл. 2). В работе [41] описано применение нематических ЖК с эффектом ДР для регистрации длинноволнового лазерного излучения, которое в месте падения преобразует непрозрачное состояние ЖК в прозрачное (состояние изотропной жидкости). Очевидно, этот комбинированный эффект (ЭО—Ж, табл. 2), может быть использован и в устройствах индикации (например, с применением лазерных диодов, излучающих в ИК-диапазоне). Аналогичный эффект при воздействии излучения УФ-диапазона реализуется с использованием смеси ЖК с люминофором (например, родамином) [Пат. 3844637, США]: положительным свойством такого комбинированного эффекта является возможность сочетания пассивной и активной (излучательной) индикации.

Поскольку в целом разработка и использование комбинированных эффектов в ЖК находится в начальной стадии, дадим краткую характеристику свойств и особенностей перечисленных выше одинарных эффектов [13].

Характер проявления электрооптических эффектов в ЖК во многом зависит от типа ЖК и знака диэлектрической анизотропии.

В нематических ЖК с положительной диэлектрической анизотропией ($\Delta\epsilon > 0$) при нормальной ориентации ЖК изменение электрооптических свойств под действием электрического поля отсутствует, так как направление действия поля совпадает с направлением ориентации ЖК. При планарной ориентации ЖК приложение поля по мере увеличения напряженности приводит к повороту осей молекул и соответственно этому к обнаружению в скрещенных поляроидах двулучепреломления (называемого также управляемой разностью хода) и субтрактивного окрашивания.

Твист-структура нематического ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ в скрещенных поляроидах просветлена, а в параллельных погашена. При наложении электрического поля, вследствие поворота молекул ЖК по полю, он соответственно затемняется или просветляется. При пороговом напряжении

$$U_{\Pi} = \sqrt{2} \pi \sqrt{\frac{1}{\Delta\epsilon} \left(\frac{\pi}{2} K_{11} + K_{33} - 2K_{22} \right)},$$

где K_{11} , K_{22} , K_{33} — модули упругости поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба, происходит переход твист-структуры в нормально-ориентированную. В связи с тем, что здесь может быть выполнено условие $2K_{22} > K_{33}$, U_{π} удастся сделать весьма малым (единицы и даже десятые доли В). При этом U_{π} не зависит от толщины слоя ЖК и частоты; время срабатывания составляет десятки мс, а время релаксации — единицы с. Твист-структура весьма чувствительна также к механической деформации и магнитному полю, в связи с чем поворот плоскости поляризации твист-структуры в любом силовом поле называют обобщенно полевым эффектом (повидимому, правильнее было бы называть его поляризационным).

Если в нематическом ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ («хозяин») растворены молекулы дихроичного красителя («гостя»), то спектр поглощения смеси зависит от их ориентации относительно направления поляризации падающего света. Ориентация же молекул «гостя» определяется ориентацией молекул «хозяина». Если первоначально ЖК ориентирован планарно, а свет поляризован вдоль того же направления, то он поглощается молекулами красителя и жидкость имеет цвет красителя. Если же под влиянием электрического поля молекулы ЖК ориентируются по полю и, следовательно, перпендикулярно направлению поляризации света, то увлекаемые ими молекулы красителя уменьшают степень поглощения и жидкость становится бесцветной. Возможно обратное изменение цвета, а также переключение цветов при использовании двух красителей. Перспективно также использование в качестве красителей холестерических ЖК. Время включения эффекта «гость — хозяин» составляет несколько мс, время релаксации — до 200 мс.

В холестерических ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ наблюдается управляемый электрическим полем фазовый переход холестерической структуры в нематическую. Физически его можно объяснить «раскручиванием» спирали, в результате которого различно ориентированные слои холестерического ЖК приобретают параллельную ориентацию. Практически для тонких слоев ЖК получают пороговые напряжения порядка 70 В, время срабатывания и релаксации составляет сотни мс. При меньших управляющих напряжениях, вследствие изменения шага спиральной структуры, наблюдаются различные цветовые эффекты, вызванные изменением углового спектра рассеяния. Шаг спирали холестерического ЖК весьма чувствителен к воздействию механических напряжений, примесей, изменению температуры; в связи с этим холестерические ЖК являются весьма чувствительными индикаторами тепловых, а также УЗ полей; их широко используют в целях визуализации.

В нематических ЖК с $\Delta\epsilon < 0$ и нормальной (гомеотропной) ориентацией, аналогично ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ и планарной ориентацией, наблюдается (в скрещенных поляроидах) управляемое полем двулучепреломление и субтрактивное окрашивание. Для получения хорошей контрастности необходим коллимированный источник света.

Более интересно поведение нематических ЖК с $\Delta\epsilon < 0$ и планарной ориентацией. Здесь на молекулы ЖК воздействует как ориентационная сила электрического поля, стремящаяся расположить молекулы ЖК перпендикулярно силовым линиям, так и сила трения течения, действующая по направлению тока, т. е. вдоль силовых линий электрического поля. В связи с этим имеем три режима взаимодействий указанных сил: слабое, когда преобладает ориентационная сила (напряжения до 5 В), среднее, когда ориен-

тационная сила и сила трения течения сравнимы (напряжения до 10 В), и сильное, когда равновесное течение нарушается (напряжения выше 10 В). При слабом взаимодействии наблюдаются интерференционные эффекты, вызванные небольшими смещениями молекул относительно планарного расположения. При среднем взаимодействии, в результате сложения ориентационной силы и силы трения течения, возникает вихревое движение молекул, причем оси вихрей ориентированы планарно относительно подложки и перпендикулярно исходной ориентации молекул. Поскольку в связи с периодическим изменением молекулярной ориентации в слое изменяется и показатель преломления, ЖК приобретает полосовую доменную структуру, т. е. уподобляется дифракционной решетке, шаг которой определяется диаметром круговых вихревых движений в слоях. Это и есть режим управляемой полем дифракции света (УПД). Начиная с напряжений порядка 12 В, возникает сильное взаимодействие, в результате которого движение жидкости становится турбулентным и поверхность ЖК становится рассеивающей (молочно-белой). Это и есть эффект динамического рассеяния (ДР). Если проводимость ЖК мала (удельное сопротивление $\sim 10^{10}$ Ом/см), ориентирующее действие тока меньше, чем ориентирующее действие подложки и электрического поля, и ДР не наступает. Однако доменная структура образуется, причем она параллельна первоначальной ориентации молекул в слое. В этом режиме УПД наблюдается также электрический гистерезис, т. е. ЖК ведет себя подобно сегнетоэлектрику. Эффект ДР также реализуется в двух режимах, различие которых определяется критиче-

ской частотой $f_{кр} = \frac{1}{\tau}$, где $\tau = \frac{\epsilon\epsilon_0}{\sigma}$ — время диэлектрической ре-

лаксации; ϵ — диэлектрическая проницаемость, а σ — удельная проводимость ЖК. При низких частотах возбуждения ЖК ($f < f_{кр}$) имеет место режим проводимости, при высоких ($f > f_{кр}$) — диэлектрический режим. В диэлектрическом режиме турбулентное движение отсутствует, но при достижении определенного уровня U_n , пропорционального \sqrt{f} , наблюдается колебание решетки в такт с полем, что воспринимается как обычное рассеяние. В диэлектрическом режиме, в отличие от режима проводимости ($U_n = 12 \div 15$ В), U_n достигает 100—150 В, но быстрое действие возрастает (единицы мс). На ЖК, работающий в режиме проводимости, воздействие повышенной частоты эквивалентно быстрому гашению эффекта ДР. Все указанные особенности ДР способствуют тому, что он является наиболее простым и гибко регулируемым электрооптическим эффектом, широко используемым для целей индикации. Что же касается эффекта УПД, то его применение наиболее перспективно в аналоговых регистрирующих устройствах, поскольку ЖК с УПД эквивалентен дефлектору света, отклоняющему падающий пучок в дифракционный максимум, угол отклонения которого пропорционален приложенному к ЖК напряжению. Отличие такого дефлектора от твердотельных заключается в том, что при умеренных напряжениях (порядка 100 В) могут быть получены аномально большие углы отклонения — $60 \div 80^\circ$.

Эффект оптического накопления в смеси нематического (90%) и холестерического (10%) ЖК заключается в специфическом проявлении эффекта ДР, при котором возбужденное состояние, благодаря спиральной ориентации и высокому удельному сопротивле-

нию холестерического ЖК, поддерживается весьма длительное время (часы и дни). При необходимости это состояние достаточно быстро (за 20—500 мс) разрушается приложением поля переменного тока напряженностью 5 В/мкм при частоте порядка нескольких кГц. Этот эффект, точнее, этот режим ДР, представляет интерес для создания индикаторов с медленно обновляющейся информацией.

Заключая эту краткую характеристику эффектов в ЖК, отметим, что применительно к жидкокристаллическим индикаторам (ЖКИ) наибольшего внимания заслуживают: ЖКИ на ДР, ЖКИ поляризационного типа (преимущественно, на твист-эффекте), цветные ЖКИ (на смесях ЖК с красителями) и ЖКИ с тепловой (или УЗ) адресацией. Класс ЖКИ на ДР является наиболее представительным. Отметим некоторые общие конструктивные особенности ЖКИ, обусловленные общностью применяемых конструктивных элементов и техпроцессов (ограничивающие пластины, прокладка, электроды, выводы, заполнение ЖК, герметизация, установка, условия использования).

Поскольку при любом качестве очистки материалов и герметизации ухудшение свойств ЖКИ может происходить за счет миграции примесей из ограничивающих пластин и прокладок, при прочих равных условиях всегда желательно обеспечить уменьшение потребляемого тока. В некоторых конструкциях ЖКИ для этого предусматривают [Пат. 3824002, США] покрытие электродов изолирующим слоем с фотоуправляемой проводимостью: при этом ток потребления автоматически уменьшается, если падает внешняя освещенность.

В обеспечении надежности и долговечности ЖКИ существенное значение имеет выбор прокладок между пластинами ЖКИ, а также технология заливки ЖКИ и герметизации. При установке прокладок «на клею» трудно обеспечить однородность клеящего слоя и предотвратить его попадание во внутреннюю полость ЖКИ. Если прокладка термопластична, то ее соединение с пластинами может быть выполнено за счет нагрева в ВЧ-поле по нанесенному на каждой из пластин металлизированному контуру [А. с. 334084, СССР]. В настоящее время предложены конструкции ЖКИ, не имеющие прокладок, в которых полости для заполнения ЖК выполнены в одной из пластин, приводимой в непосредственное соприкосновение с другой: в таких конструкциях герметизация сводится к соединению по внешнему периметру пластин. Кроме того, предложена двойная герметизация ЖКИ путем его помещения в корпус, который, в свою очередь, герметизируется [Пат. 3807833, США].

В одном из патентов предложена конструкция ЖКИ [Пат. 3799649, США], отличающаяся тем, что против отверстия, через которое вводится ЖК, располагается узкий барьер с отверстием: барьер способствует растеканию ЖК при заполнении, служит упором для пробки и препятствует миграции примесей из пробки в ЖК.

Электроды ЖКИ обычно выполняют в форме сегментов, соответствующих элементам синтезируемых знаков и расположенных в одной плоскости, хотя известны и пакетные конструкции ЖКИ, в которых индицируемые знаки наносятся на отдельных пластинах [Пат. 2212977, Франция]. В последнем случае затрудняется герметизация ЖКИ и уменьшается контрастность. Технология нанесе-

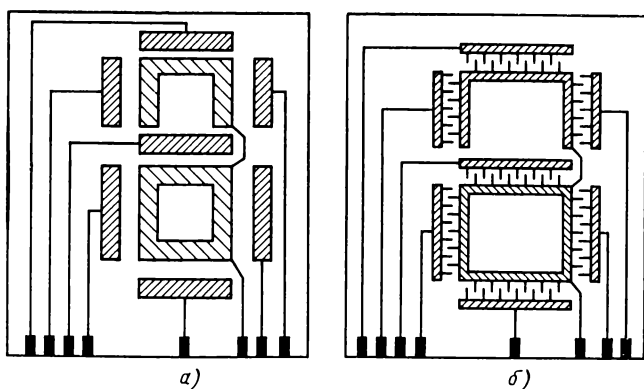


Рис. 35. Жидкокристаллические индикаторы с односторонними электродами:
а — прямоугольными; б — гребнеобразными

ния сегментов и токоотводов, в принципе, та же, что и при выполнении гибридно-пленочных микросхем, и может быть реализована на промышленном технологическом оборудовании. В большинстве конструкций ЖКИ сегменты выполняют прозрачными, а на подложку наносят второй электрод (или несколько электродов по числу индицируемых знаков), который выполняют зеркально-отражающим или прозрачным в зависимости от режима работы ЖКИ (на отражение, на просвет). Однако для панелей больших размеров и с большим количеством индицируемых знаков представляет затруднение обеспечить минимальную и стабильную толщину ЖК, заполняющего зазор между электродами, размещенными на различных пластинах. В связи с этим как в ЖКИ на ДР, так и в ЖКИ на твист-эффекте (поляризационных), применяют односторонние системы электродов, расположенных на общей подложке с минимальным зазором [Пат. 536538, Швейцария]. Два возможных варианта геометрии электродов таких ЖКИ показаны на рис. 35, а, б. В ЖКИ, приведенных на рис. 35, расстояние между электродами задано жестко и определяет толщину возбуждаемого ЖК слоя независимо от расстояния между подложкой и покровным стеклом, что облегчает выбор материалов и сборку индикатора.

Конструкции светоотражающих устройств и устройств подсветки ЖКИ также отличаются большим разнообразием. Известны ЖКИ с расположенным за задней пластиной рядом взаимно перекрывающихся зеркал, отражающих свет расположенного перед передней пластиной источника в сторону ЖК и в направлениях, мигающих глаз наблюдателя [Пат. 3734598, США], а также ЖКИ с аналогичной конструкцией отражающих зеркал (жалюзи) и расположенными между ними источниками задней подсветки [Пат. 3797914, США] (соответственно рис. 36, а, б). Известны также различные конструкции рассеивающих светопроводов и светонаправляющих устройств.

Среди оригинальных конструкций поляризационных ЖКИ отметим варианты отражательных индикаторов с одной поляроидной

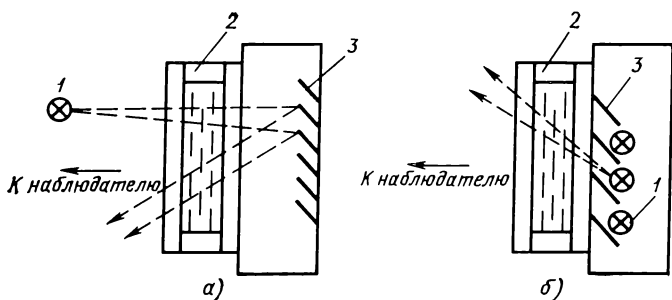


Рис. 36. Жидкокристаллические индикаторы с системой отражающих зеркал:

а — для внешней подсветки; *б* — для внутренней подсветки; 1 — источник света; 2 — панель; 3 — отражающие зеркала

пластиной и отражающим покрытием на задней стенке [Пат. 3784280, США]; индикаторов с электродами, нанесенными непосредственно на внутренние стенки поляроидных стекол [Пат. 3731986, США], а также индикаторов с поляроидами, выполненными в форме сегментов [Пат. 3857627, США].

Цветные ЖКИ, содержащие смеси ЖК с красителями, имеют по сравнению с ЖКИ на ДР и полевом эффекте преимущество в контрастности и гибкости выбора цветовой гаммы; в отношении остальных электрооптических характеристик они им, как правило, уступают. В конструктивном отношении цветные ЖКИ отличаются от одноцветных количеством кювет (замкнутых полостей, заполняемых ЖК).

ЖКИ с тепловой или УЗ адресацией используются в основном в преобразователях изображений и в многоэлементных матричных устройствах. Среди конструкций ЖКИ с УЗ адресацией отметим индикатор с ячейками ЖК, изменяющими светорассеяние с помощью мембран, управляемых пьезоэлементами [Пат. 3675989, США].

Знакосинтезирующие индикаторы в отношении системы представления можно разделить на сегментные и точечные, а с точки зрения управления — на мозаичные (с индивидуальной адресацией точек или сегментов) и матричные (с адресацией по строкам и столбцам). Первый вариант управления не подвержен влиянию перекрестных помех, однако нуждается в большом количестве управляющих шин. Поэтому его используют главным образом для управления сегментными индикаторами. Второй вариант позволяет значительно сократить количество управляющих шин, но связан с влиянием перекрестных помех на невыбранные элементы строки и столбца (так называемый «кросс-эффект»). Рассмотрим некоторые особенности конструктивного выполнения матричных и сегментных индикаторов, а также схем управления ими.

Прежде всего отметим, что матричные индикаторы, т. е. точечные индикаторы с матричным управлением, могут быть реализованы на всех перечисленных видах электрооптических эффектов в ЖК. При этом матричные ЖКИ можно использовать как для синтеза знаков (изображений), так и для их преобразования; в по-

следнем случае ЖКИ снабжают фоторезистивными или другими фоточувствительными слоями. Кроме того, электрически управляемые транспаранты на матрицах ЖК ячеек можно использовать совместно с матрицами фокусирующих линз и диафрагм для повышения контрастности изображений [Пат. 2047651, ФРГ]; с матрицами первичных оптических вентилях для устранения перекрестных искажений [А. с. 413446, СССР]; зачастую они совмещаются также с элементами схем управления (диодами, МОП-транзисторами), выполненными на тех же подложках методами интегральной технологии, и элементами записи и хранения изображений, например, на фотопроводниках и сегнетоэлектриках [Пат. 3832033, США].

В схемах матричного управления ЖКИ используют различные разделительные и пороговые элементы (диоды, полевые транзисторы, газоразрядные лампы и др.), причем для обеспечения режима работы ЖК на переменном токе полярность тока меняется циклически через каждый кадр [61]. Гашение невыбранных элементов осуществляется приложением к ним синфазных сигналов (амплитудно-фазовое управление), либо сигналов повышенной частоты (для эффекта ДР). В первом режиме требуются меньшие управляющие напряжения, во втором режиме может быть получено более высокое быстродействие (за счет уменьшения времени релаксации). Наиболее простым вариантом амплитудно-фазового управления является гашение ДР путем подключения выбранных электродов строки и столбца к нулевому потенциалу (заземление) при подключении всех остальных электродов к переменному потенциалу выше порога ДР. Переменный потенциал создается обычно приложением к электродам парафазных потенциалов, получаемых с прямого и инверсного выходов тактируемого триггера. В связи с этим к невыбранным элементам заземленных строки и столбца прикладываются пульсирующие потенциалы уровня 0,5 исходного, которые, во-первых, ухудшают долговечность ЖК, а во-вторых, могут приводить к ослаблению или исчезновению ДР (кросс-эффект). Для устранения указанного недостатка предложена конструкция матричного ЖКИ, в котором между пластинами с прозрачными электродами строк и столбцов устанавливают промежуточную пластину со сплошными прозрачными электродами на обеих сторонах, причем ЖК помещают в зазорах между промежуточной и основными пластинами, а электроды на обеих сторонах промежуточной пластины заземляют [А. с. 421971, СССР]. При этом потенциалы всех элементов выбранных строки и столбца равны нулю, т. е. в каждом из слоев ЖК прозрачен вдоль заземленных строки или столбца, однако, поскольку во втором слое имеет место ДР по всей площади, кроме избранного столбца или строки соответственно, на просвет прозрачна только зона их пересечения. В конструктивном отношении проще реализовать вариант двухчастотного управления [А. с. 427354, СССР]. В этом случае отсутствует промежуточная пластина, а дополнительные прозрачные электроды наносят с внешних сторон основных пластин, которые соединяют между собой и подключают к генератору высокой частоты. Схема управления показана на рис. 37. На выбранном элементе сигнал ВЧ мал из-за шунтирования малым сопротивлением генератора НЧ. На невыбранных элементах сигнал ВЧ прикладывается несимметрично и вызывает гашение ДР; на остальных элементах сигналов НЧ нет, а сигналы ВЧ прикладываются симметрично, т. е. ДР

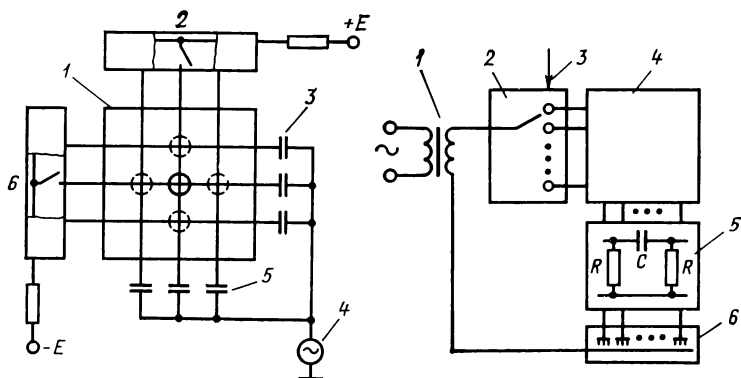


Рис. 37. Схема двухчастотного управления матричным жидкокристаллическим индикатором:

1 — матричная панель; 2, 6 — коммутаторы; 3 — емкости строк; 5 — емкости столбцов относительно внешних электродов; 4 — генератор высокой частоты; $\pm E$ — потенциалы источника низкой частоты; сплошным кружком показан выбранный элемент, штриховыми — невыбранные элементы строки и столбца

Рис. 38. Схема управления жидкокристаллическим индикатором с помощью дешифраторной матрицы:

1 — трансформатор (Тр); 2 — коммутатор (К); 3 — управление; 4 — дешифраторная матрица (ДМ); 5 — блок разделительных элементов (БРЭ); 6 — индикатор (ЖКИ)

отсутствует. В результате ДР имеет место под воздействием НЧ сигнала только в выбранном элементе.

В управлении мозаичными, в частности, сегментными, ЖКИ проблема «кросс-эффекта» отпадает, и потому основные усилия схемотехников были направлены на создание экономичных специализированных схем управления для отдельных приложений (часы, калькуляторы и т. п.).

В настоящее время предложен ЖКИ (рис. 35, б) с электродами «пальцы в пальцы» [Пат. 3883227, США], расположенными на одной стороне подложки, и сплошным прозрачным электродом на внутренней стороне покровного стекла, в котором схема управления работает в два такта: в первом такте между электродами подложки прикладывается напряжение, вызывающее ориентацию ЖК; во втором такте указанные электроды замыкаются между собой, и между ними и прозрачным электродом прикладывается рабочее напряжение. Благодаря этому за счет усложнения схемы управления снижаются требования к качеству ориентации ЖК поверхностью подложки и покровного стекла.

Кроме того, предложена схема (рис. 38) управления ЖКИ на переменном токе с использованием коммутируемой диодной дешифраторной матрицы и блока пассивных разделительных элементов, отделяющих постоянную составляющую сигнала (Пат. 3820108, США). Отличительной особенностью схемы является простота получения управляющих сигналов переменного тока и гибкость варьирования количеством индицируемых знаков (оно определяется чис-

лом позиций коммутатора), а также количеством элементов в каждом знаке (определяется дешифраторной матрицей). В связи с этим приведенную схему можно с равным успехом использовать для управления как знаковыми (например, цифровыми), так и аналоговыми (шкальными) индикаторами, не нуждаясь при этом (в отличие от схем, питающихся от источников постоянного тока) в использовании двунаправленных ключей. Кроме того, в данной схеме в качестве элемента, управляющего коммутатором, можно использовать (для индикации десятичных цифр) типовую схему двоично-десятичного дешифратора: при этом дешифраторная матрица выполняет функцию дешифратора 10/7 или 10/9 (в зависимости от количества сегментов в синтезируемых цифрах).

Как и в матричных ЖКИ, в сегментных ЖКИ основными методами управления являются амплитудно-фазовый и двухчастотный. В первом ЖК возбуждается парафазными и гасится синфазными сигналами, подаваемыми на электроды; во втором возбуждается НЧ и гасится ВЧ сигналами. Основными режимами управления многоразрядными сегментными ЖКИ являются статический, или параллельный, и динамический, или последовательный. В параллельном режиме, когда все знаки многоместного табло возбуждаются с выходов соответствующих регистров и дешифраторов одновременно, быстродействие ЖК, как правило, некритично, и используется амплитудно-фазовое управление. При последовательном, или мультиплексном управлении, когда один дешифратор подключается поочередно к выходам регистров различных разрядов, а его выходы, кроме этого, соединены со всеми одноименными сегментами индицируемых знаков и, следовательно, невыбранные знаки должны гаситься, быстродействие ЖК становится критичным. При этом для гашения необходимо использовать ВЧ сигнал, т. е. двухчастотное управление. Обеспечивая выигрыш в оборудовании (сокращение межсоединений, использование общего дешифратора и общего блока формирователей для всех знаков), мультиплексный режим вместе с тем снижает контрастность в n раз, где n — число знаков, поскольку каждый знак возбужден в течение $1/n$ части цикла, а в остальное время погашен. Мультиплексный режим работы ЖКИ реализуется фактически комбинированием амплитудно-фазового и двухчастотного методов управления, поскольку выборка сегментов в знаке выполняется по фазовому, а выборка самого знака — по частотному признакам. На рис. 39, а, б показаны соответственно схемы амплитудно-фазового управления сегментами одного знака и мультиплексного управления набором n знаков [59].

В настоящее время в измерительной технике ЖКИ получили наибольшее распространение в цифровых часах и цифровых мультиметрах [27, 103]. Применительно к цифровым мультиметрам отметим, что благодаря использованию ЖКИ и МОП ИС в них обеспечивается автономное питание с малой потребляемой мощностью, причем в лучших моделях, использующих аналоговую и цифровую БИС, ресурс питания от батарей достигает 2 тыс. часов.

Вопросы системного применения ЖКИ пока мало исследованы. В работе [77] рассмотрены возможности применения ЖКИ в качестве автономных периферийных устройств (устройств вывода) в цифровых информационно-измерительных системах (ИИС). В связи с необходимостью отображения информации о канале измерительной системы, реальном времени и значении измеряемой вели-

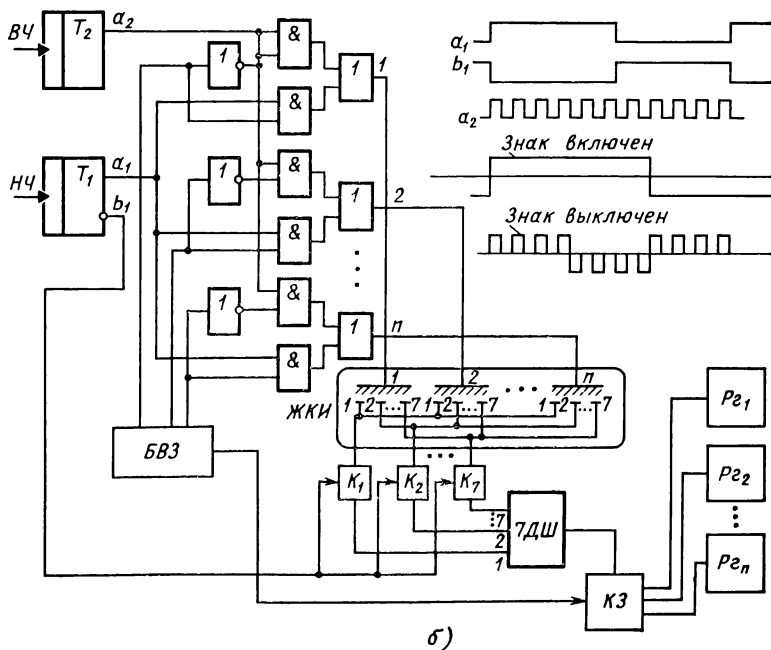
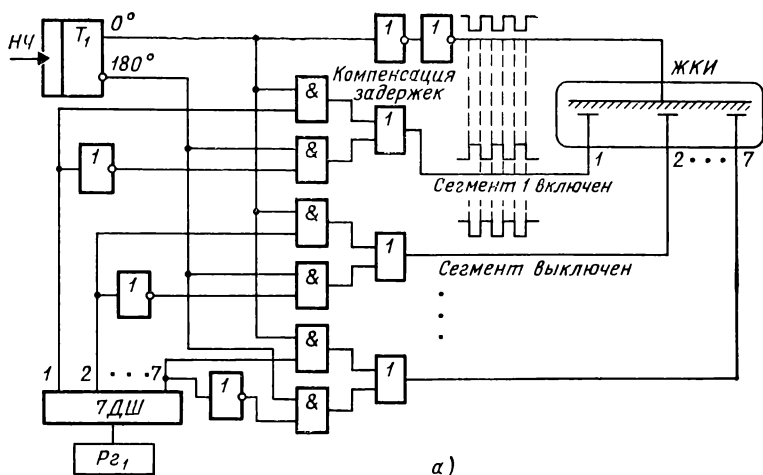
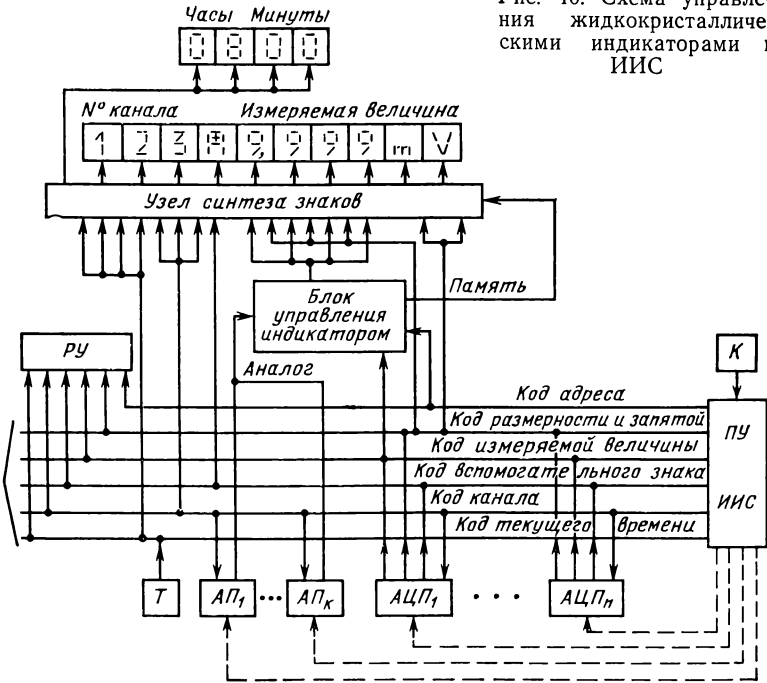


Рис. 39. Схема мультиплексного управления жидкокристаллическими индикаторами:

а — с амплитудно-фазовым управлением выборкой сегментов; б — с двух-частотным управлением выборкой знаков; 7ДШ — семиричный дешифратор; P_{21}, \dots, P_{2n} — регистры индицируемых кодов; T_1, T_2 — триггеры, тактируемые соответственно НЧ- и ВЧ-сигналами; КЗ — коммутатор знаков; БВЗ — блок выбора знаков; K_1, K_2, \dots, K_7 — коммутаторы сегментов

Рис. 40. Схема управления жидкокристаллическими индикаторами в ИИС



чины (с учетом ее полярности, размерности и положения запятой), а также с учетом необходимости сбора индицируемых данных через общую магистраль с использованием стандартных интерфейсных кодов, составлена общая схема управления ЖКИ в ИИС (рис. 40). Здесь входящий в индикаторное устройство узел синтеза знаков подключен к общей магистрали, связанной с программным устройством (ПУ) ИИС. К той же магистрали подключены (как периферийные устройства) таймер (T), аналоговые преобразователи ($АП_1, \dots, АП_k$), аналого-цифровые преобразователи ($АЦП_1, \dots, АЦП_n$), регистрирующее устройство (РУ). Коммутация каналов выполняется ПУ автоматически или по вызову оператора через клавиатуру K . Блок управления индикатором преобразует аналоговые выходные величины $АП_1, \dots, АП_k$ или коды магистрали в коды индикатора и при необходимости вырабатывает команду на запоминание. Табло отсчета номера канала, вспомогательного знака (+, —, переполнение), измеряемой величины и размерности совмещены, а табло таймера (реальное время) вынесено отдельно. При такой организации вывода индикаторное устройство может быть вынесено на пульт оператора, удаленный на необходимое расстояние от контролируемого объекта; для экономии аппаратуры (информационных и адресных шин) в магистрали используют фазоимпульсные коды. Если какие-либо из измеритель-

ных узлов $АП_1, \dots, АП_k; АЦП_1, \dots, АЦП_n$ не приспособлены для программного управления через магистраль, то обращение к ним осуществляется по индивидуальным адресным шинам, которые показаны на рис. 40 штриховыми линиями. Аналоговые выходные сигналы $АП_1, \dots, АП_k$ поступают на вход блока управления ЖКИ также по отдельной шине (вне общей магистрали), хотя для частотно-временных аналоговых сигналов возможно использование субмагистрали, входящей в общую магистраль и связанной с ПУ. В принципе такая организация вывода пригодна не только для ЖКИ, но и для любых других индикаторов, однако использование ЖКИ с К—МОП управляющими схемами позволяет выполнять выносные индикаторные пульты с памятью и с автономным питанием, что особенно важно для телеизмерительных систем, а также систем, установленных на необслуживаемых или ограниченно обслуживаемых объектах; кроме того, буферный режим питания необходим во всех случаях, когда информация об измеряемой величине непрерывно накапливается во времени (радиация, энергия, расход и т. п.), а питающая сеть подвержена значительным колебаниям вплоть до полного отключения; в таких случаях регистры памяти узла синтеза знаков и табло ЖКИ подключаются к маломощному буферному источнику питания; возможно также использование ЖКИ с памятью.

Требования приборного и системного применения обусловили широкую гамму компоновочных решений ЖКИ. На основе изучения и обобщения эксплуатационных требований разработан ряд ЖК индикаторных панелей, удовлетворяющий практически всем предъявляемым требованиям по размерам и начертанию знаков, количеству знакомест при наборе табло из отдельных модулей, номенклатуре знаков в совмещенных или комбинированных табло [34]. На рис. 41, а, б показаны отдельные знакоместа одного цифрового разряда с 7-сегментной конфигурацией и одного вспомогательного разряда (знаки «+», «—», «~», переполнение «П», «1» старшего разряда); на рис. 42, а, б приведены отдельные знакоместа одного цифрового разряда с различными 9-сегментными конфигурациями; на рис. 43 изображено буквенное знакоместо (для набора размерностей измеряемых величин и масштабных коэффициентов) с 20-сегментной конфигурацией; на рис. 44, а, б — двухместные знакоместа с наборами одного вспомогательного и одного цифрового или двух цифровых разрядов; на рис. 45 — борная индикаторная панель; на рис. 46 — специализированная 4,5-разрядная панель вольтметра; на рис. 47 — универсальная 5,5-разрядная индикаторная панель мультиметра с сегментной конфигурацией цифр и цельной конфигурацией букв. Алфавиты цифровых и буквенных знаков для указанных сегментных конфигураций, а также схемы управления ими рассматриваются отдельно, поскольку они неспецифичны для ЖКИ и могут использоваться для индикаторов других разновидностей. Здесь же отметим, что буквенная панель (см. рис. 43) при достаточно широком наборе индицируемых знаков (практически все величины, встречающиеся в электроизмерительной технике) значительно экономнее по управлению, чем стандартные сегментные конфигурации электролюминесцентных панелей, и обеспечивает более удобное начертание знаков. Действительно, при наборе комбинаций знаков вида «kHz» необходимо использовать два 18-сегментных знакоместа стандартной конфигурации с общим количеством 36 сегментов вместо 20

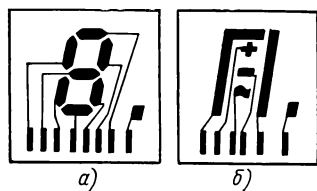


Рис. 41. Одноразрядные ЖКИ:

а — цифровой разряд; *б* — вспомогательный разряд

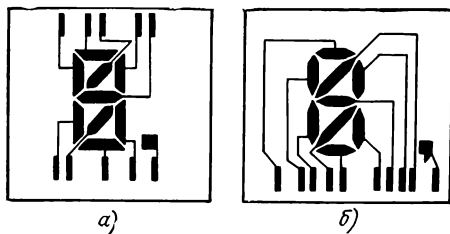


Рис. 42. Одноразрядные ЖКИ с 9-сегментной конфигурацией:

а — упрощенной; *б* — усложненной

Рис. 43. Буквенный 20-сегментный ЖКИ

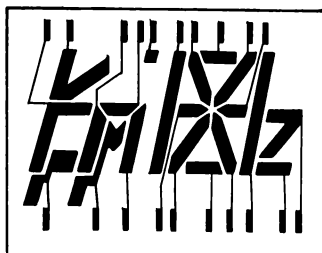


Рис. 44. Двухразрядные ЖКИ:

а — с набором одного вспомогательного и одного цифрового разрядов; *б* — с набором двух цифровых разрядов

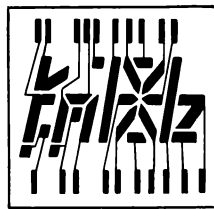
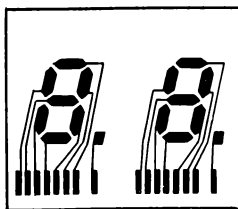
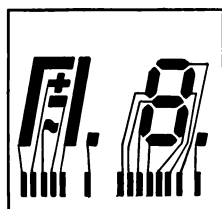
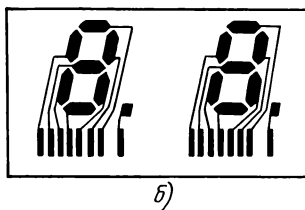
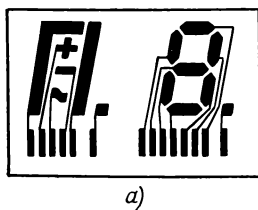


Рис. 45. Наборная индикаторная панель

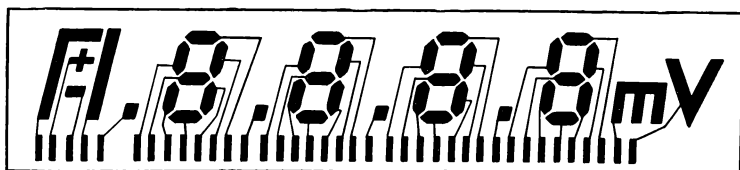


Рис. 46. Специализированная 4,5-разрядная панель вольтметра

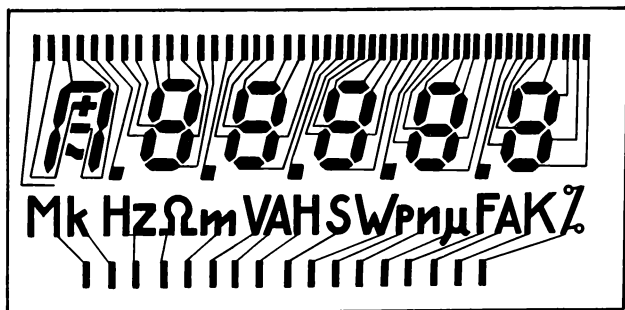


Рис. 47. Универсальная 5,5-разрядная панель мультиметра

сегментов в конфигурации, приведенной на рис. 43. Универсальная панель рис. 47 дает наиболее экономную адресацию буквенных знаков при удобном их начертании. Что же касается 9-сегментных конфигураций (см. рис. 42), то их можно использовать для создания высоконадежных индикаторов, в которых обнаруживаются одиночные отказы, вызванные добавлением или выпадением отдельных сегментов, а также устраняется ложное считывание данных.

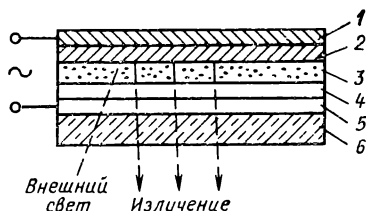
4. ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Технические приложения электролюминесценции достаточно широко известны. До недавнего времени считалось, что ее возможности в технике электролюминесцентных индикаторов (ЭЛИ) почти полностью исчерпаны. Однако в последнее время появились новые перспективные приборы этого класса.

К числу перспективных ЭЛИ можно отнести приборы с сублимированными поликристаллическими пленками ZnS, Mn, Cu, осажденными на стеклянную подложку методами вакуумного испарения или катодного распыления [15]; в них привлекает возможность снижения управляющих напряжений, а также возможность

Рис. 48. Пленочный электролюминесцентный индикатор переменного тока типа LEF:

1 — непрозрачный электрод; 2 — поглощающий слой; 3 — излучающий слой (прозрачная пленка люминофора $\text{ZnS} : \text{Mn}$); 4 — прозрачная пленка диэлектрика; 5 — прозрачный электрод; 6 — стеклянная подложка



возбуждения однополярными сигналами (постоянного тока или импульсными) с амплитудой порядка 20—40 В. Однако пока не удается получить срок службы таких ЭЛИ более нескольких сотен часов. В лабораторных испытаниях были получены интервалы полупада яркости пленочных ЭЛИ при импульсном питании порядка 2 тыс. час [58]. Более существенные результаты получены в пленочных ЭЛИ переменного тока [105]. Здесь проводимость пленок и, следовательно, содержание меди (которая в основном и снижает долговечность) могут быть значительно уменьшены в связи с емкостным характером возбуждения и могут быть нанесены дополнительные диэлектрические слои. Подобная структура ЭЛИ, разработанная фирмой Sigmatron, Inc. и названная светоизлучающей пленкой (LEF), показана на рис. 48. Поглощающий слой отражает только 0,25 падающего света, так что внешняя засветка практически не влияет на яркость индикатора. Цветовой контраст (желтая марганцевая линия на черном фоне) также достаточно велик, так что даже при сравнительно низкой яркости излучения (12 нт) он составляет 30:1. Обычная для порошковых ЭЛИ яркость 30 нт в типичных условиях освещения является для LEF даже излишней. Испытания на надежность показали, что среднее время наработки на отказ составляет 23 тыс. часов при средней яркости 35 нт, причем отказы связаны в основном с пробоем, а не со снижением яркости. ЭЛИ типа LEF возбуждаются импульсами амплитудой 600—650 В с большой скважностью и частотой порядка 30 кГц. Последнее оказывается возможным благодаря относительно длительной релаксации (послесвечению) марганца. В свою очередь, большая скважность импульсов удобна для последовательной матричной адресации элементов ЭЛИ. Высокие напряжения получают путем настройки в резонанс на частоту возбуждения обмотки повышающего трансформатора и емкости индивидуальной ячейки. В связи с такой избирательностью адресации не требуются специальные меры по устранению кросс-эффекта. Перспективно гибридное исполнение матричных ЭЛИ типа LEF с высоковольтными транзисторными ключами.

К числу перспективных относят также некоторые ЭЛИ на порошковых люминофорах, работающих на постоянном токе. Конструкций этих ЭЛИ практически не отличаются от конструкций порошковых ЭЛИ, работающих на переменном токе, а также конструкций пленочных ЭЛИ, управляемых постоянным током, так что их преимущества достигнуты главным образом технологическими средствами. В частности, в отличие от пленочных ЭЛИ улучшающая проводимость люминофора медь распределена не равномерно по всему слою, а на поверхности гранул, причем в процессе так называемой формовки она диффундирует внутрь гранул, увеличивая

их объемную проводимость и выход электролюминесценции. Именно этими обстоятельствами определяется повышенная (по сравнению с пленочными ЭЛИ) надежность и обеспечивается режим проводимости, необходимый для работы на постоянном или пульсирующем токе. Старение, т. е. снижение яркости таких ЭЛИ (здесь и далее будем называть их формованными), тем интенсивнее, чем ниже рабочее напряжение и выше рабочий ток, т. е. при равных мощностях следует стремиться к увеличению рабочего напряжения. В реальных формованных ЭЛИ при рабочих напряжениях 100 В начальная яркость в 340 нт уменьшалась до 170 нт в течение нескольких тысяч часов непрерывной работы (на постоянном токе) [106]. Еще более высокая стабильность яркостных характеристик формованных ЭЛИ получена в импульсном режиме, при возбуждении их короткими (длительностью в несколько мкс) импульсами с амплитудой, превышающей напряжение формовки (170 В и 100 В соответственно): практически заметного изменения яркости не происходит в течение более 2 тыс. часов. Скажность импульсов может быть достаточно большой, что открывает возможность эффективного матричного управления и уменьшает средний ток через элементы ЭЛИ до 1 мА/см². Фирмой Phosphor Products Co Ltd (Англия) по указанной технологии изготавливаются четырехзначные цифровые табло и готовятся к освоению многоэлементные экраны. Многоэлементные экраны (телевизионные дисплеи) на формованных ЭЛИ разрабатывают также в Японии. Благодаря формовке матричные панели этого типа отличаются большой нелинейностью вольт-яркостной характеристики, и в них значительно ослаблено влияние кросс-эффекта; кроме того, за счет увеличения мощности в импульсе повышена яркость излучения. В результате контрастность матричных экранов на формованных ЭЛИ значительно выше, чем в аналогичных по количеству элементов матричных панелях на порошковых ЭЛИ переменного тока (10—20 вместо 3—5).

Из сказанного ясно, что в перспективных ЭЛИ (LEF переменного тока; порошковые ЭЛИ, сформованные на постоянном токе) вопросы выбора схем управления и, в частности, устранения кросс-эффекта при матричной адресации менее критичны, чем в традиционных порошковых ЭЛИ переменного тока. В отношении уменьшения паразитных емкостей и перекрестных связей в матричных ЭЛИ представляет интерес управление ими с помощью оптронов, обеспечивающих гальваническое разделение цепей. В управляющих цепях с оптронами могут быть реализованы и другие полезные функции; скажем, дополнительная оптическая связь ЭЛИ с фоторезистором используется для автоматического поддержания стабильной яркости свечения при изменении характеристик ЭЛИ во времени [А. с. 341027, СССР]; кроме того, благодаря оптронным цепям управления можно реализовать режим преобразования изображений.

Катодолуминесцентные индикаторы (КЛИ), выполненные в виде вакуумных знаковых ламп с планарным расположением сегментов, широко известны и выпускаются промышленностью.

Для применения в цифровых измерительных приборах и системах наиболее подходящими являются КЛИ типов ИВ-4, ИВ-6. К сожалению, конструктивные, электрические, эксплуатационные характеристики указанных КЛИ существенно различны: для ИВ-4 напряжение накала составляет 2,6 В; для ИВ-6 — 1,2 В; соответст-

венно, ток анода — 2,5 и 1,8 мА; размер знака — 18×12 и $11,2 \times 6,9$ мм²; яркость — 500 и 300 нт; долговечность — 1000 и 3000 ч. Кроме того, для управления 7-сегментными индикаторами (ИВ-6) имеются интегральные схемы К161ПР1, К161ПР2, а для буквенных знаков (ИВ-4) специализированные микросхемы отсутствуют. Отсюда ясно, что совместное использование КЛИ типов ИВ-4, ИВ-6 в универсальных цифро-буквенных индикаторах весьма затруднено, т. е. основная область использования КЛИ (ИВ-6) — цифровые часы, калькуляторы, счетчики импульсов, а также простые мультиметры (тестеры), на табло которых отображается только цифровая информация. Психофизиологические характеристики КЛИ для такого рода использования (яркость, контрастность, спектр излучения) вполне удовлетворительны; потребляемая мощность приемлема, но оставляет желать лучшего. Неудобно также использование двух источников питания (накального, анодного). В связи с этим следует полагать, что КЛИ подобного типа найдут применение преимущественно в устройствах с сетевым питанием. Расширение области применения КЛИ возможно при условии унификации характеристик цифровых и буквенных знаков, увеличения долговечности, снижения потребляемой мощности. КЛИ с аналогичными характеристиками выпускают и зарубежные фирмы (например, фирма Tung — Sol, США) — они известны под названием флюоресцентных ламп или диджитронов. Сходны и области преимущественного применения этих приборов: японские фирмы широко используют их в настольных калькуляторах, причем в этой области наиболее массового применения КЛИ ежегодная потребность составляет несколько млн. шт. Наряду с одностепенными, выпускаются многостепенные КЛИ, например, фирма Sharp (Япония) выпустила 8-, 10- и 12-разрядные КЛИ в одном корпусе, имеющие при аналогичных с одностепенными КЛИ электрических параметрах яркость порядка 80—100 нт.

В последнее время предпринимаются попытки усовершенствования КЛИ в отношении самого ненадежного узла — накаливаемого катода. Так, предложен КЛИ планарной конструкции с пленочным ненакаливаемым катодом [Пат. 46—1925, Япония]. Исследования аналогичной конструкции КЛИ ведутся и в нашей стране [70]. Здесь ненакаливаемый катод выполнен на основе диспергированной пленки металла с нанесенным поверх нее слоем окиси бария, служащим для уменьшения работы выхода холодной эмиссии. Подобно объемному планарный КЛИ нуждается в вакуумировании. По-видимому, планарный КЛИ с холодным катодом более удобен для создания многостепенных панелей. Достоверное суждение о достоинствах таких приборов и возможных областях их применения можно будет составить только после завершения стадии лабораторных исследований и организации их промышленного производства.

5. НАКАЛЬНЫЕ И СВЕТОДИОДНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Индикаторы с подсветкой ряда пластин лампочками накаливания были, по-видимому, первыми цифровыми индикаторами. Они до сих пор находят применение в некоторых цифровых приборах, а также на щитах и мнемосхемах. Если применение таких пакетных индикаторов в цифровых приборах уже может рассматри-

ваться как анахронизм, то создание накалильных индикаторов (НИ) большого размера для щитов и мнемосхем является вполне оправданным. Общеизвестно применение мозаичных панелей подобного типа с отображением цифровых и буквенных знаков, рекламных сообщений, силуэтных рисунков большого формата. Известны сегментные НИ, выполненные на подсвечиваемых в торец световодных пластинах и на подсвечиваемых флуоресцирующих стеклах. В конструкции первого вида [60] используют световоды из оргстекла, покрытого отражающей или рассеивающей пленкой, и лампочки накаливания $KM24 \times 105$; габаритные размеры индикатора $124 \times 108 \times 60$ мм³, потребляемая мощность — 16 Вт. В конструкции второго вида [89] используют стекла из полиметил-метакрилата толщиной 3,6 и 12 мм и лампочки CM-39; здесь получены размеры цифр (по высоте) 118, 275 и 450 мм при яркости излучения на торцах пластин 20—30 нт; цвет излучения — красный или желтый, потребляемая мощность — от 6 до 42 Вт.

Известны разновидности НИ, в которых изображения синтезируемых знаков образуются выходными торцами световодов, входные торцы которых подсвечивают лампочками накаливания. Предложен цифровой НИ [Пат. 3631478, США], каждый сегмент которого представляет собой цепочку из 4-х световодов круглого сечения, сведенных к одному излучателю; в другом НИ [Пат. 49—44800, Япония] для каждого сегмента используют один волоконный световод, выходной торец которого уложен в форме сегмента.

Если все приведенные выше модификации НИ можно отнести либо к устаревшим, либо к экзотическим, то общеизвестные вакуумные индикаторы накаливания («нумитроны») можно рассматривать как современные приборы. Нумитроны с 7-сегментной конфигурацией нитей накаливания выпускает фирма RCA, а ударопрочные НИ этого типа — фирма Pinlites (США). В нумитронах разработчиков привлекает высокая яркость и широкий спектр излучения (что означает возможность выбора любых светофильтров), низкие управляющие напряжения, широкий диапазон рабочих температур ($-60 \div +85^\circ \text{C}$), высокая надежность (в режиме недокала). К недостаткам этого типа индикаторов можно отнести низкую перегрузочную способность (перегорание нитей накала) и значительную потребляемую мощность (порядка 1 Вт/знак).

Отечественной промышленностью освоен ряд вакуумных НИ, среди которых отметим модели цифровых НИ П175, П179 (7-сегментная конфигурация) и П-177 (9-сегментная конфигурация). Все модели имеют яркость 15—20 тыс. нт и долговечность 10 тыс. часов. Применение вакуумных НИ могло бы быть еще более широким, если бы существовала модель НИ с буквенным отображением, унифицированная по электрическим параметрам и размерам с моделями цифровых НИ.

В принципе, возможны усовершенствования вакуумных НИ с использованием планарной технологии или микропроволочных элементов накаливания, однако эти возможности пока практически не реализованы.

Светодиодные индикаторы (СДИ), в которых применяют инжекционную люминесценцию в полупроводниках, отличаются от вакуумных НИ по физическому эффекту (всякая люминесценция, по определению, есть избыток над тепловым излучением) и вместе с тем сходны с ними по ряду эксплуатационных признаков:

используют низкие напряжения (единицы В) и большие токи (десятки мА), имеют широкий температурный диапазон, высокую яркость и большой срок службы. В остальном они различны: СДИ имеют значительно более высокое быстродействие, не нуждаются в вакуумировании, имеют естественное миниатюрное исполнение и легко интегрируются в многоэлементные структуры, обеспечивают узкополосное излучение избранного цвета (красного, желтого, зеленого); к тому же СДИ имеют значительные неиспользованные резервы снижения потребляемой мощности. Все эти уникальные свойства СДИ обеспечивают им особое положение в технике индикации и широкое применение как в настоящее время, так и в обозримом будущем [55]. Что касается конструктивных решений, то в индикаторах малого размера практикуют использование нескольких (2—4) малых кристаллов на один излучающий сегмент. В СДИ среднего размера используют один излучающий кристалл большей величины и оптические рефлекторные элементы. Помимо рефлекторов, для экономии материалов в СДИ используют увеличительные линзы, в том числе линзы цилиндрической формы для получения изображения сегментов, оптически увеличивающие световоды, световоды с диффузорами (линзами Френеля) и др.

В практических разработках СДИ фирм Hewlett Packard и Monsanto (США) благодаря различным конструктивным и технологическим усовершенствованиям за последние годы получено увеличение размеров знака в 2—3 раза и яркости излучения в 4—5 раз (соответственно уменьшение потребляемой мощности при той же яркости). Среди последних достижений в области СДИ с зеленым свечением можно отметить СДИ из GaP фирмы Toshiba (Япония), полученные жидкостной эпитаксией, с размерами знака более 4 мм, яркостью 500 нт при токе 1,5 мА и контрастностью 200, с практически линейной зависимостью яркости от тока возбуждения, что удобно для мультиплексирования при импульсном возбуждении СДИ. Пока СДИ зеленого цвета продаются по ценам, вдвое превышающим цены на красные СДИ, предполагается снижение цен до 120—130% стоимости красных СДИ. Вообще политика фирменных цен в этой области является в значительной мере следствием конъюнктуры, а не технологических ограничений.

Другим эффективным методом выбора цвета излучения СДИ является использование GaAs и GaAsP — диодов с люминофорным покрытием: такого рода СДИ с люминофором $\text{NaYF}_4:\text{Yb}$, Er выпускает фирма Hitachi (Япония): в зеленой области эти СДИ имеют эффективность 0,02—0,03% и яркость 850 нт при токе 50 мА, в красной области — 0,25% и яркость 1250 нт при токе 30 мА соответственно. К сожалению, срок службы люминофора — покрытие составляет 3 тыс. час.

Отечественной промышленностью в настоящее время также освоен ряд моделей СДИ—АЛ—304 с малым размером цифры красного цвета (яркость 200—350 нт при токе 5—10 мА/сегмент) и зеленого цвета (яркость 60 нт); АЛ305 с увеличенным размером цифры ($h=6,9$ мм) красного цвета (яркость 200—350 нт при 20 мА/сегмент) и зеленого цвета (яркость 60—120 нт); Б120 — матрица 7×5 СД размером $6,4 \times 8,9$ мм² яркостью 50—350 нт; Б116 и Б153 — 4-значные табло с яркостью 80—120 нт при потребляемой мощности 80 мВт/разряд и др.

Схемы управления СДИ не представляют значительных трудностей, так как, во-первых, СДИ в отличие от ряда других индика-

торных устройств (например, ЖКИ) имеют резко выраженный пороговый эффект, а, во-вторых, они обладают и выпрямительными свойствами; наконец, СДИ являются быстродействующими устройствами и эффективно работают при импульсном возбуждении. Поэтому применительно к СДИ не возникает сколько-нибудь существенных затруднений в организации различных режимов управления: статического, динамического, мозаичного, матричного. В качественном отношении схемы динамического управления СДИ сходны с ранее разработанными схемами динамического управления газоразрядными индикаторами, однако в количественном отношении они значительно более эффективны, так как в режиме импульсного возбуждения яркость излучения СДИ может быть в десятки раз увеличена по сравнению с режимом непрерывного возбуждения. Это означает возможность последовательной адресации знаков в многоразрядных цифровых табло, а также последовательного сканирования СД в излучающих матрицах с относительно небольшим количеством элементов (десятки шт.); при дальнейшем увеличении количества сканируемых элементов необходимо использовать СД с памятью.

Рассмотрим схему динамического управления СДИ [А. с. 463111, СССР] (рис. 49).

В соответствии с рис. 31 СДИ (рис. 49) следует отнести к комбинированным структурам вида $I + ЭЗ + ЭМ$, поскольку в них используется электронная модуляция и мультипликация светового потока тока. Здесь $СР_1 - СР_n$ — счетные регистры (декады с выходами в коде 1—2—4—8); $БСС_1 - БСС_n$ — блоки схем совпадения (логическое «И»); $ЛСР_1 - ЛСР_4$ — логические схемы равнозначности (логическое «ИЛИ»); $ДШ\ 2/7$ — двоично-семиричный дешифратор; $ГКИ$ — генератор коммутирующих импульсов (генератор констант); $СД_1 - СД_7$ — светодиоды (соответственно числу сегментов синтезируемых знаков); $СМ$ — световодный мультипликатор с входными торцами $С_1 - С_7$, связанными с одноименными светодиодами, и выходными торцами, выведенными на индикаторное табло $ИТ$; M_1, \dots, M_n — модуляторы (световые клапаны), избирательно открывающие соответствующие знакоместа $ИТ$ для индикации и регистрации. Информация (цифровая, буквенная) подается с регистров $СР_1, \dots, СР_n$ на входы $БСС_1, \dots, БСС_n$, а на другие входы с ГКИ поступают импульсы опроса. Частота импульсов опроса, как обычно в схемах динамической индикации, согласована с инерционностью восприятия при визуальном считывании (стробоскопический эффект) или с быстродействием регистратора. Выбранный код N_i с $БСС_i$ поступает через $ЛСР_1 - ЛСР_4$ на $ДШ\ 2/7$, который обеспечивает избирательное возбуждение светодиодов. Световой поток по световодам $СМ$ поступает на соответствующие сегменты всех знакомест $ИТ$. Поскольку в данный момент импульсом с выхода ГКИ открыт только один модулятор M_i , знак, соответствующий коду N_i , воспроизводится на i -м знакоместе. Совокупность светодиодов $СД_1 - СД_7$ может быть заменена одним лазерным диодом и управляемым с выхода $ДШ\ 2/7$ — 7-позиционным дискретным дефлектором. Таким образом, в схеме (см. рис. 49), помимо обычного для структур с динамическим кодированием сокращения аппаратуры снижается и число соединений. При этом яркость излучения $СД_1 - СД_7$ повышается примерно в n раз (не считая потерь света в световодах и модуляторах), где n — число знаков; экономическая эффективность определяется соотношением стоимости

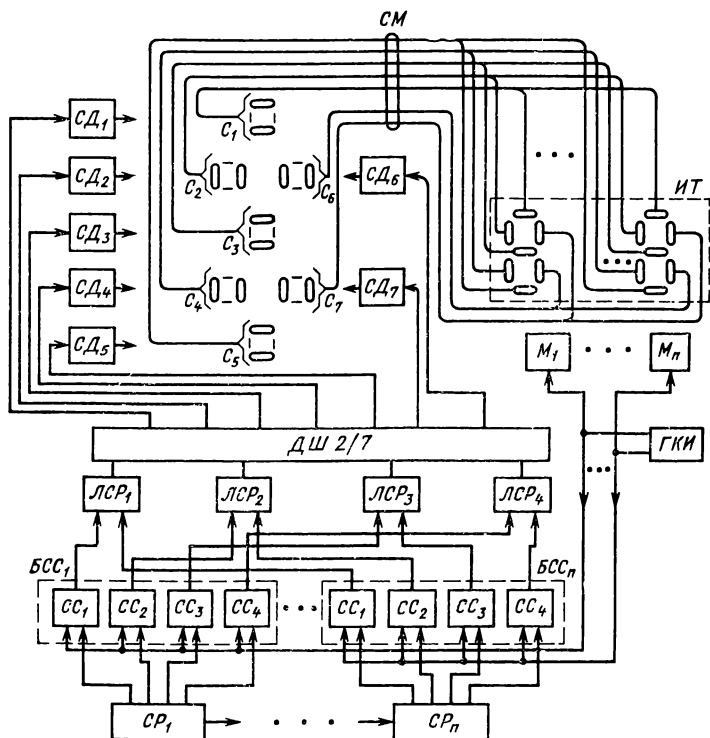


Рис. 49. Светодиодный индикатор с динамическим управлением и световодным мультипликатором

$(n-1)$ 7-сегментных СДИ и стоимости одного СМ и n модуляторов M_1, \dots, M_n . В принципе материалы, используемые для изготовления СМ и M_1, \dots, M_n , значительно дешевле, чем материалы, применяемые для изготовления светодиодных или лазерных излучателей, так что при определенных условиях реализация приведенной структуры может быть экономически выгодной.

Применение СДИ в цифровых измерительных приборах и устройствах стало уже настолько привычным, что через некоторое время легче будет назвать устройство, в котором СДИ не применяется, чем устройство, в котором СДИ использован по своему прямому назначению. И все же областями наиболее массового применения СДИ остаются цифровые часы и переносные цифровые мультиметры (тестеры).

Пока непрерывная индикация на СДИ в цифровых наручных часах неосуществима и практикуется индикация по вызову (нажатием кнопки); наряду с этим предложены различные варианты автоматического включения и выключения цифровых наручных часов (например, при поднимании и опускании руки [А. с. 423144,

СССР]), а также автоматической регулировки яркости излучения СДИ в зависимости от внешней освещенности, контролируемой фоторезистором [Пат. 3839856, США].

Среди многочисленных моделей приборов, использующих СДИ, отметим мультиметр фирмы Keithley Instr. с выносной индикаторной головкой на СДИ [102], портативный тестер-пробник фирмы Hewlett Packard [73] и др. Приборы имеют батарейное питание и малое потребление тока — порядка 20—40 мА, что обеспечивает срок службы от 100 до 300 ч.

Подобные приложения, несомненно, резко возрастут при дальнейшем снижении потребления энергии в СДИ. Кроме того, СДИ пока не имеют конкурентов среди других индикаторных устройств по долговечности, что определяет перспективность их использования в аппаратуре специального назначения, космической и медицинской аппаратуре, а также аппаратуре для геофизических и океанологических исследований.

6. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИНДИКАТОРЫ

На смену накаливаемым и электролюминесцентным пришли газоразрядные индикаторы (ГРИ), которые в настоящее время получили преимущественное распространение по сравнению с СДИ и ЖКИ.

Наиболее ощутимый недостаток ГРИ пакетной конструкции заключается в необходимости считывания через сетчатый анод и в углубленном расположении катодов, уменьшающем угол обзора. Устраняя этот недостаток, приходится отказываться и от их существенных достоинств — простоты управления и совершенной формы знаков, так как единственной приемлемой альтернативой такой конструкции является планарная конструкция с синтезированием знаков сегментами. Тем не менее фирма-разработчик пакетной конструкции ламп «Никси» (Burgoughs, США) одной из первых перешла к разработке и выпуску планарной конструкции многозарядного ГРИ, получившей название «Паналекс». Эта конструкция подобно конструкциям сегментных многозарядных ЭЛИ и ЖКИ имеет заднюю пластину с набором знаков, образованных сегментами-катодами, переднюю пластину с прозрачными анодами и прокладку между ними, оставляющую полость для заполняющего газа, причем одноименные сегменты-катоды объединены между собой, что уменьшает количество внешних выводов. Последнее означает, что ГРИ такого типа заведомо рассчитаны на работу в динамическом (мультиплексном) режиме. Поскольку ГРИ являются быстродействующими приборами, единственным противопоказанием к использованию этого режима может быть снижение средней яркости излучения, что накладывает ограничение на увеличение числа разрядов. В некоторых приложениях (например, в радиотехнических измерительных приборах) мультиплексный режим может быть источником нежелательных коммутационных помех. При этом могут оказаться вредными и радиочастотные шумы газового разряда, возникающие в ГРИ при любом режиме управления. ГРИ типа «Паналекс» выпускаются в корпусах на 8 и более (до 16) разрядов. Поскольку сложность изготовления мало зависит от числа разрядов, стоимость такого ГРИ, приведенная к

одному разряду, является одной из наиболее низких — менее 1 долл. Основная область применения таких многоразрядных ГРИ — счетчики и калькуляторы.

Другая планарная конструкция многоразрядного ГРИ, получившая название «Планар Пандикон», разработана и выпускается фирмой Philips (Голландия) [21]. Ее основное отличие и преимущество по сравнению с конструкцией «Панаклекс» заключается во введении дополнительных управляющих электродов (сеток) для каждого разряда, благодаря которым к объединенным анодам прикладывается постоянно высокое ионизирующее и поддерживающее напряжение, а к сеткам — сравнительно низкое напряжение зажигания (20—25 В). Это отличие определяет возможность управления ГРИ непосредственно с выходов МОП ИС, что сокращает затраты на аппаратуру и потребляемую мощность (в среднем — 20 мВт на знак высотой 8,5 мм, т. е. меньше, чем для СДИ); 12-разрядная панель «Планар пандикон» содержит всего 22 внешних вывода: семь — для сегментов, один — для запятой, один — для общего анода, один — для общего экрана и двенадцать — для сеток. В связи с наличием памяти (поддержание разряда анодом) яркость индикатора не зависит от числа знаков.

Фирма Sony (Япония) разработала планарную конструкцию многоразрядного ГРИ под названием «Планиatron», отличающуюся от двух предыдущих расположением анодов на той же пластине, что и катоды, благодаря чему упрощается выполнение выводов ГРИ и уменьшается его толщина; 16-разрядный ГРИ типа «Планиatron» имеет габаритные размеры $178 \times 46 \times 6$ мм³ при высоте знаков 7,6 мм.

Все описанные модели планарных ГРИ являются многоразрядными и имеют малую или среднюю высоту знаков (от 5 до 10 мм). Поскольку все они работают в динамическом режиме, усложнение дешифрации знаков по сравнению с пакетной конструкцией (лампы «Никси») теряет решающее значение (один дешифратор обслуживает все разряды); кроме того, уменьшение числа выводов вполне компенсирует этот недостаток, а возможность (в модели «Планар Пандикон») уменьшения управляющих напряжений и получения эффекта памяти дает им даже определенные преимущества. Единственным преимуществом ламп «Никси» по сравнению с указанными планарными конструкциями является получение больших размеров и совершенной формы знаков, а также произвольный выбор числа знаков в индикаторе. Однако в последнее время фирма Sperry (США) выпустила планарные 7-сегментные ГРИ на 1,5; 2; 2,5 и 3 цифровых разряда с индивидуальными выводами сегментов, что обеспечивает универсальность набора знаков и выбора режима управления. Кроме того, в планарных индикаторах фирмы Sperry предусмотрено 2 размера цифр по высоте — 8,4 и 14 мм, а также устранены разрывы в местах сопряжения сегментов. Кроме того, фирма Beckman (США) разработала одnorазрядный планарный ГРИ с увеличенным размером цифры (25 мм) в корпусе размером $29 \times 21 \times 6$ мм³; потребление тока — 0,7 мА/сегмент при напряжении 160 В обеспечивает яркость ГРИ 340—1700 нт [18]. Таким образом, ГРИ пакетной конструкции утратили все свои преимущества, кроме одного — стоимости. Поэтому они должны все же уступить место ГРИ планарного типа, среди которых наиболее перспективна конструкция, сочетающая в себе достоинства ГРИ типа «Планар Пандикон» и «Планиatron», т. е. имеющая как

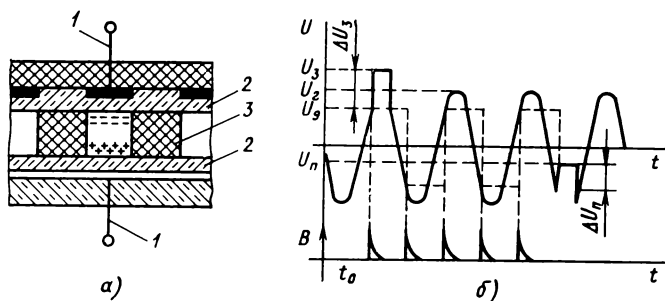


Рис. 50. Плазменный индикатор:

a — конструкция; 1 — электроды; 2 — покрытия; 3 — прокладки; *б* — временные диаграммы; U_g — амплитуда синусоидального сигнала, поданного на электроды, равная напряжению горения; U_3 — напряжение зажигания; ΔU_3 — амплитуда импульса зажигания, приложенного к ячейке; U_n — напряжение потухания разряда; U_n — амплитуда напряжения между диэлектрическими слоями (позиция 2); ΔU_n — амплитуда импульса потухания

поджигающий электрод, расположенный на одной пластине с катодами, так и поддерживающий электрод, расположенный на другой пластине. Отечественная промышленность также приступила к освоению планарных многоразрядных индикаторов.

Новым крупным шагом в развитии ГРИ является создание плазменных матричных панелей. Первая конструкция плазменного ГРИ, разработанная в Иллинойском университете, была выпущена фирмой Owens Illinois (США) в 1969 г. Она представляла собой панель 10×10 см² с 18 000 элементов и состояла из двух прозрачных пластин с нанесенными на их внутренних сторонах прозрачными электродами строк и столбцов, а также тонкими прозрачными слоями изолирующего стекла, и одной пластины-прокладки с круглыми отверстиями в местах пересечения электродов, заполненными рабочей смесью газов. Основным свойством этой и других подобных конструкций плазменных ГРИ является создание режима самоподдерживающегося разряда [22].

На рис. 50, *a* показана индивидуальная ячейка ГРИ, образованная электродами 1, их покрытиями 2 и частью прокладки 3, образующей цилиндрическую полость; на рис. 50, *б* показаны временные диаграммы напряжений U и световых импульсов B .

При подаче в момент t_0 импульса зажигания суммарное напряжение на ячейке, получающееся сложением текущего значения синусоидального поддерживающего напряжения и импульса ΔU_3 , достигает или превышает U_3 , в результате чего в ячейке возникает разряд. При этом на внутренних поверхностях P_1 , P_2 вследствие движения ионов в канале разряда накапливаются заряды со знаками, противоположными вызвавшим их потенциалам; их поле, действующее противоположно поддерживающему, после снятия импульса поджига гасит разряд в положительной полувольтной и затем, складываясь в фазе с отрицательной полувольтной поддерживающего поля, снова вызывает разряд газа вследствие превышения ($-U_3$). Далее происходит перезаряд P_1 , P_2 при измененном на-

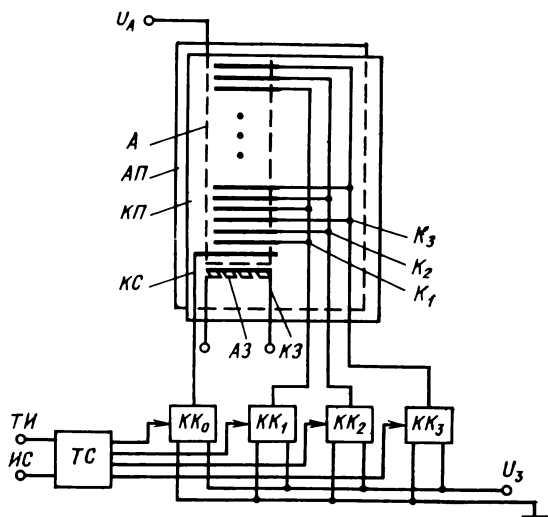


Рис. 51. Аналоговый плазменный индикатор с саморазверткой

правлении тока, и процесс циклически повторяется с удвоенной частотой поддерживающего напряжения до тех пор, пока импульс потухания, приложенный противофазно по отношению к U_r и U_d , не нарушит условия самовозбуждения. Практически U_r составляет 175 В, частота $U_r(t)$ — 50 кГц (соответственно частота $B(t)$ — 100 кГц), $\Delta U_3 = 200$ В, $\Delta U_n = 100$ В, длительность световых импульсов — порядка 1 мкс (поочередно у электродов 1, 2).

Дальнейшим усовершенствованием плазменных ГРИ было создание матричного индикатора с саморазверткой (Self — Scan фирмы Burroughs) [99]. Принцип действия панели Self — Scan поясним на примере разработанного фирмой Burroughs плазменного ГРИ с одномерным сканированием, который представляет интерес для графического отображения информации [79]. ГРИ (рис. 51) имеет катодную пластину КП с катодом запуска КЗ, катодом сброса КС и тремя группами рабочих катодов K_1 , K_2 , K_3 ; анодную пластину АП с рабочим анодом А и анодом запуска АЗ (показаны штриховыми линиями); тактирующую схему ТС; катодный ключ общего сброса KK_0 и катодные ключи KK_1 , KK_2 , KK_3 ; через U_A , U_3 обозначены анодное и запирающее напряжения; ТИ — вход тактовых импульсов; ИС — вход импульсов сброса. В полости между КП и АП, ограниченной прокладкой (на рис. 49 не показана), находится рабочий газ (смесь газов). В исходном состоянии между АЗ и КЗ горит подготовительный тлеющий разряд, создающий в области ближайшего к КЗ катода (КС) повышенную концентрацию электродов, ионов и метастабильных атомов. При подаче импульса сброса ИС триггеры ТС устанавливаются в исходное состоя-

ние или подтверждают исходное состояние, соответствующее подключению KK_1 , KK_2 , KK_3 к U_3 , а KK_0 подключает $КС$ на «землю» (общий электрод источников U_A , U_3); благодаря высокой концентрации проводящих и возбужденных частиц в области $КС$ между рабочим анодом A и $КС$ возникает пусковой газовый разряд, который создает начальную ионизацию в области ближайшего рабочего катода K_1 . Если теперь по окончании импульса сброса подать на вход $ТС$ первый тактирующий импульс, то ключ KK_0 переключит $КС$ на U_3 , а ключ KK_1 подключит K_1 на общий электрод; благодаря этому происходит разряд на K_1 , который будет поддерживаться до поступления следующего тактирующего импульса. При поступлении следующего (второго) тактирующего импульса $ТС$ переключит KK_1 на U_3 , а KK_2 — на общий электрод, вследствие чего происходит разряд на ближайший к KK_2 рабочий катод K_2 , который будет поддерживаться до поступления следующего тактового импульса. Далее процесс протекает аналогично, в результате чего разряд последовательно переносится на катод, номер которого соответствует номеру поданного на вход $ТИ$ тактового импульса; тем самым ГРИ отображает поданный на его вход число-импульсный сигнал в виде столбцовой диаграммы. Внутреннее сопротивление источника U_A выбирают таким, чтобы после разряда на очередном катоде напряжение было достаточным для поддержания разряда и создания начальной ионизации у ближайшего к нему катода и вместе с тем недостаточным для создания начальной ионизации в области более удаленного (через два межэлектродных расстояния) катода, подключенного к той же шине. В матричной плазменной панели Self—Scan сканирование происходит аналогично, с той разницей, что коммутируются (с помощью анодных ключей) и анодные развертывающие электроды. Последовательный перенос разряда позволяет (за счет увеличения времени сканирования) резко сократить количество адресных шин и управляющих схем.

Если стенки плазменных ячеек покрыть люминофором и подобрать соответствующую рабочую смесь газов, то в панели Self—Scan можно получить изменение цвета излучения [101]. Последнее происходит за счет изменения тока возбуждения ячеек, которое, в свою очередь, вызывает изменение соотношения спектральных компонент — УФ-излучения и видимого излучения в смесях газов на основе неона. При малых токах плазменная ячейка излучает преимущественно УФ-компоненту, которая возбуждает зеленый цвет люминофора ($ZnSi$). По мере повышения тока возрастает интенсивность видимого излучения неона в желтой, а затем и в красной области, в результате чего происходит плавное изменение цвета от зеленого к красному. Для наблюдения цветовых эффектов ячейки закрывают полупрозрачным стеклом, которое вне ячеек может быть дополнительно зачернено для увеличения контрастности. Еще одна возможность усовершенствования плазменных ГРИ, открывающая дополнительные возможности расширения области их применения (например, для создания телевизионных экранов), связана с воспроизведением полутоновых изображений [71]. Фирма Bell Labs (США) спроектировала плазменную панель, состоящую из трех независимо управляемых слоев и двух расположенных между ними пленок, которые обеспечивают ослабление световых сигналов. Комбинируя излучения различной интенсивности,

поступающие от указанных слоев, получают $2^3=8$ градаций полутонов «серой шкалы», начиная от полного отсутствия свечения (3 слоя выключены) до максимальной яркости (3 слоя включены). Фирма Zenith Radio (США) воспроизводит 4—6 градаций яркости путем изменения числа световых импульсов в течение заданного интервала времени (как видно из рис. 50, для этого необходимо изменять частоту поддерживающего синусоидального сигнала). Фирма Burroughs использует для той же цели (в панели Self—Scan) фазовую модуляцию, регулируя сдвиг во времени между моментами возбуждения разряда в передней и задней частях плазменных ячеек.

Следовательно, ГРИ в настоящее время приобретают такие новые качества, как плоскостность, низкие управляющие напряжения и малое потребление мощности, высокая яркость излучения, память; кроме того, ГРИ используют и для крупных индикаторных панелей и экранов, где сканирующие плазменные панели с люминофорными покрытиями применяют наряду с ЖКИ, ЭЛИ, СДИ. И если создание на плазменных ГРИ универсального дисплея или телевизионного экрана еще является делом будущего, то разработка на этой основе специализированных устройств отображения информации в многоканальных измерительных приборах и системах является делом вполне реальным.

Применительно к планарным ГРИ мы уже упоминали возможность управления ГРИ типа «Планар Пандикон» с помощью МОПИС. Рассмотрим теперь другую возможность использования МОП ИС в управлении ГРИ типа «Паноплекс» [56]. Принцип работы такой схемы заключается в том, что первоначально на электродах индикатора устанавливается напряжение на 50 В ниже напряжения зажигания. При этом анодные МОП-формирователи, служащие для выбора знаков, и катодные МОП-формирователи, служащие для выбора сегментов, отключены, в результате чего аноды через резисторы подключены к шине с потенциалом (-25) В, а катоды через диоды подключены к шине с потенциалом (-135) В, т. е. разность потенциалов равна 110 В. При включении анодного МОП-формирователя избранный анод заземляется (потенциал 0), а при включении катодного МОП-формирователя к смещенному потенциалу (-135) В добавляется потенциал сдвига (-25) В; таким образом, суммарный потенциал избранного катода становится равным (-160) В и между катодом и анодом возникает разряд. В результате управление МОП-формирователями осуществляется перепадами напряжений ± 25 В, причем количество формирователей равно суммарному количеству знаков и сегментов в одном знаке (мультиплексный режим).

7. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ И ЛАЗЕРНО-ЛУЧЕВЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Электронно-лучевые индикаторы, или, более точно, электронно-лучевые приборы (ЭЛП), начали использовать в технике индикации довольно давно. Однако и до сих пор они составляют основную группу приборов, используемых для индикаторных устройств большого формата. Несмотря на многочисленные попытки создания многоэлементных плоских экранов (электролюминесцентных, светодиодных, жидкокристаллических и др.), пока не удалось соз-

дать универсальное индикаторное устройство, равноценное или превосходящее ЭЛП по совокупности технических и эксплуатационных характеристик. Если же говорить не столько о технических реализациях, сколько об универсальности методов синтеза и воспроизведения изображений, то единственной достойной заменой ЭЛП является интенсивно развивающийся в последнее время класс лазерно-лучевых приборов (ЛЛП). При этом благодаря частотной и пространственной когерентности лазерного луча появляется возможность воспроизводить реальные трехмерные изображения в натуральных цветах с использованием голографических методов, которые следует считать наиболее перспективными для техники отображения вообще [24]. Однако если информационные и энергетические возможности лазерных средств отображения чрезвычайно велики, то технические средства управления лазерным излучением пока несовершенны и неэффективны. В связи с этим нетрудно прогнозировать, что ЭЛП и ЛЛП будут еще долгое время сосуществовать и дополнять друг друга.

Во всех перспективных областях лазерной индикации и регистрации (записи на тонких пленках, фотохромных материалах, электролюминесцентном экране, термопластической среде) лазерно-лучевые средства идут вслед за электронно-лучевыми приборами. Лазерному испарению тонких пленок предшествовало электронно-лучевое, а лазерным средствам записи на фотохромные носители — фотохромные ЭЛТ, в которых люминофор через оптические волокна возбуждал фотохромную пленку. С другой стороны, интенсивное изучение фотохромных материалов в качестве сред для лазерной (в частности, голографической) записи привело к выявлению материалов, обладающих одновременно и значительным катодохромным эффектом, например, содалита, заменившего в катодохромных ЭЛТ низкоконтрастные материалы типа KCl. Фирмой RCA создана катодохромная ЭЛТ с коэффициентом контрастности 10 [38]. Далее отметим несомненное сходство и преемственность светоклапанных устройств с электронно-лучевой и лазерно-лучевой адресацией (Titus, Phototitus). Метод синтеза знаков с помощью масок или растров также нашел применение первоначально в знаковых ЭЛТ (характронах), а затем уже был перенесен в область лазерной индикации и регистрации. Лазерная термопластическая запись пришла вслед за электронно-лучевой записью на масляных пленках («Эйдофор», «Мелва»), а также термопластиках и эластомерах.

Возвращаясь к ЭЛП, отметим, что поскольку они широко изучены и описаны в ряде монографий по технике отображения и обработки информации, в том числе и специально посвященных ЭЛП [19], мы не будем здесь описывать принципы действия и детали схемного или конструктивного выполнения ЭЛП, а ограничимся кратким обзором основных конструктивных модификаций ЭЛП, основных схемных вариантов управления и основных практических приложений.

Среди основных конструкций ЭЛП отметим ЭЛТ масочного и растрового типа (характроны); цветные ЭЛТ с теневой маской и трехточечным синтезированием цветов (красного, зеленого, синего); цветные ЭЛТ с многослойными люминофорами; ЭЛТ с совмещением нескольких визуальных полей, образуемых при помощи внутренних электронных пушек или внешних лучей, вводимых через прозрачное окно; запоминающие ЭЛТ с использованием послесвечения люминофора; запоминающие ЭЛТ с фотослоем; цветные

ЭЛТ с экраном из катодохромного материала; цветные ЭЛТ с люминофором УФ излучения и фотохромным экраном; регистрирующие ЭЛТ с промежуточной запоминающей средой (электрографическая пластина, масляная пленка, термопластический или эластичный материал, электрооптический кристалл) и преобразованием изображения.

Среди основных схемных вариантов управления электронным лучом для синтеза знаков отметим дискретное масочное и растровое управление, а также аналоговое функциональное управление с использованием фигур Лиссажу (полиграмм) и модуляции интенсивности луча.

Из всех возможных применений ЭЛП мы коснемся только двух, имеющих отношение к обсуждаемой теме: устройства вывода информационно-измерительных систем (ИИС) и индикаторы измерительных приборов и устройств.

Поскольку современные ИИС являются многоканальными и используют различные методы и устройства обработки, а также снабжаются различными сигналами, требующими вмешательства оператора для ведения контролируемого технологического процесса или устранения неисправностей в системе, объем и характер выводимой информации в основном соответствуют применяемым в управляющих вычислительных машинах или специализированных ЭВМ для моделирования и инженерных расчетов. В связи с этим в них вполне уместно использование экранных пультов (дисплеев) на ЭЛТ, разработанных для ЭВМ. Что же касается измерительных приборов и устройств, то в них пока считается избыточным не только применение дисплеев, но и ЭЛТ с упрощенной системой знаковенерирования и графического вывода. Однако именно применение ЭЛТ позволяет совместить в одном приборе цифровую индикацию данных, обеспечивающую наибольшую точность, и аналоговую индикацию, дающую наибольшую наглядность. Это свойство оказывается особенно ценным в цифровых анализаторах, характеристикографах и других специализированных приборах и устройствах, где наряду с определением количественных характеристик сложных сигналов целесообразно оценить их форму (характер переходного процесса, быстроту нестабильность, характер паразитной модуляции и т. п.). Жесткие тиски экономических ограничений не позволяют вводить ЭЛТ со схемой управления в обычные измерительные приборы широкого применения (вольтметры, частотомеры и др.). В универсальных измерительных приборах — мультиметрах положение упрощается тем, что увеличение стоимости может быть в значительной степени скомпенсировано расширением функциональных возможностей. Тем не менее нам известно только два случая использования индикаторов на ЭЛТ в современных цифровых мультиметрах — в модели 1090 цифрового вольтметра — частотомера фирмы Takeda Riken (Япония) и в авометре — осциллографе фирмы Tektronix (США) [81]. Следует полагать, что в дальнейшем индикаторы на ЭЛТ найдут еще большее применение в цифровых мультиметрах, причем перспективность таких приложений определяется не столько удешевлением ЭЛТ (которое маловероятно) и схем управления ими (которое более вероятно, но не дает радикального снижения стоимости), сколько дальнейшим усложнением и расширением функциональных возможностей мультиметров, а также широким применением в них микропроцессоров, благодаря которым они смогут реализовать режимы специализи-

рованных измерителей и вычислителей (анализаторов, характернографов и т. п.).

Конструкции ЛЛП, в принципе, более многообразны, чем ЭЛП, в связи с более широким выбором материалов и более сложны в связи с трудностями управления оптическим излучением. В сущности, пока еще рано говорить о каких-либо законченных конструкциях дисплеев на ЛЛП, поскольку в настоящее время реализованы только лазерные ЗУ, а экспериментальные лазерные индикаторные устройства, используемые для демонстрационных целей, построены на электромеханических отклоняющих устройствах.

Методы синтеза знаков в ЛЛП могут быть, в принципе, теми же, что и в ЭЛТ, однако упомянутые трудности управления лазерным излучением приводят к тому, что практически в ближайшее время могут быть созданы электронные устройства управления только для простейших вариантов синтеза — масочного, точечно-растрового и сегментного с использованием фигур Лиссажу.

В масочном варианте, в связи с пространственным разномасок-транспарантов, представляет определенную трудность сведение изображений знаков на единую траекторию, которое может быть выполнено либо электромеханически (перемещением масок), либо оптически. Предложено устройство отображения [А. с. 419928, СССР], содержащее источник света, модулятор, набор двупреломляющих пластин (призм) и электрооптических кристаллов, масочную матрицу, многогранное зеркало, широкоугольный объектив и экран; особенностью устройства, обеспечивающей сведение отклоненных лучей на единую траекторию, является использование помещенной за масочной матрицей полуволновой пластины и второго (компенсирующего) набора двупреломляющих пластин (призм) и электрооптических кристаллов, симметричного первому. Точечный растр реализуется проще, поскольку при сравнимом количестве двупреломляющих элементов и электрооптических кристаллов отпадает необходимость в дополнительных элементах для сведения лучей на единую траекторию и тем самым отпадают дополнительные искажения изображения и потери световой энергии.

При сегментном синтезе знаков с использованием фигур Лиссажу необходимо меньшее количество аппаратуры, так как при этом применяют лишь двухкоординатный дефлектор с аналоговым управлением и синхронный (с частотой сканирования) модулятор света. Однако если не использовать перемещение носителя с памятью, необходимо решить еще одну задачу — осуществить адресацию луча, имеющего в сечении форму синтезируемого знака, в ту или иную точку экрана в соответствии с характером воспроизводимого сообщения (отсчета, слова, фразы и т. п.). При этом, если не применять электромеханические отклоняющие устройства, понадобится дискретный (вообще говоря, двухкоординатный) дефлектор, например, подобный вышеописанному электрооптическому переключателю, содержащему набор двупреломляющих пластин (призм) и электрооптических кристаллов. Однако в этом случае при воспроизведении большого количества знаков (например, 2 тыс. шт., что соответствует примерно одной странице печатного текста) отклоняющее устройство будет слишком громоздким и дорогим.

Следует отметить еще одно техническое ограничение, связанное с созданием лазерного дисплея. Если принять указанный выше достаточно скромный (по сравнению с реализуемым в дисплеях на

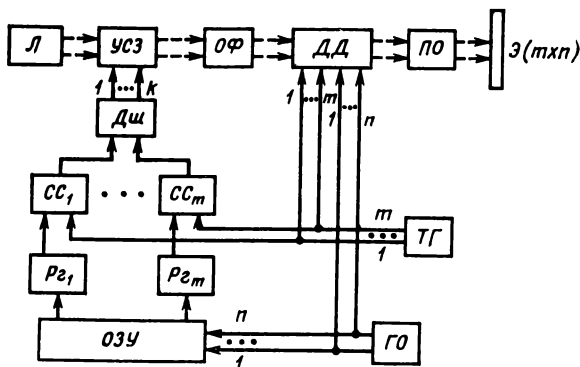


Рис. 52. Схема управления лазерно-лучевым индикатором:

Л — лазер; УСЗ — устройство синтеза знака из k элементов; ОФ — оптический формирователь; ДД — дискретный дефлектор (двухкоординатный); ПО — проекционная оптика; Э — экран для отображения $m \times n$ знаков; Дш — дешифратор кода знака; $СС_1$ — $СС_m$ — схемы совпадения по числу знаков в одной строке (слово или отсчет); $P_{г1}$ — $P_{гm}$ — регистры кодов знаков, составляющих одну строку; ТГ — тактовый генератор импульсов выборки кодов в строке (m); ГО — генератор отсчетов по числу строк n в матрице; ОЗУ — оперативное ЗУ для хранения кодов одной строки

ЭЛТ) формат кадра в 40×50 знаков и не использовать промежуточный микрофильм (запоминающую среду), то для обеспечения цельного восприятия при регенерации информации в кадре с частотой порядка 25 Гц время воспроизведения одного знака должно быть не более $1/25 \cdot 2000 = 20$ мкс. Стало быть, при последовательном синтезе знаков на точечном растре из $5 \times 7 = 35$ точек время переключения в дискретном дефлекторе, формирующем изображение знака, должно быть не более 0,5 мкс, что близко к теоретическому пределу быстродействия и далеко от практически достигнутых результатов [47]. Это означает, что для создания ЛЛП с воспроизведением данных такого формата на большом экране необходимо либо отказаться от последовательного синтеза элементов раstra, применив, например, лучерасщепитель, либо использовать промежуточную среду с памятью. При сегментном синтезе знаков с помощью фигур Лиссажу ограничения по быстродействию модулятора и дефлектора являются менее жесткими и, в принципе, могут реализоваться проще, чем параллельное расщепление луча.

Общая схема управления знаковым ЛЛП с непосредственным воспроизведением на большой экран показана на рис. 52. Импульсы ТГ, распределенные по m шинам, осуществляют последовательную выборку кодов знаков из $P_{гj}$ ($j=1, \dots, m$) и одновременно управляют ДД, определяя номер позиции (j), в которую адресуется сформированный УСЗ луч в выбранной строке кадра. Импульсы ГО, распределенные по n шинам, осуществляют последовательную выборку кодов одной строки в ОЗУ от источника ин-

формации и одновременно управляют ДД, определяя номер (l) выбранной строки кадра ($l=1, \dots, n$).

В качестве индикаторной среды в ЛЛП с памятью используются, например, фотохромный материал, возбуждение которого осуществляется УФ-лазером, а считывание (проектирование на большой экран) — лазером видимого света. При наличии памяти в индикаторе регистры P_1, \dots, P_m и ОЗУ для выборки кодов строк не нужны, т. е. информация может воспроизводиться в реальном масштабе времени. Формирование и позиционирование знаков в этом случае выполняются аналогично, как это происходит в схеме рис. 52, с той лишь разницей, что ГО и ТГ адресуются не к буферным регистрам, а непосредственно к источникам информации (например, отдельным каналам преобразования) и фрагментам преобразованных кодов. Для выборочного стирания обновляющейся информации может быть использован отдельный ИК-лазер, излучение которого пространственно совмещается с излучением УФ-лазера при помощи полупрозрачного зеркала и позиционируется относительно фотохромного носителя при помощи того же дефлектора (ДД), который применяют для записи [А. с. 418868, СССР].

8. ПОСТРОЕНИЕ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАКОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ИНДИКАТОРОВ

Выше, при описании различных видов индикаторных устройств, мы так или иначе затрагивали вопросы синтеза знаков с помощью различных элементов (точек, сегментов) и выбора схем управления знакосинтезирующими индикаторами (ЗСИ). Дадим систематизированное изложение этих вопросов применительно к наиболее распространенным сегментным ЗСИ.

Предметом исследования обычно является обеспечение максимальной наглядности индикации, простоты ЗСИ и схем управления ими, а также наибольшей надежности. Как правило, оптимизировать все характеристики ЗСИ одновременно не удастся. Кроме того, различны и критерии оптимизации: например, оптимизацию характеристик надежности можно рассматривать по отношению к собственно ЗСИ или к его схеме управления, или по отношению к ним обоим. Зачастую все перечисленные вопросы рассматриваются изолированно. Например, в ряде случаев, не изменяя конструкцию ЗСИ, вводят различные усовершенствования в схему управления, обеспечивая визуальный [Пат. 2146987, ФРГ] или автоматический [А. с. 418854, СССР] контроль правильности воспроизведения знаков; в других случаях, не изменяя схему управления и конструкцию ЗСИ, вводят изменения в алфавит, т. е. конфигурацию отдельных знаков: например, для 7-сегментной структуры ЗСИ предложен алфавит десятичных цифр [108], который позволяет обнаружить одиночную ошибку в воспроизведении цифры (выпадение или добавление одного сегмента) путем визуального контроля по четности. Если в ЗСИ преобладают отказы одного вида (например, в НИ — обрыв или перегорание нити накала), то эффективным средством повышения надежности является дублирование сегментов, однако этот вариант не всегда экономически выгоден, а в общем случае он менее эффективен, чем варьирование алфавитом ЗСИ. В работе [90] показано, что только переход от 7-сегментной структуры ЗСИ к 9-сегментной увеличивает надеж-

ность в 4,5 раза. Между тем этот результат получен при неоптимальном алфавите 9-сегментной структуры. Если для 9-сегментной структуры применить алфавит обычной почтовой индексации, изменив в нем только конфигурацию цифры «8», т. е. придав ей ромбическую форму, то в указанном алфавите обеспечивается как обнаружение одиночной ошибки, так и ее исправление.

Поскольку ЗСИ с оптимально выбранным алфавитом сочетают в себе удобство восприятия, простоту (малое количество сегментов) и высокую надежность (возможность обнаружения и восстановления ошибок), эти вопросы рассмотрены в ряде работ [57, 91]. К сожалению, в указанных работах не проведена систематизация известных ЗСИ и схем управления ими. Поэтому, во-первых, неясно, насколько синтезированные структуры близки к теоретически минимальным (4 сегмента для цифрового алфавита с кодовым расстоянием $k=1$; 5 сегментов для $k=2$; 7 сегментов для $k=3$ [57]). Во-вторых, поскольку критерии минимизации структур ЗСИ и дешифраторных структур не совпадают (в дешифраторах минимизируют количество логических элементов, а при этом отказ одного элемента приводит, как правило, к множественным отказам на выходе дешифратора), увеличение надежности собственно ЗСИ может оказаться бесполезным. Известные структуры и алфавиты цифровых ЗСИ сведены в табл. 3, в которой они систематизированы по числу используемых сегментов: от 4 (теоретический минимум для представления в двоичном коде) до 10 (число элементов представления в единичном коде). Описаны также дешифраторные структуры [7], минимизированные не по количеству логических элементов, а по числу корпусов микросхем наиболее широко применяемых серий и по количеству межсоединений; применительно к ЗСИ 9-сегментной структуры с кодовым расстоянием $k=3$ синтезирована схема дешифратора, в котором отказ любого логического элемента приводит к выдаче ложного сигнала только по одному выходу и, следовательно, к ложному возбуждению или гашению только одного сегмента ЗСИ, которое представляет собой обнаруживаемый и исправляемый дефект.

Структура и алфавит № 1 представляют интерес как теоретически минимальные (4 сегмента) и реализуемые из простейшей фигуры Лиссажу модуляцией через $1/4$ периода. Вариант № 2 наиболее близок к минимальному варианту № 1, но имеет улучшенное по сравнению с ним начертание. Все 6-сегментные конфигурации, кроме № 3, с топологической точки зрения равноценны и избыточны для $k=1$. В связи с этим предпочтение следует отдать варианту № 6, который характеризуется симметрией и реализуется из фигуры Лиссажу модуляцией через $1/6$ периода; вариант № 3 имеет улучшенное начертание цифр. Среди 7-сегментных конфигураций можно отметить алфавит варианта № 8, в котором использована обычная 7-сегментная структура, обеспечивающая обнаружение одиночной ошибки путем контроля четности; варианты № 9, 11 дают аналогичный результат при улучшенном начертании цифр. Все 8-сегментные конфигурации избыточны по сравнению с 7-сегментными для $k=2$. Среди них можно отметить вариант № 14, обеспечивающий $k=3$ для случая выпадения одного сегмента, и вариант № 15 с улучшенной конфигурацией цифр. Из вариантов № 17 и № 18 предпочтение, несомненно, следует отдать вариантам № 17, который проще в реализации как в конструктивном, так и в технологическом отношении (топология, число выводов),

Таблица 3

Номер по/ пор.	Число сегмен- тов	Струк- тура	Алфавит										Кодовое расстоя- ние
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	4												1
2	5												1
3	6												1
4	6												1
5	6												1
6	6												1
7	7												1
8	7												2
9	7												2
10	7												2
11	7												2
12	7												2
13	8												2
14	8												2(3)
15	8												2
16	8												2
17	9												3
18	10												3

а также требует меньших затрат на управление; положительным фактором варианта № 17 служит также распространенность почтовой индексации (за исключением конфигурации цифры «8») и наличие 9-сегментных структур данного вида среди НИ и ЖКИ. Приведенные соображения и оценки качественного характера могут и должны быть дополнены количественным анализом надежности ЗСИ, приведенных в табл. 3.

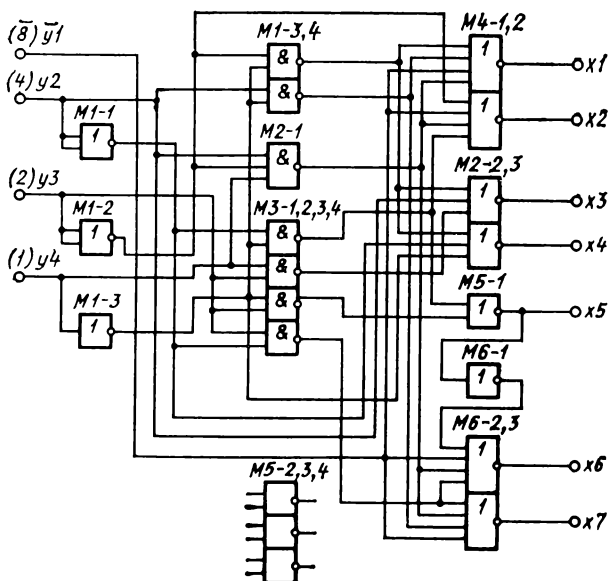


Рис. 53. Схема управления 7-сегментным индикатором на зажигание

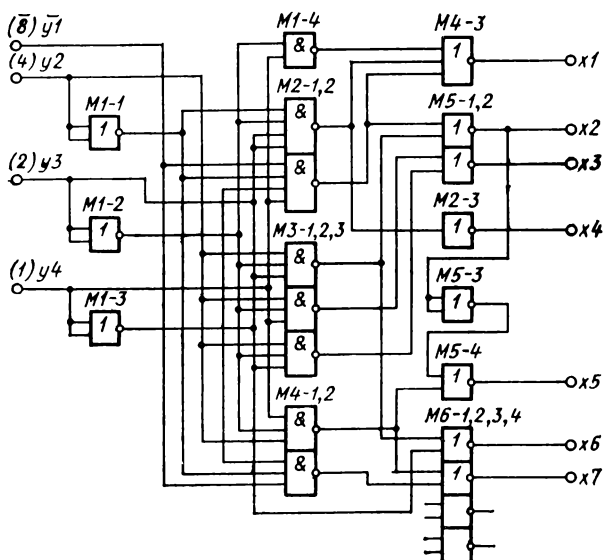


Рис. 54. Схема управления 7-сегментным индикатором на гашение

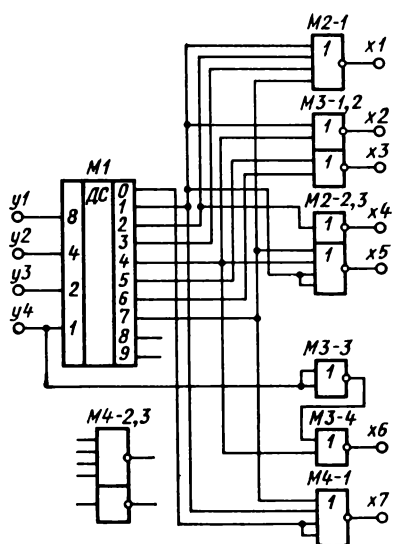


Рис. 55. Схема управления 7-сегментным индикатором с промежуточным преобразованием в единичный код

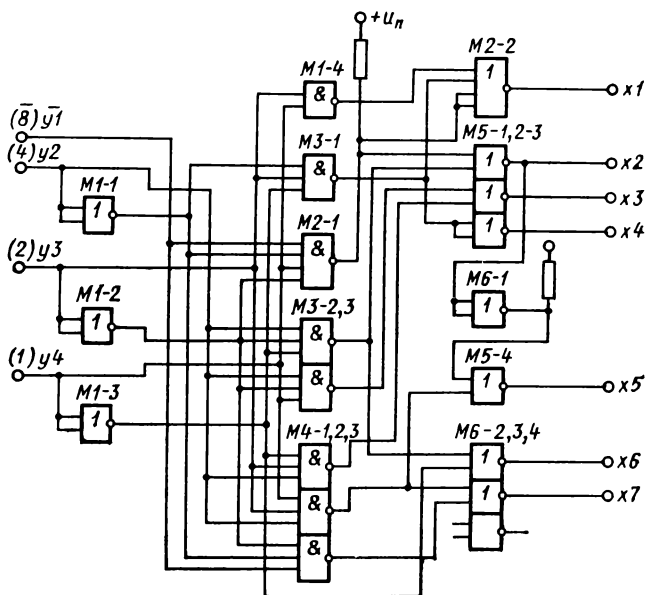


Рис. 56. Схема управления 7-сегментным индикатором с открытыми коллекторами

На рис. 53—54 приведены схемы управления (дешифраторы) для классической 7-сегментной конфигурации (вариант № 7), причем схема рис. 53 соответствует «зажиганию» избранных сегментов (возбуждение логической «1»), а схема рис. 54 — избирательному «гашению» (возбуждение логическим «0»); схема рис. 55 соответствует использованию промежуточного преобразования двоичного кода цифр в единичный. Несмотря на неоптимальность последнего варианта дешифрации, он может обеспечить уменьшение количества корпусов, если в используемой серии микросхем имеется указанный промежуточный преобразователь кодов в одном корпусе. Особенностью всех трех схем является использование только трех прямых и одного инверсного выходов триггеров счетных регистров. Нумерация корпусов в схемах рис. 53, 54 соответствует серии K176, а в схеме рис. 55 — серии K134, затраты составляют $5+1/4$, $5+1/2$ и $4+1/3$ корпусов соответственно, что существенно меньше затрат в дешифраторах для управления СДИ, описанных в литературе, при одновременном уменьшении количества межсоединений (4 входа вместо 8). Кроме того, схемы, описанные в литературе, избыточны и по согласованию с СДИ; на рис. 56 показана схема управления, выходные элементы которой выполнены с открытыми коллекторами, что обеспечивает непосредственное сопряжение с СДИ без промежуточных согласующих элементов; затраты составляют $5+1/4$ корпусов серий K155 или K133.

На рис. 57 изображена схема управления 9-сегментным индикатором (вариант № 17), обеспечивающая повышенную надежность индикации за счет разделения каналов управления отдельными сегментами (неминимизированная избыточная структура); затраты составляют $9+2/3$ корпусов серии K176.

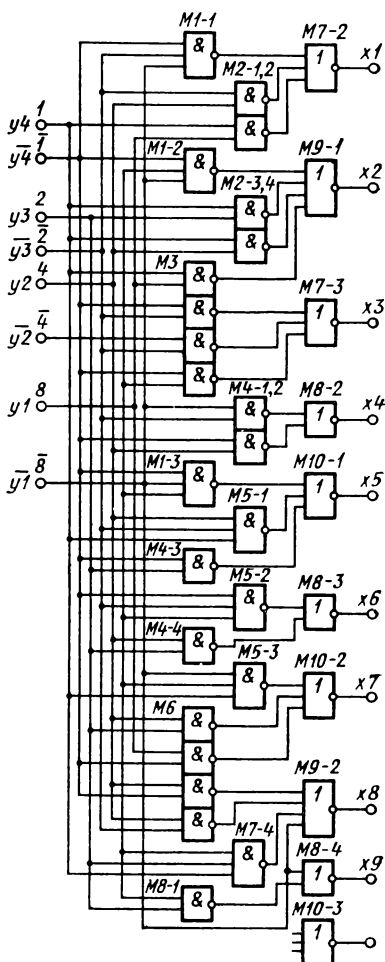


Рис. 57. Схема управления 9-сегментным индикатором

ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МИКРОРЕГИСТРАЦИИ

1. ОБЩИЙ ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ

Прежде всего отметим, что если в информационно-измерительных системах (ИИС) средства регистрации — оконечные устройства, то в информационно-вычислительных системах (ИВС) они являются промежуточными устройствами, относящимися к средствам сбора информации.

При сборе информации актуальны задачи использования более эффективных носителей, а также оптимизация ввода — вывода и программирования. Если задачи второго класса относятся к алгоритмическим, то повышение эффективности использования носителей осуществляется преимущественно путем уплотнения записи (микрорегистрацией).

Если целью регистрации является лишь документирование информации с ее последующим представлением оператору (однократным или многократным), то уплотнение записи усложняет лишь технические средства воспроизведения (увеличение изображения, проектирование на экран) и мало влияет на организацию записи, особенно в графических регистраторах. В такого рода графических регистраторах используют, как правило, электромеханическую развертку записывающего луча, причем развертка по одной координате осуществляется перемещением носителя, а по второй — зеркальным гальванометром. Кроме того, применяют двухкоординатную запись с помощью двух зеркальных гальванометров [23]. Запись ведется лазерным лучом в кадре 254×254 мм² со скоростью порядка 6 м/с.

Электротермические регистрирующие устройства являются более совершенными по сравнению с электромеханическими. Здесь электромеханический привод используют, как правило, только для перемещения носителя или записывающей головки (иногда для старт-стопного перемещения обеих с целью обеспечения полного взаимного прилегания). Записывающую головку зачастую выполняют в виде матрицы (мозаики) нагреваемых точек. Наряду с матричной записью используют построчную запись. При этом скорость записи снижается, однако уменьшается количество нагревательных элементов и улучшается качество записи (улучшается ее однородность). Аналогичного эффекта можно добиться и без снижения быстроты действия, если использовать синтез знаков с помощью нагревательных сегментов [Пат. 3754279, США]. Попутно отметим, что известна также комбинированная точечно-сегментная запись на движущийся носитель [Пат. 1673971, ФРГ]. В этом случае синтез зна-

ков выполняется построчно с помощью одного сегментного и двух точечных термоэлектродов, возбуждаемых в течение интервалов времени различной длительности. Сегментный электрод, возбуждаемый кратковременно, формирует горизонтальные сегменты, а точечные электроды, возбуждаемые длительно, составляют вертикальные сегменты записываемых знаков.

Наряду с дискретной (знаковой) термоэлектродной записью используют также аналоговую запись на движущийся носитель с помощью нагреваемого электрода (иглы), выбираемого из линейки таких электродов [Пат. 3815144, США]. Все варианты термоэлектродной записи при умеренном быстродействии характеризуются достаточно высокой плотностью, что в определенной степени приближает их к методам лазерной микрозаписи.

В отношении быстродействия более близки к лазерным микрорегистраторам струйные печатающие устройства, которые мы также относим к электромеханическим (механооптическим) в связи с особенностями формирования струй красящей жидкости, управления ими и синхронизации с перемещением носителя. Их широкое использование обусловлено сравнительно высоким быстродействием (более 100 знаков в секунду при двухкоординатной точечной адресации); отсутствием элементов, подверженных трению и износу; не критичностью в выборе носителей; простотой и гибкостью управления (синтеза знаков) [109].

В наиболее распространенных буквенно-цифровых капельных регистраторах используют точечное знаковосинтезирование, причем строки формируются последовательным во времени отклонением потока чернильных капель по горизонтали, а столбцы — последовательной во времени записью строк при вертикальном перемещении носителя. Более высокое быстродействие обеспечивают капельные регистраторы с рядом струйных сопел, формирующих одновременно всю строку одного знака или кадра записи [Пат. 3737914, США].

Дальнейшее повышение быстродействия жидкостных регистрирующих устройств получают при полноматричном параллельном формировании всех элементов регистрируемых знаков. [Пат. 3797022, США]. Если вместо сложных струенаправляющих аппаратов в таких устройствах использовать капиллярно-капельные формователи и матрицу избирательно возбуждаемых электродов, то в них может быть реализована скорость печати порядка 1000 знаков/с при достаточно высокой плотности записи. Сходная идея реализована и в способе, предложенном в а.с. 492896 (СССР). В нем использована сегментная форма представления знаков, т. е. капилляры, заполненные красящей электропроводной жидкостью, и управляющие электроды выполнены в виде сегментов с избирательным возбуждением ускоряющим и тормозящим полем, причем в отсутствии поля давление в капиллярах выбирается таким, что оно не превышает силу поверхностного натяжения сегментных менисков, расположенных в непосредственной близости от носителя без соприкосновения с ним. В случае наложения ускоряющего поля мениск красящей жидкости вытягивается в направлении носителя и сцепляется с ним, а после снятия поля образующийся проводящий «мостик» разрывается. В случае наложения замедляющего поля обратного знака мениск красящей жидкости втягивается внутрь капилляра, а после его снятия возвращается в исходное состояние.

Среди бесконтактных микрорегистраторов, использующих для записи фокусированный лазерный луч, первыми стали использоваться системы регистрации на фотопленку, обеспечивающие высокое быстродействие и плотность записи. С появлением фотохромных, фототермопластических, фототермомагнитных и других носителей фотографические методы уступили место методам регистрации с многократной записью и стиранием. Рассмотрим некоторые из них.

В одном из патентов предложено оптическое ЗУ на основе материалов типа оксидов ванадия и титана [Пат. 3609348, США], которые могут переходить из состояния металла в состояние полупроводника при уменьшении температуры ниже определенной температуры фазового перехода и обратно — при ее повышении.

Известны методы записи — воспроизведения с использованием полимерных (например, виниловых) пленок [Пат. 49—3045, Япония], изменяющих окраску в месте падения луча; с применением пленок аморфных полупроводников [Пат. 368006, США]; с использованием органических сред [Пат. 3508208, США], накапливающих в точке пересечения двух световых лучей свободные радикалы, которые обнаруживают флуоресценцию при повторном возбуждении. Отметим также использование тонкопленочных носителей, в которых после локального разогрева лучом лазера и быстрого прекращения подачи света образуются микрополости, обнаруживаемые при считывании светом с длиной волны, соответствующей размерам полостей [Пат. 363526, США].

Обширную группу регистрирующих устройств с неразрушающей записью составляют лазерные регистраторы на магнитные пленки. Здесь лазерный луч вызывает локальный разогрев пленки без ее механического разрушения; в результате нагрева происходит лишь модуляция электромагнитных свойств [98].

Промежуточное положение между рассмотренными видами записи (фотохромная, термооптическая, термомагнитная) занимает так называемая термохромная запись. В качестве носителя в этом случае можно использовать, например, ртутный йодид меди, отражательная способность которого (а также электропроводность) обладает гистерезисом в зависимости от температуры [Пат. 3789421, США]. Запись лазерным лучом может быть локализована в областях с линейными размерами порядка 30 мкм, что и определяет разрешающую способность регистрации. Считывание может быть оптическим, электрическим или комбинированным. Недостатком этого вида записи является сравнительно узкий температурный диапазон эффекта.

Наряду с магнитооптическими средами для создания микрорегистраторов с неразрушающей записью могут быть использованы электрооптические среды, обладающие подобно ферромагнетикам гистерезисными свойствами и вследствие этого эффектом памяти. Таковы, например, некоторые сочетания нематических и холестерических жидких кристаллов, которые, однако, обладают недостаточной длительностью хранения применительно к ПЗУ и недостаточной оперативностью записи и считывания применительно к ОЗУ. Более перспективны в этом отношении сегнетоэлектрики, обеспечивающие при управляющих напряжениях порядка 200 В высокую контрастность (100:1) и быстродействие (100 нс) при большом сроке службы (более 10^{10} переключений). Линейная апертура одно-

го элемента может быть порядка 150 мкм. Запись и выборка информации в дискретных сегнетоэлектрических ячейках подобных ЗУ может выполняться с электрической адресацией или с адресацией электронным или световым лучом. В первом случае используют, как правило, раздельную выборку строк и столбцов на двух расположенных последовательно по ходу луча транспарантах, что устраняет перекрестные помехи и уменьшает требования к порогам возбуждения. Во втором случае сегнетоэлектрический материал устанавливают на электролюминесцентный экран ЭЛТ. В третьем случае при записи и считывании используют дефлектор света, а сегнетоэлектрик возбуждают через слой фотопроводника.

Различные варианты использования сегнетоэлектриков и других электрически модулируемых сред в сочетании с фотопроводниками систематизированы применительно к так называемым пространственно-временным модуляторам света [44], которые здесь детально не рассматриваются.

В последнее время наибольшее распространение получили методы лазерной микрорегистрации с разрушением носителя, развитие которых стимулируется также широким внедрением лазерных технологических установок, выполняющих скрайбирование и подгонку тонкопленочных элементов, а также изготовление микрошаблонов для интегральных схем. В связи с этим рассмотрению методов и средств лазерной разрушающей микрозаписи посвящены отдельные параграфы данной главы.

Классификация методов и средств микрорегистрации приведена на рис. 58. Развитие соответствующих классификационных групп зависит от степени их перспективности: более перспективным методам и средствам соответствует и более полное использование классификационных признаков, т. е. большая глубина и детальность классификации. В первую очередь это относится к выбору способа перемещения носителя (непрерывное, старт-стопное). Непрерывное перемещение носителя усложняет синхронизацию и позиционирование, повышает требования к электромеханическим устройствам, практически исключает возможность автоматической калибровки искажений (вероятность которых при динамической записи возрастает), уменьшает плотность записи и быстродействие. Дело в том, что при непрерывном перемещении носителя трудно вести запись в ритме поступающей информации, который может быть и весьма быстрым, и достаточно медленным, а адаптация к скорости процесса путем регулирования скорости перемещения носителя встречает определенные технические трудности и ограничения. Если же скорость перемещения носителя сделать достаточно медленной «на все случаи жизни», то придется существенно понизить скорость регистрации и перегрузить буферные ЗУ, предназначенные для хранения регистрируемой информации. По-видимому, для целей микрорегистрации практика построения традиционных самописцев и магнитных регистраторов с непрерывным перемещением ленты (по отношению к головкам записи) должна уступить место полнокадровым системам микрозаписи с электронооптической разверткой (а при необходимости — с автоматической калибровкой и контролем правильности записи) в пределах выделенного (и закодированного) кадра. Непрерывную развертку следует применять только в специализированных одноканальных регистраторах и преимущественно при кодовой (двоичной) записи с однострочной компоновкой дискретных отсчетов.

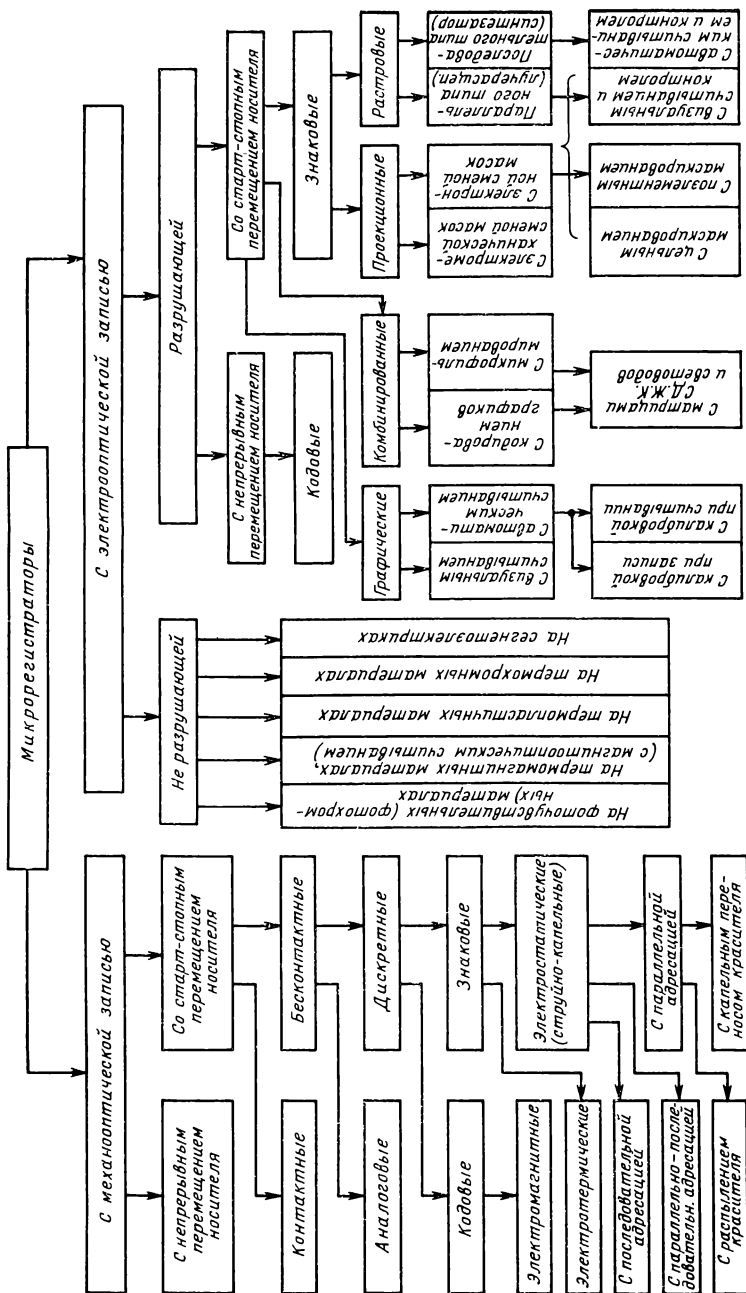


Рис. 58. Классификация методов и средств микрорегистрации

Применительно к группе микрорегистраторов с механооптической записью (см. рис. 58) к неперспективным можно отнести не детализируемые далее устройства с контактной записью (печатью) — ударные, электрохимические и др. Действительно, в этой группе устройств трудно добиться высокой плотности записи, быстродействия и надежности, а также необходимо использование дополнительных красящих лент, проявителей и т. п. Среди бесконтактных механооптических устройств к менее перспективным можно отнести аналоговые микрорегистраторы (графопостроители), в которых уплотнение записи обуславливает жесткие требования к точности электромеханических развертывающих устройств.

Среди дискретных микрорегистраторов с электромеханической разверткой к менее перспективным можно отнести магнитные регистраторы с кодовой записью. Несмотря на широкое развитие подобных регистраторов, достигнутые в них быстродействие и плотность записи значительно уступают аналогичным параметрам лазерных ЗУ. При этом возможности их улучшения практически исчерпаны. Оставляет желать лучшего и надежность этих устройств, их чувствительность к дефектам магнитной пленки, колебаниям скорости перемещения ленты, а также люфтам и зазорам в узлах записи и считывания.

Среди знаковых микрорегистраторов со старт-стопным перемещением носителя к менее перспективным можно отнести устройства с электротермической записью. Здесь необходимо использование специальных носителей (термочувствительных бумаг) и низкая скорость записи (из-за инерционности теплопередачи от нагревательных элементов к носителю); в связи с этим устройства данного типа целесообразно использовать только как регистраторы медленно меняющихся величин.

Электростатические микрорегистраторы струйно-капельного типа представляют собой, по-видимому, наиболее перспективную группу устройств с электромеханической разверткой, поскольку здесь собственно развертка (отклонение, перенос) струй или капель красящей жидкости осуществляется электромагнитным полем и лишь подача жидкости под давлением и ее циркуляция осуществляется с помощью электромеханических (точнее — электрогидравлических) устройств. Среди различных вариантов развертки или адресации каплей при синтезировании знаков (последовательная, последовательно-параллельная, параллельная) наибольший интерес представляет последняя, поскольку при параллельной адресации отпадают проблемы синхронизации и повышается быстродействие печати. Что же касается выбора между вариантом распыления красителя с последующим избирательным осаждением на электродах и вариантом капельного переноса красителя полем, последний, вероятно, предпочтительнее, так как не требует распылительных устройств и использует принцип активного торможения неработающих элементов, что обеспечивает высокую надежность регистрации.

Микрорегистраторы с неразрушающей записью отличаются большим разнообразием способов и средств регистрации. Ближе всех к реализации находятся регистраторы этого типа с использованием термопластических и термомагнитных эффектов, а также преобразователи изображений на сегнетоэлектриках. Первые, по-видимому, перспективны для создания голограмм длительного пользования, однако отличаются малым быстродействием. Вторые компро-

миссно удовлетворяют требованиям высокой плотности записи и быстродействия, однако промышленность еще не освоила производство носителей с необходимой стабильностью и воспроизводимостью термомагнитных свойств. Третьи наиболее просты в реализации, однако уступают двум первым в разрешающей способности. В целом эта группа микрорегистраторов весьма перспективна, но она еще не вышла из стадии лабораторных исследований, поэтому многие аппаратурные задачи, такие как выбор форм представления и способов адресации, автоматизации калибровки, считывания и контроля, не только не получили должного разрешения, но зачастую даже не ставились.

Средства разрушающей, а точнее говоря, перфорационной лазерной записи, в настоящее время получили широкое развитие и по совокупности исследованных вопросов и имеющихся технических средств близки к аппаратурной реализации. Достаточно перспективны как аналоговые (графические), так и комбинированные (с записью кодированных графиков на одном поле носителя или с записью текста и растровых рисунков), а также знаковые (буквенно-цифровые) регистраторы. При этом успех создания графических микрорегистраторов с лазерной перфорацией зависит главным образом от решения задач позиционирования (калибровки) и автоматизации считывания, причем по сравнению с дискретной (знаковой) записью задача позиционирования сложнее, а автоматизация считывания существенно проще, так как может решаться с использованием простых (линейных) позиционно-чувствительных фотоприемников.

Устройства комбинированной микрозаписи или микрофильмирования, по-видимому, уместнее всего реализовать с записью на различные фотопленки, что позволяет использовать маломощные когерентные или некогерентные источники света (например, светоиды) с высокой плотностью компоновки. Управление такими многоэлементными печатающими головками значительно проще, чем при последовательном синтезе знаков или расщеплении одного светового пучка; кроме того, для избирательной модуляции света в соответствии с поступающей информацией могут быть использованы управляемые матричные транспаранты на жидких кристаллах (например, с использованием поляризационных эффектов). При этом размеры элементарных излучателей и модуляторов не являются ограничивающим фактором, так как поле изображения может быть уменьшено с помощью световодных фоконов и фокусирующих линз.

Знаковые перфорационные микрорегистраторы представлены двумя группами устройств, различающимися по способу синтеза знаков: масочные (проекционные) — каждый из знаков алфавита образован соответствующей маской, через которую луч проектируется на носитель, и растровые — каждый из знаков алфавита образован определенным набором элементов (точек, полос, сегментов) из выбранного раstra. Аппаратурные реализации масочных (проекционных) перфораторов зависят в первую очередь от выбора способа смены масок. Электромеханическая смена масок малоперспективна, так как снижает быстродействие и надежность в работе. Поэтому в ближайшее время устройства с электромеханической сменой масок должны уступить место электронным. В свою очередь, электронные устройства смены масок различают по способам синтеза масок: они могут быть выполнены как в виде

контуров полных знаков, так и в виде контуров их отдельных элементов. При большом количестве знаков алфавита второй способ синтезирования существенно проще, так как требует меньшего количества элементов управления и уменьшает световые потери.

Растровые микроперфораторы также различают по способу синтеза знаков: при параллельном синтезе перфорацию выполняют одновременно несколькими расщепленными лучами, при последовательном — одним световым лучом, перемещающимся (непрерывно или дискретно) по контуру знака. Каждый из способов синтеза имеет свои достоинства и недостатки. Лучерасщепители сложнее вследствие необходимости наложения нескольких формирующих сигналов (в варианте дифракции Брэгга — нескольких дискретных частот) и необходимости регулировки интенсивности луча в зависимости от количества расщепленных лучей. Знакогенераторы, или синтезаторы, последовательного типа проще в реализации, так как в них используют фиксированную развертку луча и синхронизированную с ней модуляцию интенсивности света, причем управление знакогенератором осуществляют по 3-м шинам (одна для модулятора и две для дефлектора). Однако при последовательном синтезе снижается быстродействие или (при том же быстродействии) уменьшается время действия лазерного импульса на единицу площади носителя. Поэтому, если не предъявлять чрезмерно жестких требований к частоте следования лазерных импульсов, необходимо увеличивать мощность в импульсе и повышать быстродействие формирующих устройств (модулятора, дефлектора).

2. ЭЛЕКТРОННООПТИЧЕСКИЕ МИКРОРЕГИСТРАТОРЫ С РАЗРУШАЮЩЕЙ ЗАПИСЬЮ

Лазерная запись на фотопленку явилась началом неразрушающей записи на многократно экспонируемые фотохромные, термоманитные, термопластические и термохромные носители, она же послужила отправным пунктом для различных видов разрушающей микрозаписи. Уже в начале 70-х годов ряд фирм создали лазерные системы для изготовления фотошаблонов на светочувствительном материале: достигнутая при этом точность нанесения линий составляла несколько мкм при сравнительно низкой производительности (несколько мм/с). Среди собственно регистрирующих устройств лазерные микрорегистраторы на фотопленку также оказываются более экономичными, чем перфорационные микрорегистраторы с прожиганием (перфорацией) носителей. При этом существенно уменьшается время записи и мощность излучения, упрощается выбор фокусирующей оптики и фотодетекторов для считывания. Фирма Datalight разработала лазерный регистратор буквенно-цифровой и графической информации на фотопленку с использованием маломощного (3 мВт) лазера и УЗ дефлектора, сканирующего матрицу 5×7 элементов, при механическом перемещении от знака к знаку; скорость записи составила 50 тыс. знаков/с. Фирма Zenith в аналогичном регистраторе на бумагу с сухим проявлением использовала дискретный дефлектор с расщеплением луча на 7 пучков по вертикали (управление набором частот), что позволило реализовать скорость записи 420 тыс. знаков/с [52]. Достигнутая в лучших регистраторах подобного типа скорость записи является ре-

кордно высокой: во всяком случае, она существенно выше, чем в аппаратах для микрофильмирования с использованием лазерных диодов и оптических волокон (10 тыс. знаков/мин) [110]. К сожалению, регистраторы этого типа практически непригодны для перфорационной записи, требующей более высокой мощности излучения и применения специальной оптики.

В первых лазерных перфораторах использовалась электромеханическая развертка луча, испаряющего на экране тонкопленочное покрытие из кадмия или синтетических материалов с низким уровнем скрытой теплоты испарения.

В работе [26] рассчитаны удельные энергии испарения тонкопленочных покрытий толщиной 500 \AA из различных материалов (в Дж/см²): алюминия — 0,17; кадмия — 0,045; цинка — 0,078; серебра — 0,05; свинца — 0,06; хрома — 0,055. Показано также, что при плотности излучения менее 10^5 Вт/см^2 имеют место значительные тепловые потери; при плотности 10^6 Вт/см^2 потери вдоль пленки незначительны, но еще сказываются потери в подложку; при плотности более 10^7 Вт/см^2 почти вся энергия излучения расходуется на испарение. При средней плотности 10^6 Вт/см^2 и диаметре светового луча $10\text{--}20 \text{ мкм}$, что соответствует импульсной мощности лазера порядка 1 Вт, время перфорации (прожигания) одной точки составляет примерно 10^{-7} с . Приведенные данные непригодны для меньших диаметров светового луча, которые используют на практике (единицы и доли мкм). Вообще теория взаимодействия излучения с веществом применительно к лазерной перфорационной записи развита еще недостаточно, и многие результаты в этой области получены эмпирически. Среди эмпирических решений, направленных на повышение эффективности и улучшение качества перфорации, отметим использование защитного и дополнительного слоев легкоиспаряющегося материала, герметизирующих основной слой светопоглощающего материала [Пат. 3665483, США]; использование лазера с дополнительным по отношению к покрытию (например, окиси алюминия) цветом излучения [Пат. 3747117, США]; нанесение на прозрачную подложку типа полистирола теплопоглощающего покрытия типа сажи, растворенной в нитроцеллюлозе, с собиранием разлетающихся частиц сажи на липкую ленту для образования негативного изображения [Пат. 3787210, США].

Комплексные решения по системам микроперфорации разработаны рядом зарубежных фирм. Фирма Precision Instr. сообщила о создании лазерного перфоратора, обеспечивающего запись и воспроизведение информации на тонкой полиэфирной ленте с металлическим покрытием, в котором пуншируются отверстия диаметром около $1,5 \text{ мкм}$. Запись ведется в двоичном коде на поверхность вращающегося барабана через электрооптический модулятор Покейльса, поляризационную оптику, расщепитель и фокусирующую оптику. Часть луча, отраженная от поверхности барабана, используется для контроля записи; при считывании интенсивность луча уменьшается [Пат. 3657707, США]. На основе этой системы фирмой Precision Instr разработана архивная память для сверхбыстродействующей ЭВМ типа Иллиак-4. На каждой полоске барабана этого ЗУ сосредоточено 2,9 млрд. бит информации. При скорости считывания $4 \cdot 10^6 \text{ бит/с}$ время обращения к одной полоске составляет 200 мс, а к ЗУ в целом — до 5 с [2].

Обширный комплекс исследований и разработок, связанных с

созданием лазерных средств микрорегистрации, проведен рядом организаций; результаты опубликованы в работах по этой тематике.

В работе [51] приведены расчетные данные по режимам записи и плотности микрорегистрации масочным (проекционным) методом, т. е. с одновременным прожиганием контура цифрового или буквенного знака. При этом зона термических искажений, определяющая ширину контура знака, вычисляется как $d = \sqrt{at_n}$, где a — теплопроводность пленки, t_n — время действия лазерного импульса. При $t_n = 10^{-8}$ с для металлов можно получить $d = 1 \div 2$ мкм, а для диэлектриков и полупроводников $d = 0,1$ мкм, что и определяет предельную разрешающую способность микрозаписи. Требуемая (при длительности 10^{-8} с) интенсивность луча для пленок толщиной

$\approx 1000 \text{ \AA}$ составляет $q = 10^6 \div 10^9 \text{ Вт/см}^2$; соответственно этому импульсная мощность лазера, рассчитанная по формуле $p = \frac{k_1}{k_2 k_3} qS$,

где S — площадь знака; $k_1 = 1,2 \div 1,5$ — коэффициент запаса (превышения над порогом разрушения пленки); $k_2 = 0,5$ — коэффициент использования энергии луча (отношение площади маски к площади поперечного сечения луча); $k_3 = 0,5$ — коэффициент потерь в оптической системе, при размере (высоте) знака порядка 10 мкм составит $p \approx 10 \div 10^4 \text{ Вт}$. Наиболее перспективным для этой цели авторы считают лазер на азоте, излучающий в ближней УФ области

($\lambda = 3371 \text{ \AA}$) и обеспечивающий необходимые параметры импульса (длительность 10^{-8} с, мощность — порядка кВт). Одновременно авторы указывают, что проекционный метод записи позволяет получить более высокую разрешающую способность, чем растровый (запись точками или штрихами). Вероятно, более существенным достоинством проекционного метода является его быстроедействие по сравнению с методами последовательного синтеза знаков отдельными точками или сегментами, а также простота реализации по сравнению с вариантом параллельной точечной записи (мозаичного расщепления луча). Вместе с тем применение электромеханических развертывающих и светоклапанных устройств, в свою очередь, снижает быстроедействие и надежность микрорегистраторов. В связи с этим было предложено оригинальное электрическое устройство выбора масок [А. с. 372557, СССР], расположенных на одной оптической траектории. Блок-схема устройства приведена на рис. 59, а; на рис. 59, б показана конструкция одной из пластин ЭОК. Через невозбужденные кристаллы поляризованный свет проходит свободно, а в случае возбуждения одного из кристаллов изменяется направление поляризации света, и неполяризованной остается лишь часть луча, прошедшая через формирующий контур выбранного знака. При настройке анализатора на фазу поляризатора поляризованный свет задерживается анализатором. В результате на носитель поступает луч, контур которого соответствует контуру знака. Очевидно, что число ЭОК равно числу записываемых знаков. При сложном алфавите, например, буквенном, это решение оказывается более громоздким, чем вариант знаковосинтезирования на электрооптической матрице; подобный матричный модулятор, состоящий из двух наборов горизонтальных и вертикальных пластин, управляемых соответствующими электродами, предложен в пат. 3644017, США. Более экономичен вариант сегментного управления, когда прозрачные «окна» выполнены в виде избирательно возбуждаемых сегмен-

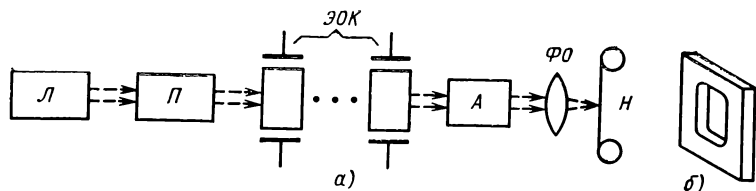


Рис. 59. Лазерный микрорегистратор с электрооптической выборкой знаков:

Л — лазер; П — поляризатор; ЭОК — электрооптические кристаллы; А — анализатор; ФО — фокусирующая оптика; Н — носитель

тов. При этом по сравнению с конструкцией, показанной на рис. 59, уменьшается как число пластин, так и число пар управляющих электродов.

Рассмотрим лазерную систему постраничной записи с голографической памятью, описанную в работе [51]. Преимущество подобного голографического ЗУ по сравнению с ЗУ на магнитных дисках и лентах, как утверждают авторы, заключается в оперативности выборки, упрощении поиска, возможности сверхбыстрой передачи данных (до 500 М бит/с), повышении надежности регистрации, обеспечении высокой плотности записи (до 10^6 — 10^7 бит/см²) и снижении требований к точности отклоняющих систем. Кроме того, авторы отмечают преимущества знаковой записи по сравнению с двоичной: отсутствие подготовительных операций, возможность эффективного контроля записи, высокая оперативность, экономия ресурса ОКГ. По этому поводу следует высказать некоторые замечания.

Подготовительные операции, равно как и визуальный контроль, связаны с перекодированием данных по жесткому алгоритму (в соответствии с принятыми алфавитами двоичного кода и кода визуального представления). Это не создает никаких технических затруднений. Автоматическое считывание синтезированных знаков (например, с целью перезаписи или ввода в ЭВМ для последующей обработки) значительно сложнее, чем считывание двоичной информации. Повышение оперативности записи и экономия ресурса ОКГ имеют место только при масочном или другом методе параллельного синтеза знака, а при последовательном растровом синтезе представление знака даже в стилизованной форме менее экономно, чем его представление двоичным кодом. Кроме того, в масочном методе, выигрывая в быстродействии при формировании одного знака, можно проиграть в быстродействии при выборе маски, если выбор ее осуществляется электромеханическими средствами, в связи с чем и необходимы упомянутые выше электронно-управляемые транспаранты. И, наконец, масочный (проекционный) метод записи не является единственной альтернативой растрового метода с последовательной регистрацией каждого элемента знака в течение действия одного лазерного импульса: во-первых, известны различные расщепители луча, обеспечивающие параллельное формирование элементов растра; во-вторых, известны быстродействующие дефлекторы света, обеспечивающие сканирование луча по всем элементам знака в течение действия одного лазерного импульса, причем здесь

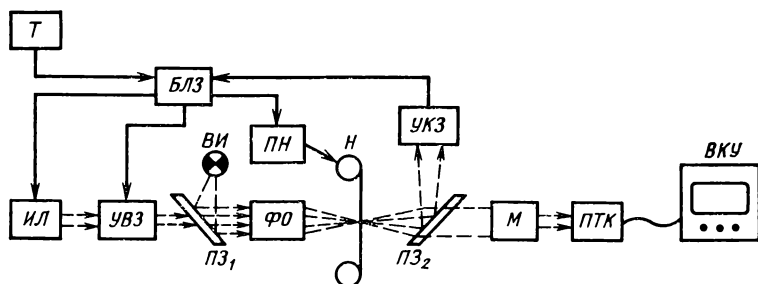


Рис. 60. Лазерная система микрорегистрации с электромеханической выборкой знаков:

ИЛ — импульсный лазер (ЛГИ-21); УВЗ — устройство выбора знака (маски); ПЗ₁, ПЗ₂ — полупрозрачные зеркала; ФО — фокусирующая оптика; Н — носитель (с непрозрачным покрытием); УКЗ — устройство контроля записи; БЛЗ — блок логики записи; Т — телетайп; М — микроскоп (из комплекта ОСК-2М); ПТК — передающая телекамера; ВКУ — видеоконтрольное устройство; ВИ — вспомогательный излучатель; ПН — привод носителя

может быть использовано как дискретное позиционирование луча, так и непрерывная развертка (например, путем формирования фигур Лиссажу при двухкоординатном возбуждении дефлектора). Поскольку любые реализации знакогенераторов сложнее, чем двоичная запись, которая к тому же обеспечивает более высокую плотность регистрации в связи с более полным и экономным использованием площади носителя, следует полагать, что в ЗУ знаковая (буквенно-цифровая) регистрация не имеет практических преимуществ перед двоичной, о чем свидетельствует и практика построения ЗУ зарубежных фирм. По-видимому, знаковая запись предпочтительна при микрофильмировании и создании матриц различных текстов для последующего их репродуцирования; что же касается технических систем, то здесь двоичная перфорация, несомненно, более перспективна.

На рис. 60 приведена блок-схема оптического тракта записи цифровой информации лазерной системы микрорегистрации [51].

В БЛЗ пятиразрядный код телетайпа преобразуется в десятичный и поступает в УВЗ. Затем формируется импульс управления лазером, который сфокусированным лучом соответствующей формы (после УВЗ и ФО) испаряет пленку носителя. В случае отсутствия импульса УКЗ выдает сигнал на повторную запись. Далее носитель Н с помощью ПН сдвигается на один шаг, маска возвращается в исходное состояние и далее процесс повторяется. Через микроскоп М и телекамеру ПТК изображение знака поступает на видеоконтрольное устройство ВКУ.

После того как страница текста заданного формата записана, выполняют запись ее голограммы. Голографическая запись ведется по кадрам с помощью дискретного электрооптического дефлектора на 1024 позиции, что соответствует размещению на одной голограмме 1024 страниц текста. Считывание информации выполняется постранично с помощью матрицы фотоприемников соответственно положению и размерам кадра.

В заключение отметим, что в литературе по микрорегистрато-

рам, уделяющей достаточно много внимания дискретной (в виде двоичных или буквенно-цифровых знаков) перфорационной записи, практически не нашли отражения вопросы аналоговой (графической) микрорегистрации.

В варианте графической регистрации более существенную роль играет позиционирование, погрешности которого являются одновременно погрешностями отсчета. В связи с этим вопросы графической микрорегистрации мы рассмотрим отдельно. Здесь же следует подчеркнуть то обстоятельство, что, несмотря на относительно малую распространенность графических микрорегистраторов, они представляют значительный интерес именно в качестве средств вывода систем обработки данных, т. е. собственно регистраторов, тогда как цифровые регистраторы более удобны в качестве средств ввода, т. е. постоянных и буферных ЗУ. Это объясняется большой наглядностью аналогового представления, возможностью построения силуэтных графиков (гистрограмм) для большого количества отсчетов, а также возможностью получения (при последовательном наложении контурных графиков) зон разброса параметров. В отношении плотности записи при умеренных требованиях к точности графическая микрорегистрация сравнима с буквенно-цифровой. Именно, если буква или цифра отображается матрицей 7×5 и пробелы между точками равны диаметру точки d , то площадь знака (с учетом минимального пробела между знаками) равна $140 d^2$. В варианте графической регистрации при том же диаметре перфорируемой точки d и при точности регистрации 2% (50 разрешимых точек) площадь носителя, приходящаяся на один отсчет, составляет $100 d^2$. Кроме этого, если заранее известна зона отсчетов и она является достаточно узкой, количество точек, приходящихся на один отсчет, может быть уменьшено. И, наконец, если зоны отсчетов для различных каналов не перекрываются, то на одном поле записи можно совмещать несколько графиков (диаграмм). Все эти достоинства графической микрорегистрации, в сочетании с простой реализацией, определяют целесообразность ее дальнейшего исследования и в первую очередь — изучения методов и средств позиционирования.

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ

Прежде всего отметим, что здесь мы не будем касаться синхронизации записи с перемещением носителя. Причин этому несколько. Во-первых, запись в динамике, когда одно из направлений развертки совпадает с перемещением носителя, по быстродействию уступает варианту параллельной записи всех элементов знака на неподвижном носителе. Во-вторых, точность позиционирования при старт-стопном (шаговом) перемещении носителя, в принципе, выше, чем при непрерывном перемещении; к тому же в статическом положении любые погрешности позиционирования полностью корректируются, тогда как в движении коррекция всегда выполняется с определенной динамической погрешностью. В-третьих, при графической регистрации направление перемещения носителя не может быть (из-за нестабильности скорости, трения, люфтов и т. п.) осью ординат записываемой величины, что практически исключает воз-

возможность записи в одном кадре гистрограмм распределения мгновенных значений величин в нескольких каналах. И, наконец, синхронизация зачастую может реализоваться не проще, чем второе направление развертки при записи на неподвижный носитель. Вряд ли следует особо разъяснять, что задача идентификации или распознавания буквенно-цифровых знаков, трудная даже в статике, в динамике еще более усложняется, так что динамический режим считывания (воспроизведения) также не имеет преимуществ перед статическим или старт-стопным (шаговым). В связи с этим мы считаем целесообразным в микрорегистраторах как при записи, так и при считывании использовать старт-стопный режим, т. е. записывать и считывать информацию в неподвижном состоянии носителя и записывающей (считывающей) головки. При этом запись и считывание ведется кадрами, а сканирование внутри кадра выполняется немеханическими средствами, что упрощает позиционирование и одновременно повышает быстротейшие записи (считывания). Разумеется, эти соображения мы не рассматриваем как некий окончательный рецепт на все случаи жизни или запрет на использование электромеханических развертывающих систем вообще. Дело в том, что в некоторых случаях надлежащим образом рассчитанный и реализованный динамический режим записи может быть эквивалентен статическому, поэтому высказанные выше возражения снимаются. Например, известно устройство регистрации буквенно-цифровой информации в виде раstra 7×5 точек [Пат. 94513, ГДР], в котором печатание производится при нулевой относительной скорости печатающей головки и носителя, перемещаемых синхронно с равными абсолютными скоростями.

Примером реализации устройства с параллельной записью элементов синтезируемого знака в неподвижном состоянии записывающей головки и носителя является микрорегистратор [Пат. 3744039, США]. Здесь используют две акустооптические ячейки Брэгга, установленные последовательно по ходу луча: одна из них управляет семью переключаемыми гармоническими составляющими для образования столбца из 7 точек, а вторая — 5-ю гармоническими составляющими для образования строки из 5 точек. В результате образуется матричный растр 7×5 точек. Особенностью устройства является коррекция интенсивности излучения в зависимости от количества расщепленных лучей.

Переходя непосредственно к вопросу позиционирования, отметим, что в первом приближении задача позиционирования может быть идентифицирована с задачей выбора информационного кадра при записи и считывании. Поскольку выбор кадра выполняется электромеханическими средствами (к сожалению, пока не существует электроннооптических средств сканирования больших площадей носителя), получаемая при этом точность позиционирования может оказаться недостаточной, особенно при аналоговой регистрации. В связи с этим может потребоваться 2-я ступень позиционирования относительно начальной линии (или линий) сканирования. Индикатор положения сканирующего лазерного луча относительно начальной линии сканирования может быть выполнен, например, с использованием 2-х фотодиодов [Пат. 3812371, США], расположенных симметрично относительно линии сканирования на малом расстоянии от нее. Момент начала сканирования фиксируется по разности амплитуд сигналов на выходах указанных фотодиодов.

В ряде случаев задания начальной линии сканирования может оказаться недостаточно, поскольку вследствие влияния внешних дестабилизирующих факторов (температуры, напряжения питания и т. д.) может изменяться крутизна характеристики управления дефлектора, т. е. коэффициент преобразования управляющего (региструемого) сигнала в угол отклонения луча. При этом наряду с позиционированием начального положения луча необходимо выполнять позиционирование луча при максимальном угловом отклонении. Для такой калибровки на носителе делают линии, определяющие нижнюю и верхнюю границы кадра записи по оси ординат (аналогичное ограничение кадра записи, при необходимости, может быть выполнено и по оси абсцисс). Калибровку производят следующим образом. Сначала лазерный луч сканируют вблизи нижней границы кадра записи, вводя аддитивное смещение по управляющему сигналу (амплитуде или частоте), до совпадения с ней, после чего сигнал смещения фиксируют. Затем управляющий сигнал скачкообразно изменяют на величину, соответствующую расчетному отклонению луча на полный размер кадра записи. Сканирование вблизи верхней границы кадра записи выполняют путем изменения крутизны характеристики управления дефлектора, например, за счет регулировки коэффициента передачи масштабного преобразователя в цепи управляющего сигнала (управляемого делителя напряжения или частоты). При совпадении луча с верхней границей кадра записи коэффициент передачи масштабного преобразователя фиксируется. Регулировка масштабного преобразователя может влиять на начальное положение луча. Поэтому после калибровки по верхней границе кадра записи может потребоваться повторная калибровка по его нижней границе, ее производят методом последовательных приближений. Индикация совпадения положения луча с выполненными на носителе линиями может быть реализована с помощью установленных за носителем фотоприемников или расположенных вдоль направления перемещения носителя световодов, сведенных к соответствующим фотоприемникам.

Описанный способ калибровки обладает определенной универсальностью, однако вследствие неизбежной потери быстродействия калибровку в каждом кадре записи целесообразно выполнять однократно, сохраняя запомненные калибровочные значения управляющих сигналов в течение всего цикла записи в данном кадре. Поэтому становятся ясными метрологические ограничения: стабильность запоминающих устройств и параметров дефлектора должна быть такой, чтобы в течение указанного интервала времени погрешность позиционирования не превышала допустимую. Длительность интервала записи кадра определяется количеством отсчетов (перфораций) в кадре и частотой следования импульсов лазера.

Сложность реализации описанного метода автокалибровки заключается в необходимости специальной подготовки носителя — прожигания линий, ограничивающих кадры записи, а также в сложности регулировки (схема автокалибровки по существу является компенсационной с двумя контурами регулирования). Для упрощения калибровки можно использовать прожигание в каждом кадре нулевой линии сканирования (горизонтальная развертка при отсутствии информационного управляющего воздействия на дефлектор) и выполнение контрольного отсчета по предельному отклонению (перфорация точки или ряда точек при максимальном управляющем

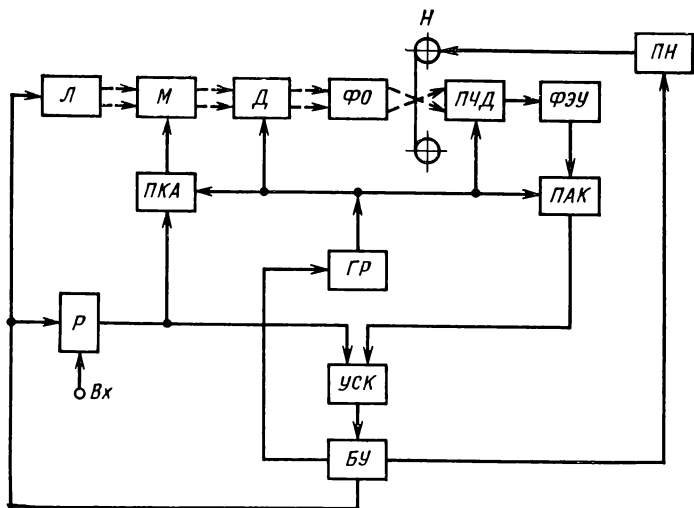


Рис. 61. Лазерный микрорегистратор с синхронной записью и считыванием:

Л — лазер; М — модулятор; Д — дефлектор (акустооптический); ФО — фокусирующая оптика; Н — носитель; ПН — привод носителя; ПЧД — позиционно-чувствительный датчик (акустооптический); ФЭУ — фотоэлектронный усилитель; ГР — генератор развертки; ПКА — преобразователь код-аналог; ПАК — преобразователь аналог-кода; Р — входной регистр; УСК — устройство сравнения кодов; БУ — блок управления

воздействии на дефлектор). При этом не нужны предварительная подготовка носителя и компенсационное преобразование, однако, во-первых, необходим некоторый дополнительный расход носителя, учитывающий вариацию размеров кадра, и, во-вторых, усложняется считывание, поскольку контрольный (калибровочный) размер, а также положение нулевой линии, вообще говоря, могут изменяться от кадра к кадру. При визуальном считывании это не имеет существенного значения, так как при правильной компоновке информации в кадре (например, гистограммы) оператора интересует сопоставление между собой именно отсчетов, относящихся к одному кадру записи. При автоматическом считывании это ограничение более существенно ввиду того, что изменение размера кадра при записи определяет необходимость изменения масштаба при считывании. Поэтому для автоматического считывания не могут быть использованы позиционно-чувствительные фотоприемники (ПЧФ) с фиксированным форматом кадра (например, матричные и вообще дискретные). Следовательно, при графической микрозаписи для автоматического считывания, независимо от характера позиционирования при записи, необходимо использовать не дискретные, а аналоговые ПЧФ или дискретные ПЧФ с разрешающей способностью большей, чем дискретность записи. Последняя рекомендация может быть распространена и на автоматическое считывание буквенно-цифровых знаков с дополнительным ограничением: каждому

знакомству в кадре считывания должен соответствовать отдельный ПЧФ. Для считывания графической микрозаписи достаточно иметь по одному линейному ПЧФ для каждого отсчета или один двухкоординатный ПЧФ для всего кадра записи. Далее следует отметить, что в варианте графической микрорегистрации более жесткие требования предъявляются не только к позиционированию, но и к стабильности размеров перфорационных отверстий. В работе [25] показано, что при перфорировании отверстий диаметром порядка единиц мкм в тонких (порядка 0,5 мкм) пленках легкоиспаряющихся металлов (висмут, цинк, сурьма) размеры отверстий имеют значительный случайный разброс, а также недостаточную долговечность; использование тонких (до 5 мкм) защитных слоев диэлектрика с низкой температурой размягчения (полистирол, поливинилацетат, полиметилметакрилат) позволяет повысить долговечность записи и стабилизировать размеры отверстий при увеличении в 1,5—2,5 раза энергетических затрат.

В заключение отметим, что аналоговые методы синтеза и анализа изображений целесообразно использовать как при графическом, так и при дискретном (буквенно-цифровом) представлении информации: эти методы при снижении быстродействия обеспечивая упрощение реализации и однозначность считывания.

Простота аналоговых методов и средств синтеза и анализа знаков может быть проиллюстрирована блок-схемой, показанной на рис. 61. При поступлении с регистра P кода очередного знака $ПКА$ преобразует его в аналоговый сигнал, управляющий модулятором M синхронно с пространственной разверткой луча, выполняемой дефлектором D . В реальном масштабе времени, т. е. в соответствии с прожигаемым контуром знака, $ПЧД$ преобразует оптический сигнал в электрический и путем синхронного детектирования с использованием выходного сигнала $ГР$ — снова в код регистрируемого знака. Устройство сравнения кодов $УСК$ фиксирует правильность формирования знака и вырабатывает (через $БУ$) импульсы смены кода в регистре P и подачи очередного импульса излучения L , а в случае несовпадения кодов записи и считывания входной код в P не обновляется. Те же импульсы служат для подсчета количества сформированных знаков в $БУ$ и управления $ГР$ для выполнения строчной развертки в пределах кадра записи и считывания, а после заполнения кадра — для выработки команды на $ПН$ о перемещении носителя. Таким образом, здесь реализуется синхронная микрозапись и считывание с автоматическим контролем правильности регистрации.

Подведем итоги проведенного рассмотрения и выскажем авторскую точку зрения по поводу современного состояния и перспектив использования средств оптоэлектроники в измерительной технике. Несомненно, авторская позиция так или иначе отражена в самом содержании книги, однако в значительной степени характер изложения определялся не вкусами или интересами авторов, а степенью разработки тех или иных аспектов применения средств оптоэлектроники в измерительной технике. Неравномерность распределения объема книги по главам является прямым следствием и косвенным свидетельством того, что степень разработки оптоэлектронных средств электроизмерительной техники в целом уступает глубине исследований оптоэлектронных средств функционального преобразования и обработки информации, а последняя, в свою очередь, уступает степени разработки средств отображения информации, в особенности средств визуальной индикации. Однако сложившееся положение дел не является неизменным, и наряду с его констатацией требуется, по возможности, прогнозировать пути дальнейшего развития соответствующих приложений. Кроме того, в рамках сложившихся областей применения средств оптоэлектроники целесообразно выделить те перспективные направления исследований и практических разработок, которые в настоящее время развиваются наиболее быстрыми темпами и в обозримом будущем обещают наиболее существенные результаты. К сожалению, имеющиеся в нашем распоряжении данные не дают оснований для долгосрочных прогнозов, да и кратковременный прогноз, в силу ограниченности учитываемых факторов, не может быть абсолютно достоверным. Тем не менее высказываемые здесь соображения по этому поводу, как мы надеемся, окажутся объективно полезными и помогут концентрировать усилия исследователей на наиболее существенных проблемах.

Среди многочисленных приложений средств оптоэлектроники в электроизмерительной технике, описанных в гл. 1, наиболее массовым и эффективным является использование развязывающих и коммутирующих оптронов в цепях с частотно-временными преобразованиями, в том числе в цепях модуляции — демодуляции. Уже сейчас развязывающие и коммутирующие оптроны наряду с импульсными разделительными трансформаторами широко используются в интегрирующих цифровых приборах с высоким коэффициентом подавления помех общего вида. Эти приложения, несомненно, расширятся при промышленном освоении высоковольтных оптронов, обеспечивающих высокую эффективность передачи оптического сигнала при помощи световодов, служащих одновременно изолирующей средой. Частотный диапазон передаваемых электрических сигналов будет увеличиваться по мере повышения быстродействия оптронов. Помимо измерительных задач и ближней телеметрии, развитие данного направления будет также в значительной степени стимулироваться потребностями техники связи и, в частности, совершенствованием оптических линий связи.

Измерительные приборы с подвижными частями и оптоэлектронным кодированием перемещения указателя в дальнейшем, по-видимому, не получат сколько-нибудь значительного развития и будут использоваться только в области неэлектрических измерений (раст-

ровые и другие кодирующие преобразователи линейных и угловых перемещений). Впрочем, и здесь механические способы сканирования постепенно уступят место электронным и оптоэлектронным: в последнем случае на взаимно перемещаемых объектах устанавливаются миниатюрные излучатели (например, светодиодные) и позиционно-чувствительные фотоприемники (например, сканисторные). В электроизмерительной технике электромеханические преобразователи и показывающие приборы по всем существенным показателям (чувствительность, разрешающая способность, стабильность, надежность) уже уступают прецизионным электронным или магнитным (в частности, магнитомодуляционным) преобразователям.

Единственное преимущество электромеханических приборов — аналоговая индикация по отклонению указателя — также не является решающим, поскольку уже созданы и продолжают развиваться дискретно-аналоговые показывающие приборы с электронно-оптическими шкалами, синтезируемыми из отдельных элементов, разнесенных в пространстве. Именно с помощью этого класса приборов возможно осуществить одно из наиболее революционных преобразований в электроизмерительной технике — заменить традиционные щитовые показывающие приборы, номенклатура и области применения которых чрезвычайно широки и многообразны.

Свидетельством интенсивных исследований и разработок, ведущихся в этом направлении зарубежными фирмами, может служить недавно опубликованная обзорная статья [82]. Как указывает автор статьи, разработки ведутся широким фронтом как приборостроительными фирмами, так и фирмами-изготовителями электронных компонентов, причем каждая фирма пытается воспроизводить электроннооптические линейчатые шкальные индикаторы в соответствии со своей специализацией и опытом изготовления индикаторных элементов. Так, фирма Marconi Canadian Co (Канада) воспроизводит линейчатые индикаторы на лампах накаливания; фирмы (США): Simpson Electric Co — на светодиодах; North Hills Electronics Inc. — на жидких кристаллах; Burroughs, Sighma Instr. Inc., Beckman и Varian Assoc. — на газоразрядных элементах; фирма Smith Ind. Ltd (Англия) в сотрудничестве с фирмой Phosphor Products Ltd — на электролюминесцентных панелях. В нашей стране разработки дискретно-аналоговых приборов с электроннооптическими шкалами ведутся Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроизмерительных приборов (ВНИИЭП), а первые промышленные модели подобных приборов освоены заводом «Точэлектроприбор» (г. Киев) и Витебским заводом электроизмерительных приборов им. 60-летия Великого Октября, многоканальные измерительные приборы с линейными газоразрядными индикаторами — Омским заводом «Электроточприбор». Разработаны и подлежат внедрению электроннооптические шкалы на светодиодных, жидкокристаллических и электролюминесцентных индикаторах.

В отношении номенклатуры измеряемых параметров, классов точности, пределов измерений подобные приборы пока недостаточно совершенны, однако по ряду эксплуатационных характеристик (вибро- и ударопрочность, устойчивость к механическим и климатическим воздействиям) они уже успешно конкурируют с электромеханическими приборами. До полного вытеснения простых и дешевых электромеханических приборов электроннооптическими пока еще далеко, и на этом пути предстоит преодолеть немало организационных и технических трудностей, однако перспективность разработки

и широкого промышленного выпуска электроннооптических приборов без подвижных механических частей несомненна и должна учитываться при долгосрочном планировании и финансировании исследовательских работ. Можно отметить, что решение данной проблемы не сводится к разработке различных электроннооптических шкал. При этом необходимо учитывать конструктивные и параметрические особенности выпускаемых в настоящее время электромеханических показывающих приборов, т. е. наряду с технологическими вопросами создания шкальных индикаторов в решении данной проблемы важное значение имеют конструктивный и схемотехнический аспекты. Именно поэтому центр проблемы лежит не в области техники индикации, а в области электроизмерительной техники в целом.

Среди многочисленных приложений средств оптоэлектроники в функциональном преобразовании и обработке информации, описанных в гл. 2, наиболее массовым и общедоступным является построение аналоговых функциональных преобразователей на элементарных оптронах. Однако, несмотря на интенсивное развитие методов анализа и синтеза цепей на элементарных оптронах, инженерные расчеты простейших функциональных преобразователей (умножителей, квадраторов и др.) по характеристикам входящих в них оптронов пока еще встречают значительные затруднения. При этом основные затруднения связаны не со сложностью аналитических выражений, а с нестабильностью и невоспроизводимостью характеристик оптронов, обусловленными значительным технологическим разбросом их параметров, а также влиянием факторов окружающей среды (температура, напряжение питания и др.). Поэтому следует полагать, что простые устройства прямого преобразования, базирующиеся на использовании различных нелинейных участков характеристик оптронов, найдут применение только в грубых измерительных преобразователях и устройствах автоматики, а для получения более или менее удовлетворительных метрологических характеристик потребуются параметрические функциональные преобразователи на основе мостовых и других компенсационных схем, в том числе со стабилизацией светового потока (см. рис. 17, 18 и др.). Основной принцип стабилизации характеристик таких преобразователей заключается в использовании параллельных каналов преобразования с идентичными оптронными элементами. Этот принцип является наиболее общим и эффективным: параметрическая стабилизация по одному влияющему фактору — температуре, напряжению питания и т. п. — с одной стороны, дает более частный результат, а с другой стороны, компенсация почти всегда имеет значительную невоспроизводимость из-за различия характеристик оптронов и компенсирующих электронных компонентов в широком динамическом диапазоне. Использование идентичных оптронных элементов обеспечивает компенсацию всех дестабилизирующих факторов одновременно, и ее точность определяется только воспроизводимостью технологии изготовления оптронов, причем частую оптронные элементы могут быть изготовлены в одном технологическом цикле (на общей подложке, при нанесении покрытия или травлении через общий трафарет), что облегчает изготовление элементов с идентичными характеристиками.

Арифметические дискретные функциональные преобразователи (умножители, сумматоры) проще всего реализуются в виде двухмерных матричных оптронов с электронно-лучевой адресацией. На

основе подобных одноразрядных десятичных умножителей и сумматоров с $10 \times 10 = 100$ адресуемых элементов легко строятся оптоэлектронные микропроцессоры для вычисления интегральных характеристик периодических сигналов (эффективное значение, активная мощность и др.), в которых точность выполнения математических операций определяется числом разрядов, точностью задания табличных значений функции и точностью суммирования результатов одноразрядного умножения или суммирования. При трех-, четырехразрядном десятичном представлении, а также использовании прецизионного источника опорных напряжений, прецизионных операционных усилителей и аналоговых запоминающих устройств погрешность функционального преобразования не превышает 0,05—0,1%, а быстродействие при обработке мгновенных значений периодических сигналов промышленных частот (50 Гц) может быть порядка 1 периода сигнала (20 мс). Количество используемого оборудования при последовательной поразрядной обработке соизмеримо с затратами оборудования в соответствующих электронных микропроцессорах (например, с использованием преобразователей напряжения в частоту). Таким образом, оптоэлектронные микропроцессоры на основе матричных оптронов с электронно-лучевой адресацией в целом сравнимы с электронными аналогами и могут рассматриваться по отношению к ним как альтернативное техническое решение. Элементной базой таких микропроцессоров могут служить малогабаритные ЭЛТ с матрицами фотоприемников, выпуск которых уже освоен отечественной промышленностью. Поскольку возможности спектрального согласования ЭЛТ с матричными фотоприемниками и получения необходимого быстродействия еще нуждаются в экспериментальной проверке, о перспективности подобных оптоэлектронных микропроцессоров можно говорить пока только предположительно. Косвенным подтверждением перспективности такого подхода к построению микропроцессоров может служить недавно опубликованная информация о создании высокоэффективного ЗУ на основе матрицы МОП — структур с электронно-лучевой адресацией [72].

Электроннооптические преобразователи с электрооптическими, магнитооптическими и акустооптическими модуляторами и дефлекторами света до сих пор использовались в измерительной технике только как специализированные измерители высоких напряжений, больших токов и малых деформаций. При этом, как правило, стремились линеаризовать модуляционную или дефлекторную характеристику вблизи рабочей точки, задавая соответствующие смещения управляющих сигналов. Применительно к функциональному преобразованию наибольший интерес представляет режим нелинейной модуляции, реализуемый при низких и средних уровнях сигналов, управляющих электрооптическими, магнитооптическими и акустооптическими модуляторами света. В этом режиме указанные модуляторы являются быстродействующими и широкополосными квадраторами мгновенных значений напряжения и тока, что открывает возможность их использования в преобразователях эффективных значений и активной мощности детерминированных и статистических сигналов. Наиболее перспективны преобразователи этого типа, использующие компенсационные схемы с идентичными модуляторными ячейками и интегрирующими устройствами сравнения (см. рис. 20, 22): их преимуществом по сравнению с применяемыми в настоящее время компенсационными схемами (трансформаторами напряжения

и тока) является выполнение компенсации в среднем, благодаря чему устраняются динамические погрешности преобразования и расширяется частотный диапазон преобразуемых сигналов. При обеспечении необходимой чувствительности (чему способствует работа в одной точке модуляционной характеристики, соответствующей предельному значению преобразуемого сигнала) подобные модуляционные преобразователи могут быть использованы для построения широкополосных вольтметров и амперметров эффективных значений сигналов, спектр которых охватывает область от инфразвуковых до ультразвуковых частот.

В ультразвуковых дефлекторах с фазовым управлением может быть получено сканирование светового луча, перемещение которого пропорционально углу сдвига фаз между двумя управляющими сигналами. Если далее снова преобразовать (с помощью дифракционного позиционно-чувствительного акустооптического датчика) перемещение луча в угол сдвига фаз двух сигналов фиксированной частоты, то в результате получится преобразование угла сдвига фаз сигналов изменяющейся частоты в угол сдвига фаз на фиксированной частоте. Поскольку изменение частоты может происходить в ультразвуковом диапазоне, а фиксированная частота может быть выбрана в звуковом диапазоне, подобные акустооптические преобразователи могут быть использованы для построения широкополосных фазометров.

Таким образом, электрооптические, магнитооптические и акустооптические модуляторные и дефлекторные электроннооптические функциональные преобразователи представляют наибольший интерес для создания широкополосных вольтметров, амперметров и фазометров, охватывающих область ультразвуковых частот. Эти приборы, несомненно, имеют более широкую область применения, чем специализированные измерители высоких напряжений и больших токов в линиях электропередач, что и определяет перспективность исследования и разработки указанных преобразователей.

Оптоэлектронные функциональные преобразователи представляют собой различные модификации позиционно-чувствительных фотоприемников, среди которых наибольший интерес представляют фотоприемники с большой апертурой входного луча — функциональные фотопотенциометры и фоторезисторы, матричные фотоприемники, полупроводниковые сканисторы. Последние за счет снижения быстродействия обеспечивают сокращение межсоединений и при надлежащем усовершенствовании совмещают время-импульсное и кодо-импульсное преобразование перемещений, а также индикацию состояний. Особый интерес представляют дифракционные акустооптические позиционно-чувствительные фотоприемники, которые совместно с акустооптическими дефлекторами составляют функциональные преобразователи, обладающие как параметрической, так и структурной однородностью.

Среди перечисленных фотоприемников сканисторные обеспечивают наибольшую точность, а матричные — точность и быстродействие, акустооптические — удобство последовательного считывания контурных изображений (в задачах распознавания) и получение периодических функциональных зависимостей. В принципе, все перечисленные преобразователи могут быть двухмерными. В электронизмерительной технике оптоэлектронные преобразователи самостоятельного значения не имеют и должны рассматриваться как вторичные звенья однородных оптронных преобразователей, первич-

ные звенья которых являются дефлекторными электроннооптическими преобразователями, либо как устройства считывания и распознавания в электроннооптических устройствах отображения (индикации, регистрации).

Универсальные оптронные преобразователи представляют собой однородные структуры, имеющие в своем составе электроннооптические и оптоэлектронные преобразователи. В принципе, здесь возможны любые сочетания указанных преобразователей, однако наиболее перспективны сочетания акустооптических дефлекторов со сканисторными, матричными и акустооптическими позиционно-чувствительными фотоприемниками. Универсальность таких преобразователей определяется параметрической однородностью, в отдельных случаях — структурной однородностью, возможностью реализации как аналоговых, так и дискретных функциональных преобразований, двумерностью, наличием визуальной индикации состояний. В связи с этим подобные преобразователи можно рассматривать как многозначные или многостойчивые элементы, которые могут найти широкое применение в многозначных структурах. При этом сканисторные функциональные преобразователи в связи с динамическим (время-импульсным) считыванием легко сопрягаются с электронными динамическими многозначными элементами, представляющими собой сочетания преобразователей «напряжение—фаза» и «фаза—напряжение». При таком сопряжении (см. рис. 28) благодаря режиму памяти в динамических многозначных элементах обеспечивается устранение неоднозначности при аналого-дискретном преобразовании. В универсальных преобразователях с двухмерным дефлектором и матрицей фотоприемников (см. рис. 29) многозначные преобразования двух переменных реализуются значительно проще, чем в электронных структурах, поскольку двухмерная адресация с помощью дефлектора при значности k заменяет $2k$ пороговых элементов и дешифратор на k^2 состояний.

Наиболее перспективные приложения универсальных функциональных преобразователей (см. рис. 28, 29) — микропроцессоры, а также устройства анализа и синтеза изображений, применяющиеся в распознающих автоматах и системах отображения. Фактическое применение этих преобразователей определяется освоением соответствующей элементной базы. В качестве типовых элементов могут быть предложены сканисторные преобразователи с $k=100$ дискретных ячеек и матричные преобразователи с $k=10 \times 10$ элементов, что позволит реализовать на их основе поразрядные десятичные умножители и сумматоры соответственно с последовательной и параллельной обработкой.

Аналоговые оптронные функциональные преобразователи, в том числе преобразователи с акустооптическими модуляторами и дефлекторами света, имеют достаточно широкие функциональные возможности. Их можно использовать в приборах для измерения эффективных значений (дисперсии), активной мощности (функции взаимной корреляции), угла сдвига фаз и других параметров в широком диапазоне частот. Однако вследствие влияния ряда дестабилизирующих факторов такие преобразователи имеют недостаточную для ряда приложений точность преобразования. С другой стороны, использование (для устранения влияния указанных факторов) компенсационных схем снижает быстроту действия таких преобразователей. В связи с этим представляют интерес различные методы и средства коррекции оптронных преобразователей. Их однородность,

а также медленный характер изменения дестабилизирующих факторов определяют возможность коррекции быстродействующих оптронных преобразователей прецизионными электронными преобразователями, например, путем автокалибровки по тестовым сигналам (частный вариант метода настраиваемых моделей). При наличии нескольких дестабилизирующих факторов (неинформативных параметров) соответствующие корректирующие воздействия могут вводиться в такте автокалибровки последовательно, а в рабочем такте может использоваться дополнительная коррекция по методу обратного функционального преобразователя, как показано на схеме рис. 30.

В заключение этого краткого анализа отметим, что внедрение в измерительную технику различных оптронных функциональных преобразователей, описанных в гл. 2, в целом весьма перспективно и соответствует общей тенденции широкого использования микропроцессоров в измерительных приборах и системах. В подтверждение этого вывода сошлемся на интенсификацию исследований и разработок по приборам с использованием вероятностных принципов (например, метода Монте-Карло), которые, в отличие от традиционных приборов, по существу представляют собой микропроцессоры [95], а также на опыт ряда зарубежных приборостроительных фирм (например, фирмы John Fluke) по применению микропроцессоров в измерительных приборах, в том числе для выполнения автокалибровки по тестовым сигналам и автоматического введения поправок [80]. Микропроцессорное направление (методы обработки дискретизированных и квантованных значений) развивается и в отечественном приборостроении, например, для измерения интегральных характеристик периодических сигналов [62].

Описанные в гл. 3, 4 книги методы и средства индикации и регистрации, при общем весьма интенсивном развитии, в измерительной технике внедряются весьма неравномерно. Наибольшее применение в настоящее время получили: в цифровых часах и переносных цифровых мультиметрах (тестерах) — жидкокристаллические и светодиодные индикаторы, в стационарных приборах и системах — электролюминесцентные, катодолуминесцентные, накаливаемые и газоразрядные индикаторы. Ожидается широкое использование в переносных приборах электрохромных индикаторов, а в стационарных приборах и системах — электронно-лучевых индикаторов. Для жидкокристаллических (вообще отражательных) индикаторов следует отметить тенденцию к использованию устройств с регулируемым соотношением яркости индицируемых знаков и фона в зависимости от уровня освещенности, в том числе, с подсветкой индикатора в темное время суток (например, с помощью внутреннего радиоактивного источника [Пат. 578187, Швейцария]). В плане поиска новых и усовершенствования существующих индикаторов следует отметить перспективность комбинирования ряда известных индикаторных и управляющих электроннооптических элементов и оптических сред (модуляторов, световодов и т. д.); в плане повышения надежности знаковинтегрирующих индикаторов — перспективность использования избыточных (например, 9-сегментных) алфавитов и избыточных дешифраторов для управления цифровыми и буквенными знаками с целью обнаружения и исправления одичных отказов. Помимо этого отметим общую тенденцию к широкому использованию в измерительной технике экранных пультов (дисплеев) с выводом на большой экран значительного объема ин-

формации измерительного и служебного характера, а также к использованию работающих в реальном масштабе времени микрорегистраторов с большой плотностью записи информации и высоким быстродействием. Указанную общую тенденцию можно объяснить, во-первых, быстрым усложнением измерительных приборов, широким использованием в них микропроцессоров и необходимостью наглядного отображения результатов многомерного преобразования в виде графиков, диаграмм, таблиц, спектров и т. п. Во-вторых, в связи с применением цифровых электроизмерительных приборов в многоканальных системах сбора и обработки информации возрастает актуальность многоканальной индикации и регистрации в виде гистограмм или кодированных (цифровых) отсчетов, причем в случае использования указанных данных для последующей обработки существенное значение приобретает плотность компоновки данных на носителе и быстродействие в режимах записи и считывания. Наметившаяся тенденция к агрегатированию измерительных и вычислительных средств, с одной стороны, и средств отображения, с другой стороны, столь явственна, а потребность в системах сбора, обработки и регистрации информации настолько значительна, что некоторые зарубежные фирмы уже приступили к разработке и освоению подобных агрегатов. В качестве примера можно указать на разработанный фирмой Kontron Electronic GmbH комбинированный прибор Calcu-meter, совмещающий в себе многофункциональный измерительный прибор (мультиметр), калькулятор и цифроречитательное устройство [64]. В перспективе следует ожидать появления агрегатированных цифровых информационно-измерительных систем, содержащих в своем составе многоканальное устройство сбора информации, микропроцессор, дисплей и микрорегистратор, управляемые общим контроллером, в функции которого может входить также управление считыванием данных в микрорегистраторе и вводом их в буферные ЗУ внешних ЦВМ.

В настоящее время экранные пульты (дисплеи) строят главным образом на базе ЭЛТ; кроме того, разрабатывают также твердотельные экраны на светодиодах и газоразрядных (плазменных) индикаторных панелях. В перспективе экранные пульты можно выполнять на базе лазерно-лучевых индикаторов, имеющих ряд преимуществ перед электронно-лучевыми: высокая яркость и контрастность, возможность получения цветных изображений (на фотохромных носителях) и запоминания информации (на термопластиках и эластомерах), возможность изменения цвета и усиления яркости изображения при репродуцировании и проч. Пока в разработке и изготовлении лазерно-лучевых индикаторов имеются значительные трудности: методы управления лазерным лучом еще недостаточно эффективны, материалы дефицитны, схемы управления и конструкции сложны и дороги. В связи с этими трудностями прогресс в данной области будет медленным, но неуклонным. Наиболее вероятный срок промышленного освоения и широкого использования лазерных дисплеев — середина 80-х годов.

В настоящее время в качестве регистраторов в измерительных приборах и системах используются электромеханические перфораторы и цифроречитательные устройства, а также перьевые самописцы и магнитографы, в отдельных случаях — электронно-лучевые регистраторы на специальную фотобумагу, чувствительную к УФ излучению люминофора, термографы с регистрацией на специальную термочувствительную бумагу и электростатические струйно-капель-

ные регистраторы. Все эти регистраторы неперспективны и в скором времени должны уступить место электроннооптическим микро-регистраторам, в том числе лазерным регистраторам на различных носителях с запоминанием информации (терромагнитные, термопластические, фотохромные и др.), а также лазерным микроперфораторам с прожиганием тонкопленочного покрытия на диэлектрической основе и лазерным устройствам микрофильмирования на фотопленках.

Развитие методов и средств неразрушающей записи на носители с памятью в значительной степени стимулируется совершенствованием голографических ЗУ, которые уже в настоящее время представляют собой наиболее перспективный класс ассоциативных ЗУ большого объема. Пока в ЦВМ используются макетные и опытные образцы таких ЗУ, однако уже в недалеком будущем они получат широкое промышленное применение. Тем не менее значительные технические трудности в записи и воспроизведении голограмм в реальном масштабе времени делают нецелесообразным использование голографических ЗУ в системах реального времени, к которым относится и большинство информационно-измерительных систем (исключая некоторые диагностические системы и системы распознавания образов). Как правило, в таких системах избыточны и устройства микрофильмирования, а также микроперфорации на механическом перемещаемом носителе. Если учесть высокую плотность регистрации и необходимость оперативного считывания и воспроизведения данных, то оптимальным вариантом микрорегистратора для таких систем будет устройство микроперфорации на отдельных пластинах (слайдах). При размерах перфорационного отверстия порядка 1 мкм на пластине размером 1 см² может быть записано около 10⁹ бит информации, что свидетельствует о нецелесообразности частой смены микроперфокарт.

Говоря о лазерных микрорегистраторах, мы имеем в виду не столько небольшие размеры самого регистратора, сколько малые размеры регистрируемых знаков и высокую плотность записи. Миниатюризация собственно регистраторов ограничивается размерами используемых лазеров, дефлекторов и оптических фокусирующих систем.

В знаковых микрорегистраторах основная проблема заключается в считывании и распознавании знаков, а в графических микро-регистраторах — в точном позиционировании при записи и считывании. Возникающие в этом случае технические трудности вполне преодолимы, и можно ожидать, что промышленное освоение микро-регистраторов с лазерной перфорацией начнется уже в первой половине 80-х годов, однако их применение может быть экономически выгодным только в крупных системах с большим массивом регистрируемых данных. В заключение отметим, что в схемах управления лазерными индикаторами и регистраторами (соответственно рис. 52 и 61) должны быть учтены требования синхронизации записи и считывания, а также модуляции и отклонения записывающего луча при необходимости — перемещения носителя или выбора кадра записи.

1. Антонова И. Н., Мировицкий Л. И., Титов А. И. Обработка ненормированных электрических сигналов в оптических корреляторах.— В межвуз. сб.: Проблемы голографии. Вып. IV. М., МИРЭА, 1974, с. 95—102.
2. Архивная память, разработанная Precision Instr. Co.— Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 1, с. 15—16.
3. Байбородин Ю. В., Гаража С. А. Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М., Машиностроение, 1967, 79 с.
4. Бахмутский В. Ф., Гореликов Н. И., Кузин Ю. Н. Применение оптоэлектронных элементов в измерительной технике (обзор). М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1975, 54 с.
5. Бахмутский В. Ф., Гореликов Н. И., Кузин Ю. Н. Состояние и перспективы использования средств оптоэлектроники в измерительной технике (обзор). М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1974, 84 с.
6. Бахмутский В. Ф. Универсальные цифровые измерительные приборы и системы.— Измерения, контроль, автоматизация, 1975, № 2(4). с. 3—12.
7. Бахмутский В. Ф., Якушев В. С. Дешифраторы для сегментных индикаторных структур.— Приборы и системы управления, 1978, № 7, с. 28—31.
8. Бердичевский М. Г. Принципы построения электроизмерительных приборов непосредственной оценки с дискретным выходом (обзор по материалам зарубежной печати).— Приборы и системы управления, 1970, № 12, с. 34—36.
9. Берковская К. Ф., Подласкин Б. Г. Коммутируемые функциональные устройства типа «сканистор» в системах оптоэлектронной обработки информации.— В сб.: Микроэлектроника. Вып. 5. М., Сов. радио, 1972, с. 48—64.
10. Богославский Г. Е., Ситников Л. С., Утяков Л. Л. Измерительные приборы с оптоэлектронными шкалами и кодовым выходом.— Измерительная техника, 1972, № 5, с. 56—60.
11. Ван Раальт. Новая светоклапанная система для проекции на большой экран.— Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 12, с. 90—98.
12. Векслер М. С. Измерительные приборы с электростатическими механизмами. Л., Энергия, 1974, 176 с.
13. Вистинь Л. К., Чистяков И. Г. Жидкие кристаллы. М., Знание, 1975, 64 с.
14. Вистинь Л. К., Чистяков И. Г. Приборы и системы управления на жидких кристаллах.— Приборы и системы управления, 1975, № 3, с. 19—23.
15. Власенко Н. А. Электролюминесцентные пленки как источник света для целей оптоэлектроники.— В респ. межвед. сб.: Полупроводн. техника и микроэлектроника. Киев, ИПАН УССР, 1973, № 13, с. 93—101.
16. Возможности оптоэлектроники в микроминиатюризации электронной контрольно-измерительной аппаратуры.— Приборы и

системы управления, 1973, № 8, с. 13—18. Авт.: О. С. Арутюнов, В. Ф. Бахмутский, Н. И. Гореликов, В. Д. Зотов.

17. Вульф. Перспективные создания электрохромных индикаторов.— Электроника (рус. пер.), 1973, № 25, с. 70—74.

18. Газоразрядный индикатор с цифрами высотой 25 мм.— Электроника (рус. пер.), 1975, № 5, с. 85.

19. Говоров В. С. Отображение машинных решений на экранах ЭЛТ. М., Сов. радио, 1975. 192 с.

20. Гордон, Андерсон. Новые устройства отображения. Редакционная точка зрения.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 7—16.

21. Гош. Цифровой индикатор, управляемый одной МОП ИС.— Электроника (рус. пер.), 1972, № 3, с. 7—8.

22. Данилов В. Г., Мелехов Г. И. Матричный плазменный индикатор.— Приборы и системы управления, 1974, № 4, с. 42—43.

23. Двухкоординатный самописец с лазерным пером.— Электроника (рус. пер.), 1972, № 6, с. 69—71.

24. Деркач В. П., Стринжа М. В. Современные устройства отображения видеoinформации в автоматизированных системах управления.— В сб.: Техника индикации. Киев, Наукова думка, 1976, с. 3—24.

25. Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Исследование металлодиэлектрических матриц при термической перфорационной записи лазерным лучом.— Изв. вузов, приборостр., 1973, № 8, с. 106—109.

26. Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А. Чувствительность матриц памяти при перфорационной записи лазерным лучом.— Известия вузов, приборостроение, 1969, № 4, с. 120—125.

27. Джилет, Кросби. Цифровой мультимер на К/МОП-приборах и жидких кристаллах.— Электроника, 1973, № 25, с. 24—30.

28. Евтихийев Н. Н., Цветаев К. П., Левинсон Г. Р. Особенности разработки лазерной микропечати.— В межвуз. сб.: Проблемы голографии, вып. IV, М., МИРЭА, 1974, с. 209—213.

29. Егорова Л. В., Рахманов В. Ф. Картинные элементы и устройства для параллельной обработки информации.— В сб.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М., Наука, 1975, с. 145—152.

30. Елинсон М. И. Оптоэлектроника. М., Знание, 1977, 64 с.

31. Зотов В. Д. Полупроводниковые устройства восприятия оптической информации. М., Энергия, 1976, 150 с.

32. Иванов Б. В., Иванов Г. И., Сердюк В. В. Методы когерентного корреляционного анализа случайных процессов и их аппаратная реализация.— В сб.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М., Наука, 1975, с. 157—163.

33. Иванов В. Н., Иванов Р. Ф. Использование оптических управляемых сред в арифметическом устройстве.— В сб.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М., Наука, 1975, с. 153—157.

34. Индикаторные устройства на жидких кристаллах.— Приборы и системы управления, 1976, № 1, с. 49—50. Авт.: В. Ф. Бахмутский, З. Ю. Готра, В. В. Пархоменко, Л. М. Смеркло.

35. Исследование преимуществ когерентно-оптической обработки электрических сигналов.— В межвуз. сб.: Проблемы голографии. Вып. IV. М., МИРЭА, 1974, с. 84—95. Авт.: Л. И. Миrowsкий, Н. Н. Антонова, А. Н. Титов, И. В. Краснов.

36. Каган Е. З., Фролова М. Н. Методы построения электроиз-

мерительных приборов с электрооптическими шкалами.— Приборы и системы управления, 1976, № 1, с. 37—39.

37. Капустин А. П. Электрооптические и акустические свойства жидких кристаллов. М., Наука, 1973, 232 с.

38. Катодохромные материалы и их применение.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 159—177. Авт.: Фонэн, Горог, Хейман, Шидловски.

39. Катус Г. П. Объемное и квазиобъемное представление информации. М., Энергия, 1975. 368 с.

40. Катус Г. П. Оптико-электронная обработка информации. М., Машиностроение, 1973, 447 с.

41. Клюкин Л. М., Самодурова И. Д., Сонин А. С. Применение нематических жидких кристаллов для регистрации длинноволнового лазерного излучения.— Квантовая электроника, 1975, № 2, с. 173.

42. Коновалов С. М. Исследование фазового оптико-акустического датчика угловых перемещений.— В сб.: Актуальные вопросы технической кибернетики. М., Наука, 1972, с. 248—250.

43. Коновалов С. М. Оптико-акустические явления и некоторые возможности их использования в информационных системах.— В сб.: Оптимизация. Исследование операций. Бионика. М., Наука, 1973. с. 161—167.

44. Косарев А. И., Соколов В. К. Пространственно-временные модуляторы света.— Зарубежная радиоэлектрон., 1974, № 8, с. 59—81.

45. Кравцов Н. В., Чирков Л. Е., Поляченко В. Л. Элементы оптоэлектронных информационных систем. М., Наука, 1970, 224 с.

46. Кретулис В. С., Олексенко П. Ф., Свечников С. В. Оптоэлектронные преобразователи постоянного напряжения в переменное.— Измерительная техника, 1974, № 5, с. 50—53.

47. Крюгер, Пепперль, Шмидт. Электрооптические материалы для устройств дискретного отклонения светового пучка.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 235—254.

48. Кудрявцев В. Б., Лысенко А. П., Тищенко Н. М. Прецизионные преобразователи электрических сигналов и угловых перемещений на принципах квантовой магнитометрии. М., Энергия, 1971. 120 с.

49. Куземко В. С., Ситников Л. С., Утяков Л. Л. Об одной возможности создания средств отображения информации на основе термочувствительных материалов.— Приборы и системы управления, 1970, № 5, с. 45—47.

50. Лаврищев В. И., Свидзинский К. К. Проблемы построения электронно-оптических цифровых вычислительных устройств и систем.— В сб.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М., Наука, 1975, с. 52—71.

51. Лазерно-лучевая система записи и воспроизведения дискретной информации с голографической памятью.— В межвуз. сб.: Проблемы голографии. Вып. IV. М., МИРЭА, 1974, с. 194—202. Авт.: Н. Е. Евтихийев, Н. А. Замятина, Ф. М. Назаров, В. И. Проношкин, К. П. Цветаев.

52. Лазерные устройства для скоростной печати.— Электроника (рус. пер.), 1971, № 20, с. 13—20.

53. Ларах, Харди. Принцип действия и применение катодолуминофоров.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 144—158.

54. Лафнейн. Использование светоизлучающих диодов в детекторе нуля.— Электроника (рус. пер.), 1971, № 16, с.

55. **Лебнер.** Перспективы применения электролюминесцентных твердых материалов в системах индикации.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 46—79.

56. **Ли, Лорд.** МОП ИС и схема сдвига уровней в качестве устройства управления газоразрядным индикатором.— Электроника (рус. пер.), 1973, № 5, с. 54—60.

57. **Литвак И. И., Ломов Б. Ф., Соловейчик И. Е.** Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах. М., Сов. радио, 1975. 352 с.

58. **Лурье В. И., Кононенко В. И., Вергунас Ф. И.** Эксплуатационные характеристики матричного электролюминесцентного индикатора на основе пленок.— В сб.: Техника индикации, Киев, Наукова думка, 1976, с. 146—149.

59. **Лус.** Электронные цифровые наручные часы на К/МОП ИС с индикатором на жидком кристалле.— Электроника (рус. пер.), 1972, № 8, с. 34—41.

60. **Матвеев А. М.** Индикатор алфавитно-цифровой информации.— Приборы и системы управления, 1975, № 10, 42 с.

61. **Матричные** воспроизводящие устройства на жидких кристаллах.— ТИИЭР, 1971, № 11, с. 30—51. Авт.: Лекнер, Марлоу, Нестер, Талтс.

62. **Методы и средства цифровых измерений интегральных характеристик периодических сигналов (обзор).** М., ЦНИИТЭИ приборостроения. 1976, 62 с. Авт.: В. Ф. Бахмутский, Н. И. Гореликов, О. И. Чайковский, Р. З. Шептебань.

63. **Мировицкий Д. И., Евтихийев Н. Н.** Вычислительные устройства когерентной оптики.— В межвуз. сб.: Проблемы голографии. Вып. II. М., МИРЭА, 1973, с. 126—139.

64. **Мультиметр, калькулятор и принтер в одном приборе.**— Электроника (рус. пер.), 1976, № 6, с. 18—20.

65. **Некоторые** возможности использования принципов оптоэлектроники для совершенствования средств измерительной техники.— Измерительная техника, 1970, № 1, с. 5—9. Авт.: Г. Е. Богославский, А. А. Молчанов, П. Ф. Олексенко, С. В. Свечников, Л. С. Ситников, А. А. Тимченко, Л. Л. Утяков, А. М. Шарадкин.

66. **Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С.** Цифровые приборы с частотными датчиками. Л., Энергия, 1970, 424 с.

67. **Новый** класс устройств отображения информации — микропленочные электрохемохромные индикаторы.— В сб.: Техника индикации. Киев, Наукова думка, 1976, с. 33—39. Авт.: Ю. И. Малуяк, Л. И. Каданер, И. И. Гутник, Н. А. Гришина.

68. **Оптоэлектронный** измерительный прибор.— Приборы и системы управления, 1973, № 8, с. 25—27. Авт.: А. И. Апостолов, Г. Е. Богославский, К. Г. Борисов, Л. С. Ситников, Л. Л. Утяков.

69. **Ота, Ониси, Есияма.** Цифровая индикаторная панель с электрофоретическим изображением.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 40—45.

70. **Панельные** вакуумные катодолуминесцентные индикаторы на основе ненакаливаемого катода.— В сб.: Техника индикации. Киев, Наукова думка, 1976, с. 134—137. Авт.: А. С. Сухарьер, С. В. Загребнова, В. А. Осипов, Е. В. Осипов, Е. В. Холщевникова, В. М. Сучилин, В. М. Трусаков.

71. **Плазменные** панели, воспроизводящие полутоновое изображение.— Электроника (рус. пер.), 1971, № 10, с. 15—16.

72. **Полупроводниковое ЗУ** сверхбольшой емкости с электрон-

но-лучевой выборкой и сохранением информации при отключении питания.— ТИИЭР (рус. пер.), 1975, № 8, с. 166—178. Авт.: Хьюс, Лиммонд, Паркс, Эллис, Поссэйн, Уилсон.

73. **Портативный** тестер с батарейным питанием.— Электроника, (рус. пер.), 1973, № 25, с. 93.

74. **Потапов Б. М., Телешевский В. И.** Акустооптический преобразователь частоты — угол.— Приборы и техника эксперимента, 1974, № 4, с. 186—188.

75. **Престон К.** Когерентные оптические вычислительные машины. Пер. с англ. М., Мир, 1974. 399 с.

76. **Прикладная** электролюминесценция. М., Сов. радио, 1974. 416 с. Авт.: О. Н. Казанкин, И. Я. Лямичев, Ю. Н. Николаев, И. Н. Орлов, Ф. В. Сорокин, Н. И. Таборко.

77. **Применение** жидкокристаллических индикаторов в качестве автономных периферийных устройств информационно-измерительных систем.— В сб.: Техника индикации. Киев, Наукова думка, 1976. с. 246—251. Авт.: В. Ф. Бахмутский, З. Ю. Готра, Э. П. Дзисяк, В. В. Пархоменко, А. И. Скрипников.

78. **Разин Г. И., Щелкин А. П.** Бесконтактное измерение электрических токов. М., Атомиздат, 1974. 160 с.

79. **Саксон.** Газоразрядный индикатор в виде столбцовой диаграммы.— Электроника (рус. пер.), 1974, № 5, с. 24—31.

80. **Сантони.** Многоцелевой измерительный прибор на базе микропроцессора типа 8080.— Электроника (рус. пер.), 1976, № 17, с. 70—71.

81. **Сантони.** Портативный осциллограф-мультиметр.— Электроника (рус. пер.), 1975, № 4, с. 29—37.

82. **Сантони.** Электронные аналоговые линейчатые индикаторы.— Электроника (рус. пер.), 1976, № 15, с. 53—60.

83. **Сб.:** Оптическая обработка информации. М., Мир, 1966. 377 с.

84. **Свечников С. В., Смовж А. К.** Фотопотенциометры.— Приборы и системы управления, 1973, № 8, с. 20—23.

85. **Свечников С. В., Смовж А. К.** Функциональные фоторезисторы.— Приборы и системы управления, 1973, № 11, с. 31—35.

86. **Свечников С. В.** Элементы оптоэлектроники. М., Сов. радио, 1971, 272 с.

87. **Свидзинский К. К.** Элементная база когерентных оптических ЦВМ.— Электронная промышленность, 1973, № 6, с. 56—62.

88. **Синцов Б. Л., Лонинов Г. Д.** Перспективы развития дискретно-аналоговых приборов с электрооптическими шкалами.— Приборы и системы управления, 1976, № 1, с. 39—42.

89. **Ситников М. В.** Средства отображения информации на флуоресцирующих стеклах.— Приборы и системы управления, 1976, № 1, с. 53—54.

90. **Смоляров А. М.** Методы повышения надежности цифросинтезирующих индикаторов.— Управляющие системы и машины, 1974, № 4, с. 109—115.

91. **Смоляров А. М.** Некоторые пути повышения надежности знакосинтезирующих индикаторов.— В сб. Техника индикации. Киев, Наукова думка, 1976, с. 52—56.

92. **Схемы** автоматики с фоточувствительными и излучающими полупроводниковыми приборами. М., Энергия, 1972, 78 с. Авт.: В. Г. Воронин, А. К. Гребнев, А. И. Кривоносов, В. И. Русланов.

93. **Тейлор.** Устройство отображения на переходе жидкость — пар.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 2, с. 5—11.

94. **Тентер Ю. К., Черниговский В. В.** Применение лазеров в электроизмерительной аппаратуре.— Известия ЛЭТИ. Вып. 104, 1971, с. 7—9.

95. **Тумфарт.** Использование вероятностных принципов в новых измерительных приборах.— Электроника (рус. пер.), 1975, № 15, с. 32—39.

96. **Тэннер.** Схема на СИД для проверки правильности разводки напряжений питания.— Электроника, 1974, № 1, с. 78—79.

97. **Утида, Ниидзэки.** Материалы и методы акустооптического отклонения.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 8, с. 21—34.

98. **Хант.** Магнитооптика, лазеры и устройства памяти.— Зарубежная радиоэлектроника, 1971, № 2, с. 40—71.

99. **Хармон.** Матричный индикатор на элементах тлеющего разряда с саморазверткой.— Электроника (рус. пер.), 1970, № 5, с. 18—24.

100. **Царьков В. А., Борисов С. Я.** Оптоэлектронное устройство гальванического разделения входных и выходных цепей.— Приборы и системы управления, 1974, № 6, с. 41—42.

101. **Цветные** плазменные индикаторы.— Электроника (рус. пер.), 1971, № 6, с. 15—16.

102. **Цифровой** мультиметр, оборудованный пробником с индикатором на светоизлучающих диодах.— Электроника, 1972, № 2, с. 72—73.

103. **Цифровой** мультиметр с индикатором на жидком кристалле. Депонированная рукопись, М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1977. Авт.: В. Ф. Бахмутский, А. Б. Добровольский, А. И. Скрипников, В. В. Федоренко.

104. **Цифровые** электроизмерительные приборы. Под ред. В. М. Шляндина. М., Энергия, 1972. 400 с.

105. **Шлэм.** Электролюминофоры.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 118—127.

106. **Электролюминесценция** на постоянном токе в сульфиде цинка.— ТИИЭР (рус. пер.), 1973, № 7, с. 127—134. Авт.: Вект, Уэрринг, Эллис, Смит.

107. **Электронно-оптические** индикаторы для цифровых измерительных приборов и систем.— В сб.: Техника индикаций, Киев, Наукова думка, 1976, с. 239—246. Авт.: В. Ф. Бахмутский, А. И. Скрипников, В. С. Якушев, Т. В. Попова.

108. **Эстл.** Новый способ начертания 7-сегментных символов, исключающий ошибки при индикации.— Электроника (рус. пер.), 1972, № 18, с. 63—64.

109. **Ватанабэ, Акинори, Отагуро Макото.** Чернило-разбрызгивающие регистрирующие устройства.— Electron. Parts and Mater., 1973, № 12, 9.

110. **Der Einsatz von Glasfaserlichterleitern bei Datensystemen.** «Radio, Fernsehen, Elektronik», 1973, N. 9.

111. **Dixon R. W.** Acoustic diffraction in anisotropic media. «JEEE, QE-3», 1967, No. 2.

112. **Jaecklin A. A.** Measuring current at extra-high voltage. «Laser Focus», 1970, V. 6, p. 35.

113. **New laser-induced** electrical effect discovered. «IPRE Rev.», 1974, 35, No. 1.

114. **Sussman A.** Electrooptic liquid crystal devices: principles and applications, «JEEE Transactions, PHP-8», 1972, No. 12.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
ГЛАВА 1. Оптоэлектроника в электроизмерительной технике.	9
1. Электромеханические и электронные развертывающие приборы с вторичным аналого-дискретным опто-электронным преобразованием	9
2. Электроизмерительные показывающие приборы без подвижных частей с вторичным дискретно-аналоговым электроннооптическим преобразованием	12
3. Оптоэлектронные элементы и узлы электроизмерительных устройств	19
ГЛАВА 2. Методы и средства оптронного функционального преобразования	28
1. Общие свойства оптических преобразований, их сопоставление с задачами функционального преобразования в информационных системах	28
2. Аналоговые функциональные преобразователи на элементарных оптронах	35
3. Дискретные функциональные преобразователи на оптронных умножителях и сумматорах	39
4. Электроннооптические функциональные преобразователи	41
5. Оптоэлектронные функциональные преобразователи	51
6. Универсальные оптронные функциональные преобразователи	59
ГЛАВА 3. Электроннооптические методы и средства индикации	68
1. Общий обзор и классификация	68
2. Электрохимические (электрохромные) индикаторы	82
3. Жидкокристаллические индикаторы	82
4. Электролюминесцентные и катодолюминесцентные индикаторы	96
5. Накальные и светодиодные индикаторы	99
6. Газоразрядные и плазменные индикаторы	104
7. Электронно-лучевые и лазерно-лучевые индикаторы	109
8. Построение и схемы управления знаковосинтезирующих индикаторов	114
ГЛАВА 4. Электроннооптические методы и средства микро-регистрации	120
1. Общий обзор и классификация	120
2. Электроннооптические микрорегистраторы с разрушающей записью	127
3. Методы и средства позиционирования записи и считывания	132
Заключение	137
Список литературы	146

55 коп.



МАШИНОСТРОЕНИЕ