

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
«Электронно-оптические системы и технологии»,
«Проектирование и производство РЭС»,
«Медицинская электроника»,
«Технические средства защиты информации»,
«Инженерно-психологическое обеспечение информационных технологий»
дневной формы обучения

Минск БГУИР 2011

УДК 621.38(076.5)
ББК 53.54я7
Э45

А в т о р ы:

С. К. Дик, Л. И. Гурский, М. В. Давыдов, А. А. Костюкевич, А. В. Смирнов

Р е ц е н з е н т:

Элементная база электронной аппаратуры : лаб. практикум для студ. Э45 спец. «Электронно-оптические системы и технологии», «Проектирование и производство РЭС», «Медицинская электроника», «Технические средства защиты информации», «Инженерно-психологическое обеспечение информационных технологий» днев. формы обуч. / С. К. Дик [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 55 с.: ил.

ISBN 978-985-488-562-9.

Лабораторный практикум составлен в соответствии с программами дисциплин «Электрорадиоэлементы, узлы функциональной микроэлектроники и технология РЭС», «Элементная база радиозлектронных средств», «Электронные компоненты», «Электронные компоненты и биомедицинские сенсоры», «Функциональная электроника и микросистемная техника» и включает изучение фильтров на поверхностных акустических волнах, реле, оптопар и катушек индуктивности.

УДК 621.38(076.5)
ББК 53.54я7

ISBN 978-985-488-562-9

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиозлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа №1</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ (ПАВ).....	4
<i>Лабораторная работа №2</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОПАР.....	15
<i>Лабораторная работа №3</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЛЕ И БЕСКОНТАКТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЛЕ.....	28
<i>Лабораторная работа №4</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ.....	42

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Цель работы: изучить назначение, конструкции и основы технологии изготовления фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ), а также их основные характеристики; исследовать амплитудно-частотные характеристики предложенных фильтров на ПАВ.

1.1. Теоретические сведения

1.1.1. Общие сведения об акустоэлектронных устройствах

Акустоэлектроника – направление функциональной микроэлектроники, связанное с использованием механических резонансных и пьезоэлектрического эффектов, а также эффекта, основанного на взаимодействии электрических полей с волнами акустических напряжений в пьезоэлектрическом полупроводниковом материале. Сегодня акустоэлектроника является одним из активно развивающихся направлений функциональной электроники. Среди акустоэлектронных устройств широкое распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Носителем информации в устройствах на ПАВ являются волны, у которых энергия упругих колебаний сосредоточена в тонком приповерхностном слое твердого тела. В качестве среды распространения используются пьезоэлектрические монокристаллы. Для преобразования электрических сигналов в акустические и обратно, а также для отражения и изменения траектории распространения акустических волн используются металлические структуры, нанесенные на поверхность пьезоэлектрической подложки. Возбуждение и прием акустических волн осуществляются с помощью входного и выходного преобразователей ПАВ, число электродов которых может быть различным (от единиц до нескольких тысяч).

Характеристики устройств на ПАВ определяются свойствами материала подложки и его топологией, т. е. типом, количеством, взаимным расположением и геометрическими размерами преобразователей и отражателей ПАВ.

По сравнению с другими типами фильтров, например электрическими LC- или RC-типа, фильтры на ПАВ обладают следующими **достоинствами**:

- возможность реализации различных достаточно сложных по форме ЛЧХ и ФЧХ при высокой точности обеспечения заданных параметров;
- технологичность изготовления, возможность применения стандартных технологических процессов микроэлектроники;
- высокая стабильность параметров в процессе эксплуатации и надежность работы, объясняющиеся тем, что фильтр на ПАВ представляет собой монолитное твердотельное устройство;

- хорошая сопрягаемость с блоками микроэлектронной аппаратуры;
- малые габариты и вес.

К **недостаткам** фильтров на ПАВ относятся:

- повышенная стоимость, так как они строятся, как правило, на монокристаллической пьезоподложке;
- повышенный уровень вносимых потерь, так как их преобразователи обычно обладают двунаправленным излучением и приемом ПАВ, и поэтому менее одной четверти мощности, отдаваемой источником сигнала, достигает нагрузки.

Областями применения устройств на ПАВ являются практически все перспективные системы и аппаратура передачи и обработки информации нового поколения: подвижные, спутниковые, тропосферные и радиорелейные линии связи, спутниковое, кабельное, цифровое, сотовое телевидение и телевидение высокой четкости.

1.1.2. Классификация устройств на ПАВ

Исходя из возможных применений и принципов работы ПАВ-устройства можно разбить на четыре общие группы:

- **пассивные резонаторы и резонаторные фильтры.** В данную группу входят дуплексоры (от 1 до 4 Вт) для абонентских станций подвижных систем связи; RF-фильтры для межкаскадной связи; резонаторные фильтры для односторонних и двухсторонних пейджеров; резонаторы и резонаторные фильтры для экстренной помощи (скорой медицинской и МЧС); для радиоидентификации автомобилей; для замков и защиты от несанкционированного доступа;

- **пассивные устройства с малым уровнем вносимых потерь.** В данную группу входят фильтры с малым вносимым затуханием для оконечных каскадов приемопередающих устройств систем и средств связи; фильтры промежуточной частоты (IF) с малым вносимым затуханием для систем и средств связи; многомодовые частотно-избирательные генераторы для широкополосных систем и средств связи двойного назначения; линии задержки с малым вносимым затуханием для маломощных приемников с радиоразнесением во времени;

- **пассивные устройства, использующие двунаправленные ВШП.** В данную группу входят фильтры Найквиста для цифрового телевидения и цифровой радиосвязи; генераторы, управляемые напряжением (VCOs); линии задержки; дисперсионные линии задержки для ШПС; дисперсионные линии задержки для ППРЧ; линии задержки для кодового разделения каналов с многодистанционным доступом – CDMA (Code-Division-Multiple-Access); линии задержки для временного разделения каналов с многостанционным доступом – TDMA (Time-Division-Multiple-Access); фильтры для волоконно-оптической связи (Clock-recovery filters for fiber-optics communication repeater stages);

- **нелинейные устройства.** В данную группу входят синхронный и асинхронный конвольверы для широкополосных систем и средств связи (конвольвер –

это шестиполюсник, формирующий свертку двух сигналов – входного и опорного, используя нелинейные свойства среды распространения упругих волн).

1.1.3. Основы работы фильтров на ПАВ

Фильтр на поверхностных акустических волнах (рис. 1.1) является твердотельным функциональным устройством и представляет собой подложку из пьезоэлектрика 3, на поверхность которой методом фотолитографии наносятся системы токопроводящих элементов. Одна из таких систем – излучающий преобразователь ПАВ 2 – подключается к источнику входного сигнала 1, другая – приемный преобразователь (один или несколько) ПАВ 5 – к согласующим цепям и нагрузке 6.

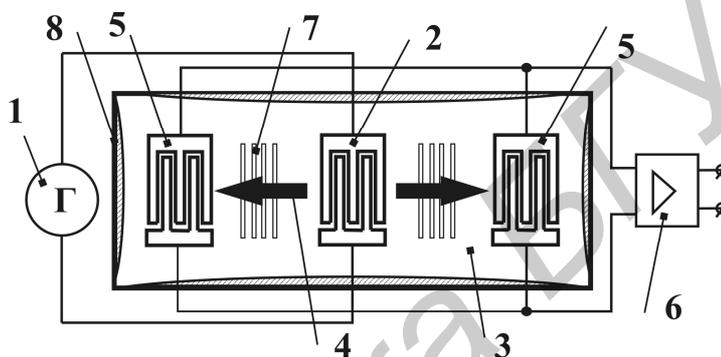


Рис. 1.1. Структура фильтра на ПАВ

Под действием высокочастотного электрического напряжения источника сигнала в зазорах между смежными электродами излучающего преобразователя возникает переменное электрическое поле, которое вследствие пьезоэффекта материала подложки вызывает механические колебания в ее поверхностном слое. Эти колебания распространяются в тонком приповерхностном слое подложки в направлениях, перпендикулярных к электродам, в виде поверхностных акустических волн 4. Между смежными электродами приемного преобразователя 5 вследствие обратного пьезоэффекта механические колебания ПАВ обуславливают появление электрического напряжения, которое и является выходным сигналом.

Отражательные структуры (ОС) ПАВ 7 располагаются между излучающим и приемным преобразователями и представляют собой решетки металлических короткозамкнутых или разомкнутых электродов или систему вытравленных в подложке канавок. Доступность акустических волн на всем пути от входного до выходного преобразователя, способность отражаться от неоднородностей поверхности и взаимодействовать с электрическими и акустическими полями обеспечивают возможность построения различных устройств обработки сигналов.

С целью устранения нежелательных отражений ПАВ от торцов подложки, а также ослабления других типов акустических волн, которые могут быть

возбуждены излучающим преобразователем ПАВ, все нерабочие грани и их торцы покрываются специальным звукопоглощающим покрытием (8).

Для уменьшения вносимого затухания фильтра часто применяют специальные согласующие цепи, которые включаются между источником сигнала и излучающим преобразователем, а также между приемным преобразователем и нагрузкой (6).

Подложка с преобразователями и согласующие цепи при необходимости помещаются в общий корпус, в качестве которого обычно используется один из унифицированных корпусов микросхем. Характеристики фильтра на ПАВ в основном определяются частотно-избирательными процессами преобразования электрического сигнала в акустические волны и обратно, т. е. зависят от топологии преобразователей ПАВ, а именно, от количества, геометрических размеров и взаимного расположения электродов в преобразователе, протяженности зон перекрытия смежных электродов (протяженности зазоров), очередности подсоединения электродов к общим суммирующим шинам. Применяя ту или иную топологию преобразователей, можно реализовать фильтры с самыми разнообразными характеристиками.

1.1.4. Разновидности встречно-штыревых преобразователей

Основными разновидностями встречно-штыревых преобразователей (ВШП) являются: эквидистантный преобразователь (с одинаковыми расстояниями между штырями); неэквидистантный преобразователь (с различными расстояниями между штырями); неаподизованный преобразователь (с одинаковыми перекрытиями штырей); аподизованный (взвешенный) преобразователь (с различной степенью перекрытия штырей) и др. (рис. 1.2).

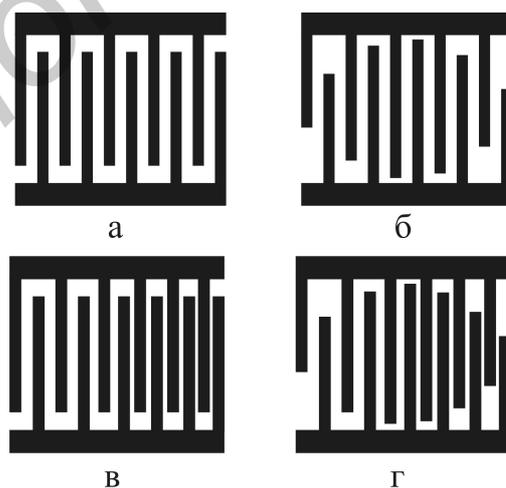


Рис. 1.2. Разновидности встречно-штыревых преобразователей:

а – эквидистантный неаподизованный преобразователь, б – эквидистантный аподизованный преобразователь, в – неэквидистантный неаподизованный преобразователь, г – неэквидистантный аподизованный преобразователь

Если приложить к штырям входного преобразователя электрическое напряжение высокой частоты, обеспечить согласование частоты f с шагом ВШП, то под влиянием поля произойдет деформация в пьезоэлектрике, которая со скоростью $v_{\text{пов}}$ распространится в обе стороны от каждого промежутка. Если a – ширина штырей, h – расстояние между штырями, то шаг ВШП

$$b = a + h. \quad (1.1)$$

Если шаг ВШП согласован с длиной волны, то деформации, вызванные каждым промежутком, суммируются, образуя суммарную поверхностную волну. Суммирование происходит за счет того, что локальная деформация, образовавшаяся под одним из промежутков, начинает перемещаться в противоположных направлениях и проходит расстояние $\lambda_{\text{пов}}/2$ до следующего промежутка. Она оказывается там в тот момент, когда следующая полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и создаст свою деформацию, которая, складываясь с пришедшей от соседнего промежутка, создаст суммарную деформацию. Это имеет место при выполнении равенства

$$2b = \lambda_{\text{пов}} = v_{\text{пов}}/f, \quad (1.2)$$

где $\lambda_{\text{пов}}$ – длина поверхностной акустической волны.

Так происходит многократно со всеми промежутками, и суммарная волна распространяется по звукопроводу. Эта волна достигает выходного преобразователя, где происходит обратное преобразование деформаций в электрическое напряжение. Обратное преобразование обусловлено тем, что деформации пьезоэлектрика, вызванные поверхностной волной, приводят к появлению электрического напряжения, наведенного на соседних парах штырей при согласовании ВШП с частотой, будет противоположный из-за обратного чередования штырей. Это позволяет сформировать в выходном преобразователе двуполярное переменное электрическое напряжение с частотой входного сигнала.

Чем больше штырей содержит преобразователь, тем он эффективнее и тем большая накапливается деформация. Одновременно с этим более жесткие требования предъявляются к точности выполнения штырей звукопровода, стабильности скорости распространения поверхностной волны и частоты сигнала. Очевидно, что суммирование будет иметь место только при $a + h = \lambda_{\text{пов}}/2$. Деформации, возникающие промежутками при других частотах, не будут эффективно суммироваться. Зависимость отклика от частоты можно использовать для получения эффекта фильтрации.

Из принципа действия фильтров на ПАВ очевидно, что если штыри и промежутки выполнить точно и согласованно с частотой, то полоса частот пропускания будет определяться числом пар штырей. Действительно, при малом числе пар штырей отклонение частоты от средней (расстройка) приводит к уменьшению эффективности преобразования и, следовательно, к частотно-избирательному эффекту, но уменьшение коэффициента передачи с расстройкой происходит медленно. Если же использовать много пар штырей, то каждая пара будет вносить свою долю в уменьшение относительного коэффициента передачи, т. е. в этом случае полоса частот будет более узкая. Это согласуется с пред-

ставлением фильтрации как процесса накопления, так как при большом количестве штырей накапливается много воздействий, формирующих поверхностную акустическую волну.

Между числом электродов преобразователя и его полосой существует следующая взаимосвязь:

$$\Delta f_{\text{п}} = f_0 / N, \quad (1.3)$$

где $\Delta f_{\text{п}}$ – полоса пропускания частот фильтра; f_0 – центральная частота фильтра; N – число пар штырей.

Напомним, что добротность LC -контура $Q = f_0 / \Delta f_{\text{п}}$. Следовательно, число пар штырей эквивалентно добротности. В данном случае полоса пропускания ограничивается в основном возможностями технологии, которая определяет количество пар штырей и размеры звукопровода.

Таким образом, АЧХ фильтра полностью определяется характеристиками преобразователей, так как пьезоэлектрическая подложка частотнозависимыми свойствами обычно не обладает. АЧХ ВШП однозначно связано с числом, расположением и взаимным перекрытием излучающих электродов. Изменяя топологию преобразователей, можно формировать разнообразные АЧХ.

1.1.5. Особенности распространения ПАВ

Обобщенная структурная схема распространения ПАВ приведена на рис. 1.3. Схема содержит два преобразователя 1, 2, расположенных на некотором расстоянии друг от друга в общем акустическом потоке на поверхности пьезоэлектрического звукопровода 3; на торцах звукопровода нанесено поглощающее покрытие 15, 16.

При подаче на входной преобразователь 1 электрического сигнала, частота которого совпадает с частотой акустического синхронизма преобразователя (расстояние между штырями преобразователя пропорционально половине длины волны), он возбуждает ПАВ, распространяющуюся в двух противоположных направлениях, т. е. к выходному преобразователю 2 и противоположному ему торцу звукопровода.

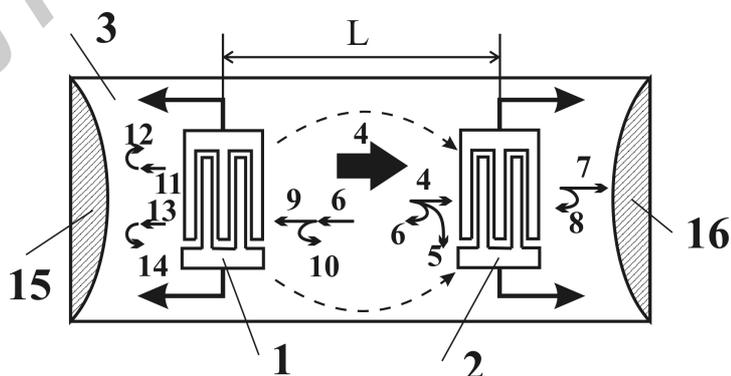


Рис. 1.3. Обобщенная структурная схема распространения ПАВ

Волна 4, распространяющаяся к выходному преобразователю, частично отражается от него 6, частично преобразуется в электрический сигнал и погло-

щается в нагрузке 5, частично проходит в прежнем направлении 7. Значительный вклад в искажение импульсного отклика $h(t)$ и АЧХ устройства, изображенных на рис. 1.4, вносят переотражения ПАВ между преобразователями. Часть падающей на выходной преобразователь волны, отраженной в обратном направлении (см. рис. 1.3, б), достигает входного преобразователя. Перераспределение волны 6 при взаимодействии с преобразователем 1 аналогично перераспределению ее при взаимодействии с преобразователем 2. Таким образом, часть энергии 10 волны 6 переотражается в направлении преобразователя 2 и служит причиной возникновения трехзаходного сигнала.

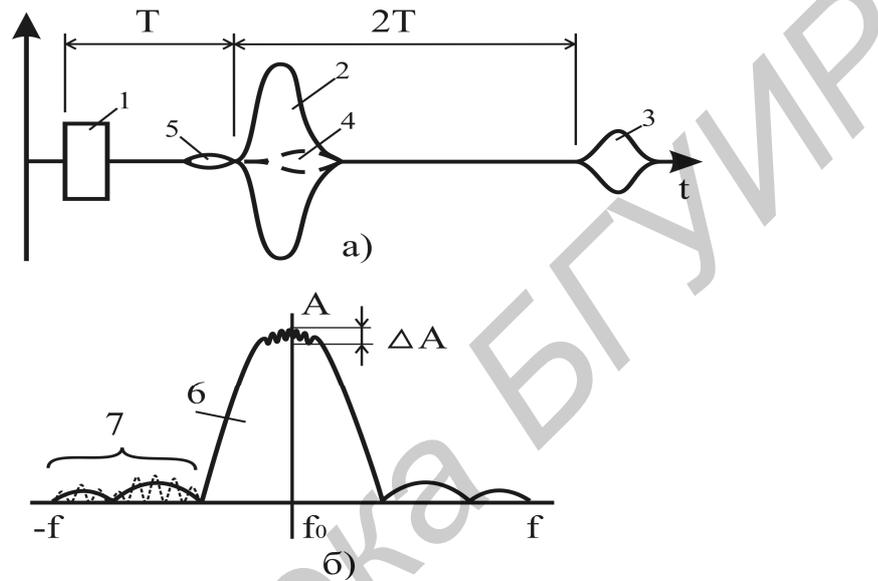


Рис. 1.4. Искажения, вносимые в выходной сигнал (а) и АЧХ фильтра (б)

На рис. 1.4, а в качестве базы отсчета задержки принимается сигнал 1, соответствующий по временному положению электрическому сигналу, поступающему на входной преобразователь. Физическая природа возникновения незадержанного сигнала 1 обусловлена прямым походом (наводкой) электрического сигнала со входа на выход устройства (см. рис. 1.2, штриховые линии). Основным выделенный на нагрузке сигнал 2 (см. рис. 1.4, б) смещен по отношению к входному сигналу на время

$$T \approx L / v_a, \quad (1.4)$$

где L – расстояние между преобразователями; v_a – скорость распространения ПАВ.

Трехзаходный сигнал 3, обусловленный переотражением ПАВ, имеет задержку относительно сигнала 2, равную $2T$, и относительно входного сигнала – $3T$. При анализе импульсного отклика (см. рис. 1.4, а) можно отметить наличие в нем еще двух ложных сигналов, связанных с вторичными акустическими эффектами. Один из них (см. рис. 1.4, а, 4) обусловлен переотражениями ПАВ собственно в электродной структуре входного и в меньшей степени выходного преобразователей; он вызывает «затягивание» спада основного сигнала. Другой сигнал (см. рис. 1.4, а, 5) обусловлен распространением между входным и выходным преобразователями объёмной акустической волны (ОАВ). Ввиду различия скоростей ОАВ и ПАВ его расположение на временной оси не совпадает

с расположением основного сигнала. Проследим роль указанных искажений импульсного отклика в формировании АЧХ устройства (см. рис. 1.4, б). Наличие сигнала прямого прохождения (см. рис. 1.4, а, 1) между преобразователями приводит к изрезанности АЧХ во всей рабочей полосе частот (на рис. 1.4, б в изрезанность АЧХ б показана штриховой линией только на участке 7). Период изрезанности связан с расстоянием между преобразователями, а «глубина» – с относительным уровнем сигнала прямого прохождения. Наличие трехзаходного сигнала 3 обуславливает изрезанность АЧХ в районе центральной частоты f_0 , причем ее относительный уровень ΔA пропорционален относительному уровню трехзаходного сигнала.

Таким образом, были рассмотрены основные причины возникновения искажений основных электрических характеристик устройств на ПАВ. Можно отметить еще ряд эффектов, вклад которых в появление искажений по сравнению с указанными выше незначителен. Среди них нужно упомянуть отражения ПАВ от торцов звукопровода (см. рис. 1.3): отражение 12 волны 11, излученной входным преобразователем 1 в направлении торца звукопровода; отражение 14 волны 6, прошедшей через преобразователь 1 (9, 13); отражение 8 энергии волны 7, прошедшей через выходной преобразователь. Все эти отражения обуславливают сигналы, дополнительно «засоряющие» импульсный отклик устройства и соответственно искажающие ее АЧХ.

1.1.6. Упрощенный расчет топологии фильтра на ПАВ

Исходными данными являются:

- центральная частота f_0 ;
- относительная полоса пропускания $\Delta f / f_0$;
- число лепестков импульсного отклика m ;
- функция аподизации $\omega(n)$.

Расчет топологии преобразователей

Если преобразователь эквидистантный неаподизованный (рис. 1.5), то расчет топологии ведется по нижеприведенным формулам.

Определяем количество пар N электродов:

$$N = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (1.5)$$

где f_0 – центральная частота; а $\Delta f = f_v - f_n$; f_v – верхняя граничная частота; f_n – нижняя граничная частота. Значения f_v и f_n вытекают из соотношения $\Delta f / f_0$.

Определяем расстояние h между соседними электродами:

$$h = \frac{\lambda}{2}, \quad (1.6)$$

где $\lambda = \frac{v}{f_0}$ – длина волны.

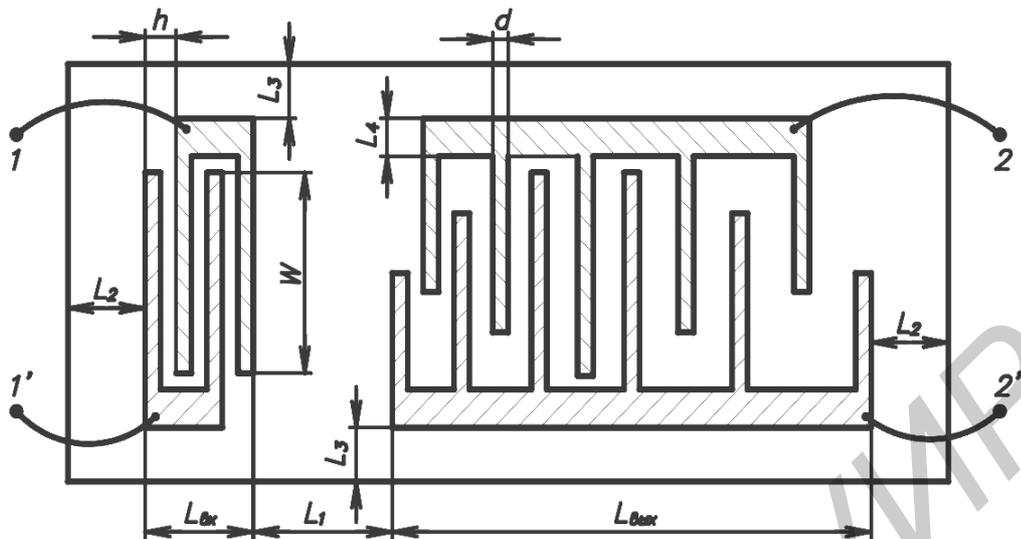


Рис. 1.5. Схема проектируемого фильтра на ПАВ

Рассчитываем толщину электродов по формуле

$$d = \frac{\lambda}{4}. \quad (1.7)$$

Находим апертуру (степень перекрытия) электродов:

$$W = (10 \dots 200)\lambda. \quad (1.8)$$

Определение габаритных размеров проектируемого фильтра.

Определяем длину звукопровода:

$$L_{\text{д}} = L_{\text{вх}} + L_{\text{вых}} + L_1 + 2L_2. \quad (1.9)$$

где $L_{\text{вх}}$ – длина входного преобразователя; $L_{\text{вых}}$ – длина выходного преобразователя; если преобразователь эквидистантный, то

$$L_{\text{ЭКВ}} = h \cdot (2N - 1) + d. \quad (1.10)$$

$L_1 = 8 \dots 10$ мм – расстояние между преобразователями; $L_2 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между крайним электродом преобразователя и торцевой гранью звукопровода.

Ширина звукопровода фильтра

$$L_{\text{ш}} = W_{\text{вх}} + 2(L_3 + L_4), \quad (1.11)$$

где $L_3 = 5 \dots 10$ мм – расстояние между общей шиной решетки преобразователя и продольной гранью звукопровода; $L_4 = 2d$ – ширина общей шины решетки преобразователя.

Толщина звукопровода выбирается около 20λ для уменьшения влияния объемных волн.

1.2. Схема измерений

Схема измерений представлена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Схема снятия АЧХ фильтров

1.3. Приборы и оборудование, применяемые в работе

1. Генератор Г4 - 102.
2. Осциллограф С1 - 75.
3. Макет с четырьмя фильтрами и термостатом.

1.4. Порядок выполнения работы

1. Снять АЧХ трех фильтров.

Для этого, изменяя частоту сигнала генератора на шестом диапазоне (4...10 МГц) для фильтров 1, 3 и на восьмом диапазоне (20...50 МГц) для фильтра 2, снять зависимость амплитуды выходного сигнала фильтра от частоты.

2. Исследовать влияние температуры на форму АЧХ и уход центральной частоты.

Для этого необходимо получить АЧХ фильтра 4, помещенного в термостат, при комнатной и повышенной температуре на 6 диапазоне (4...10 МГц) генератора:

- 1) снять АЧХ фильтра 4 при комнатной температуре;

- 2) установить максимально возможную амплитуду на выходе фильтра 4. Записать значения центральной частоты и амплитуды сигнала. Тумблер «Нагрев» включить. Загорится лампочка на макете. Нагреть на 30 °С от комнатной температуры (соответствует маленьким пяти делениям на встроенном индикаторе макета). Снова найти и записать значения центральной частоты и амплитуды сигнала на выходе фильтра;

- 3) снять АЧХ фильтра 4 при повышенной температуре.

3. Методика получения данных.

Установить максимально возможную амплитуду на выходе фильтра изменением частоты на выходе генератора. Записать значения центральной частоты и амплитуды сигнала. Изменить частоту на генераторе в меньшую и большую стороны от центральной до момента получения амплитуды сигнала на выходе фильтра равной 0,707 от максимальной амплитуды. Записать значения полученных частот. Эти данные используются для расчета добротности и полосы пропускания фильтра. Провести дополнительно 10–15 измерений в указанном диапазоне частот для качественного построения АЧХ фильтра.

1.5. Содержание практической части отчета

1. Функциональная схема лабораторного исследования. Приборы, их основные параметры и погрешности измерений. Конструктивные и электрические параметры исследуемых фильтров.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики АЧХ фильтров.
4. Расчет добротности и полосы пропускания фильтров.
5. Выводы с анализом результатов.

1.6. Контрольные вопросы

1. Назовите основные принципы работы акустоэлектронных устройств.
2. Какие существуют области применения устройств на ПАВ?
3. Приведите классификацию устройств на ПАВ.
4. Перечислите основные элементы фильтра на ПАВ.
5. Каким образом идет преобразование сигнала в фильтре на ПАВ?
6. Какие существуют разновидности встречно-штыревых преобразователей? Каковы их особенности?
7. Назовите особенности распространения ПАВ на плате фильтра.
8. Чему равна задержка между входным и выходным сигналами?
9. Какие искажения влияют на работу фильтра?
10. Из каких этапов состоит упрощенный расчет топологии фильтра на ПАВ?

Лабораторная работа №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОПАР

Цель работы: изучить классификацию, функциональные параметры, устройство и особенности применения оптопар.

2.1. Теоретические сведения

Оптоэлектронный прибор определяется как прибор, использующий оптическое излучение для своего функционирования, т. е. для генерации, детектирования, преобразования и передачи оптических сигналов.

Приборы, в которых выполняется лишь один вид преобразования (излучатели, индикаторы, фотоприемники, модуляторы и др.), рассматриваются как элементы оптоэлектронных приборов и систем.

Приборы, в которых содержатся излучатели и приемники, взаимодействующие друг с другом в единой конструкции, называются оптопарами или оптронами. Важным фактором является конструктивное исполнение оптрона: если в конструкции создать воздушный зазор между излучателем и фотоприемником, то прибор может быть использован для считывания информации с переносителей; если излучатель и фотоприемник соединены гибким стекловолоконным светопроводником, то прибор становится аналогом электрического кабеля. Следовательно, конструкция оптопары при одинаковой электрической схеме определяет функциональное назначение прибора.

Оптопарой называют оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены в общем корпусе излучатель и фотоприемник, взаимодействующие друг с другом оптически и электрически. Связи между компонентами оптопары могут быть прямыми или обратными, положительными или отрицательными, одна из связей (электрическая или оптическая) может отсутствовать.

В состав единого прибора вместе с оптопарой или несколькими оптопарами могут входить еще и дополнительные микроэлектронные или оптические элементы. И конструктивно, и функционально такие приборы существенно отличаются от элементарной оптопары, поэтому в литературе принято использовать для их названия термин «**оптрон**», при этом имеется в виду оптоэлектронный прибор любого произвольного вида с внутренними оптическими связями.

2.1.1. Классификация оптопар

В качестве **источника излучения** в оптопарах, как правило, используется **светодиод**. Это обусловлено следующими его достоинствами: высокое значение КПД преобразования электрической энергии в оптическую; узкий спектр излучения (квазимонохроматичность); широта спектрального диапазона, перекрываемого различными светодиодами; направленность излучения; высокое быстродействие; малые значения питающих напряжений и токов; совместимость с транзисторами и интегральными схемами; простота модуляции мощно-

сти излучения путем изменения прямого тока; возможность работы как в импульсном, так и в непрерывном режимах; высокая надежность и долговечность; малые габариты; технологическая совместимость с изделиями микроэлектроники. Поэтому при классификации оптопар учитывается только два признака: **тип фотоприемного устройства и конструктивные особенности прибора в целом.**

По **типу фотоприемного устройства** оптопары классифицируются:

Д – диодная, Т – транзисторная, R – резисторная, У – тиристорная, Т² – с составным фототранзистором, ДТ – диодно-транзисторная, 2Д (2Т) – диодная (транзисторная) дифференциальная.

По **конструктивным особенностям различают следующие приборы:**

• **по степени интеграции:**

- оптопары (или элементарные оптроны) – состоящие из двух и более элементов (в т. ч. собранные в одном корпусе);
- оптоэлектронные интегральные схемы, содержащие одну или несколько оптопар (с дополнительными компонентами, например, усилителями или без них).

• **по типу оптического канала:**

- с открытым оптическим каналом;
- с закрытым оптическим каналом.

2.1.2. Основные функциональные разновидности оптопар

Оптопара с прямой оптической и оборванной электрической связью (рис. 2.1, а) используется как элемент развязки, поэтому она получила очень широкое распространение. **Оптрон с прямой электрической и оборванной оптической связью** (рис. 2.1, б), т. е. оптрон с оптическим входом и выходом, представляет собой преобразователь световых сигналов: это может быть простое усиление (ослабление) интенсивности света, преобразование спектра или направления поляризации, преобразование некогерентного излучения в когерентное и т. п. Если в таком оптроне фотоприемник и излучатель многоэлементные, то он может выполнять функцию преобразователя изображений. В **оптроне с электрической и оптической связями** (рис. 2.1, в) при определенных условиях может осуществляться частичная или полная регенерация (восстановление) входного сигнала за счет энергии обратной связи, в силу чего на вольт-амперной характеристике появляется падающий участок или несколько участков. Такой прибор получил название регенеративного оптрона. В нем могут реализовываться любые комбинации видов входных и выходных сигналов (электрических и оптических).

Важным элементом оптопары является оптический канал между излучателем и фотоприемником. Существуют три его разновидности: простой светопровод (в виде прозрачной иммерсионной среды), предназначенный для передачи энергии излучения на фотоприемник; зазор между излучателем и фотоприемником имеет доступ извне – такая оптопара называется оптопарой с открытым

оптическим каналом. Иммерсионная среда может быть выполнена из материала, светопропускание которого изменяется при внешних воздействиях; такая оптопара называется оптопарой с управляемым оптическим каналом.

Другой тип оптрона – с электрической внутренней связью и фотонными внешними связями (рис. 2.1, г) – является усилителем световых сигналов, а также преобразователем сигналов одной частоты в сигналы другой частоты, например сигналов инфракрасного излучения в сигналы видимого спектра. Приемник света 4 (см. рис. 2.1, г) преобразует входной световой сигнал в электрический. Последний усиливается усилителем 5 и возбуждает источник света 6.

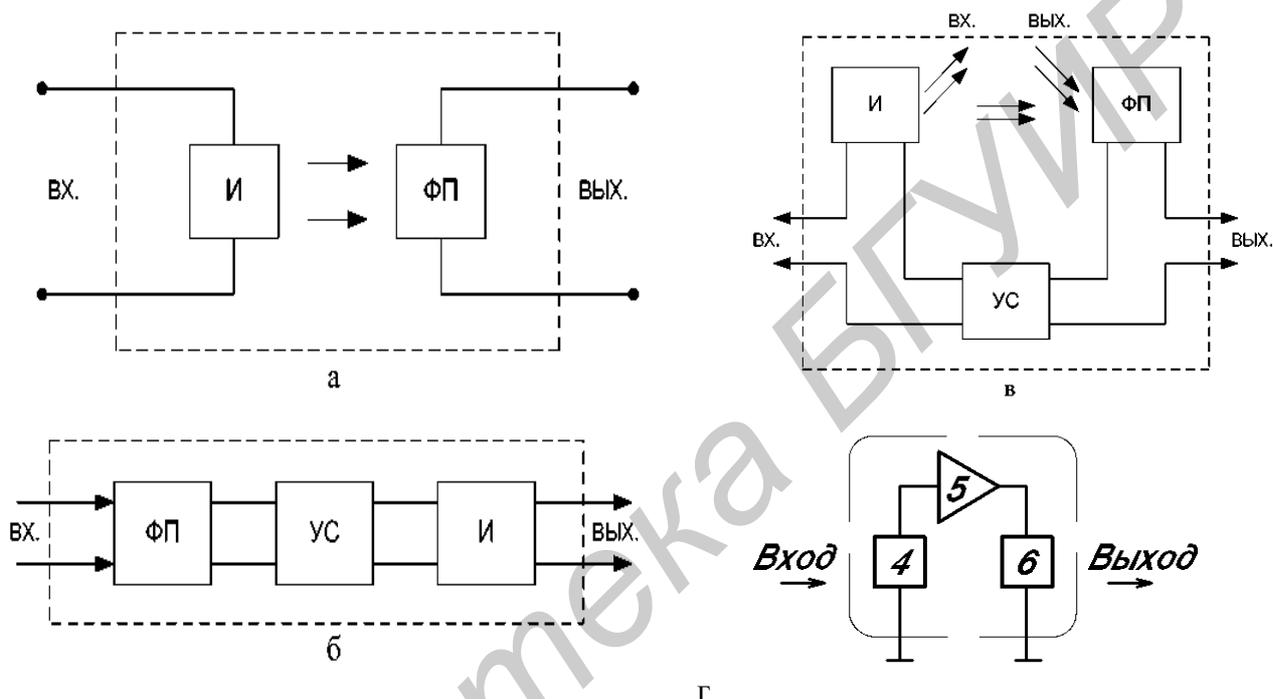


Рис. 2.1. Электрические и оптические связи в оптронах:

- а – оптопара для электрической развязки; б – оптрон с оптическим входом и выходом; в – регенеративный оптрон; И – излучатель; ФП – фотоприемник; УС – электронное устройство связи

2.1.3. Параметры оптопар и оптронов

Оптрон в общем случае состоит из четырех функциональных частей, для описания которых используются следующие параметры:

1. $S_{\text{И}}$, Вт / А, – эффективность излучателя, определяемая видом выбранного излучателя, режимом его возбуждения, температурой.
2. $S_{\text{Ф}}$, А / Вт, – чувствительность фотоприемника, зависящая от внутреннего усиления прибора.
3. $K_{\text{опт}}$ – передаточная функция оптического канала (например, с учетом поглощения, геометрических факторов и т. д.).
4. $K_{\text{у.с}}$ – передаточная характеристика электронного устройства связи (например коэффициент усиления).

В качестве элементов электрической развязки оптопары (см. рис. 2.1, а) получили широкое распространение благодаря тому, что для их успешного функционирования высокий КПД необязателен, а также из-за многих принципиальных достоинств этих приборов, таких, как идеальная электрическая развязка, высокое напряжение изоляции, однонаправленность распространения информации, широкополосность.

Совместимость оптопар с изделиями микроэлектроники (технологическая, эксплуатационная, по уровням входных и выходных сигналов) также способствовала их широкому применению. Наиболее широко используются для электрической развязки оптопары с фотоприемником в виде фототранзистора, фотодиода, фототиристора, фоторезистора.

2.1.4. Основные виды оптопар

Диодные и транзисторные оптопары (рис. 2.2, а, б) применяются главным образом в цепях передачи цифровых информационных сигналов; критерием качества служит комбинированный параметр $K_i / t_{зд}$ (K_i – коэффициент передачи по току, $t_{зд}$ – время задержки распространения сигнала). По этому параметру диодные оптопары значительно опережают транзисторные, достигая 10^7 с^{-1} ; теоретическое предельное значение $K_i / t_{зд} \gg 10^9 \text{ с}^{-1}$ (при использовании GaAlAs – световодов и кремниевых р-і-n-фотодиодов). Этим обусловлено наиболее широкое применение диодных оптопар в ЭВМ, в технике обработки и передачи цифровой информации. Диодные оптопары имеют низкий коэффициент передачи тока ($K_i = 0,01 \dots 0,03$) и требуют обязательного усиления выходного сигнала, поэтому они используются либо в составе оптоэлектронных микросхем, либо с дополнительным электронным обрамлением.

Важной разновидностью диодных оптопар являются так называемые **дифференциальные оптопары** – приборы, в которых один излучатель воздействует на два идентичных фотодиода (рис. 2.2, е). Подобие выходных характеристик двух каналов такой оптопары позволяет использовать эти приборы для неискаженной передачи аналоговых сигналов: непосредственно для передачи применяется один канал, а другой служит для организации цепи отрицательной обратной связи, корректирующей температурные, деградационные и другие изменения мощности излучателя.

В устройствах бесконтактного управления удобны **транзисторные оптопары**, а для оптической коммутации высоковольтных сильноточных цепей – **тиристорные** (рис. 2.2, д). Критерий качества таких управляющих оптопар, определяемый отношением коммутируемой мощности в выходной цепи к мощности на входе, достигает $10^6 \dots 10^7$.

Быстродействие транзисторных и тиристорных оптопар характеризуется временем переключения, типичные значения которого (5...50 мкс), в лучших образцах удается получить в течение 1 мкс. Очевидная перспектива развития транзисторных оптопар связана с использованием в качестве фотоприемников

гетеротранзисторов, при этом реально снижение времени переключения до 1...10 нс. Транзисторные оптопары – наиболее массовый тип элементов электрической развязки.

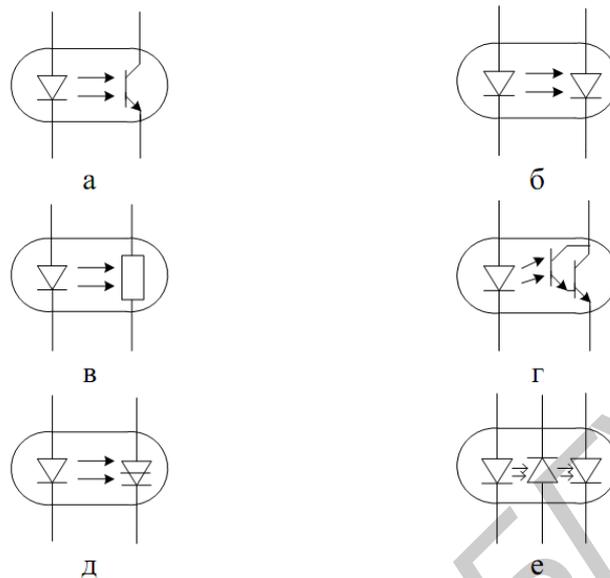


Рис. 2.2. Основные виды оптопар:

а – транзисторная; б – диодная; в – резисторная; г – с составным транзистором; д – тиристорная; е – дифференциальная диодная

Резисторные оптопары также получили широкое распространение. Фоторезисторы в отличие от фотоприемников (рис. 2.2, в) с р-п-переходами характеризуются высокой линейностью и симметричностью вольт-амперной характеристики, отсутствием внутренних ЭДС, низким уровнем шумов. Их выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в $10^7 \dots 10^8$ раз. Это и обуславливает удобство и незаменимость резисторных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатки резисторных оптопар – низкое быстродействие (0,01...1 с) и сильная температурная нестабильность параметров – ограничивают применение этих приборов в технике обработки информации.

Оптопары, которые в качестве фотоприемника используют МДП-фототранзисторы, фотоварикапы, лавинные фотодиоды, однопереходные транзисторы, функциональные фоторезисторы и т. д., имеют различия, свойственные используемому фотоприемнику.

Широкое распространение получили также **оптоэлектронные микросхемы**, главным образом переключатели, состоящие из быстродействующей диодной оптопары и ключевого усилителя на выходе – этим обеспечивается полное согласование по уровням входных, выходных сигналов со стандартными логическими микросхемами. Удобство применения окупает некоторые потери быстродействия, обусловленные необходимостью значительного усиления сигнала, снимаемого с фотодиода.

Перспективны **оптоэлектронные коммутаторы силовой нагрузки** – микросхемы или устройства, выполняющие функции реле переменного и

постоянного токов и содержащие оптическое звено в цепи управления. В них обычно применяют транзисторные и тиристорные оптопары.

Оптоэлектронные коммутаторы аналоговых сигналов и развязывающие усилители также отличаются от своих микроэлектронных аналогов лишь введением электрической развязки – в микросхемах первого типа используются диодные оптопары с большим значением K_i , в микросхемах второго типа – дифференциальные диодные оптопары.

2.1.5. Устройство оптопар

Наиболее распространенная «этажерочная» конструкция оптопары реализуется несколькими способами. Во-первых, это *соединение кристаллов излучателя и фотоприемника с помощью оптического клея*, который одновременно выполняет функции иммерсионной среды и несущей конструкции (рис. 2.3, а). Во-вторых, это *приклеивание активных кристаллов с разных сторон прозрачной пластинки*: слюдяной, стеклянной, фианитовой, сапфировой и др. (рис. 2.3, б). В-третьих, это *предварительное жесткое закрепление активных кристаллов на специальных площадках деталей корпуса* – кристаллы оказываются на требуемом расстоянии друг от друга после сборки (рис. 2.3, в). В качестве светопроводящей среды в этом варианте обычно применяют вазелиноподобные полимеры, не вызывающие механических напряжений.

Недостаток всех трех разновидностей оптопар – сборка «по вертикали», не применяемая в традиционной микроэлектронике, преодолевается в «панельной» конструкции (рис. 2.3, г) с расположением всех активных кристаллов в одной плоскости. Это позволяет использовать существующее высокопроизводительное оборудование для монтажа кристаллов и распайки выводов; в данном случае наблюдается ухудшение передаточных свойств оптопары.

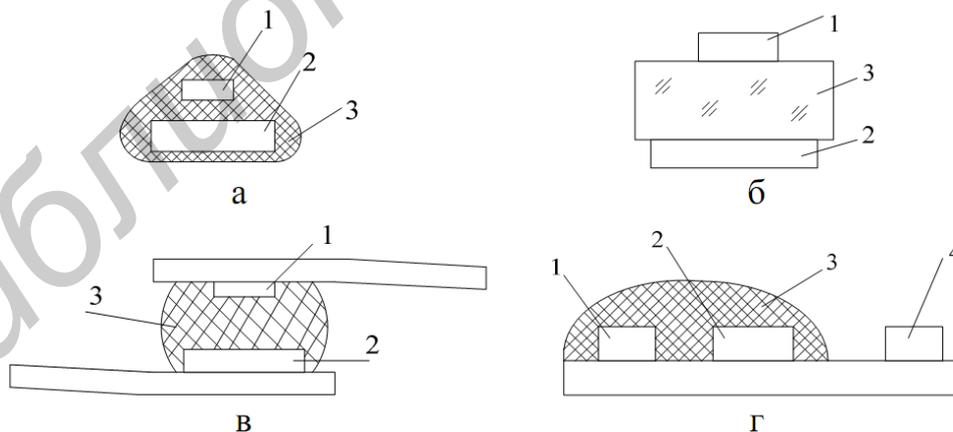


Рис. 2.3. Схематическое расположение кристаллов излучателя 1, фотоприемника 2, иммерсионной среды 3 и микросхемы 4 в оптопарах различной конструкции

Оптоэлектронные микросхемы выполняются в виде гибридных сборок одной из двух типичных модификаций: бескорпусные оптопара и микросхема;

бескорпусные световод и интегрированный фотоприемник, содержащий на одном кремниевом кристалле фотодиод и микросхему.

Одно из направлений технологического совершенствования оптронов состоит в разработке **монолитной оптопары**, изготавливаемой в виде интегрированной твердотельной структуры в едином технологическом процессе. Однако пока ни в одном из предложенных и опробованных вариантов (рис. 2.4) не удалось добиться сочетания всех необходимых параметров, а также долговечности, надежности и устойчивости к внешним воздействующим факторам.

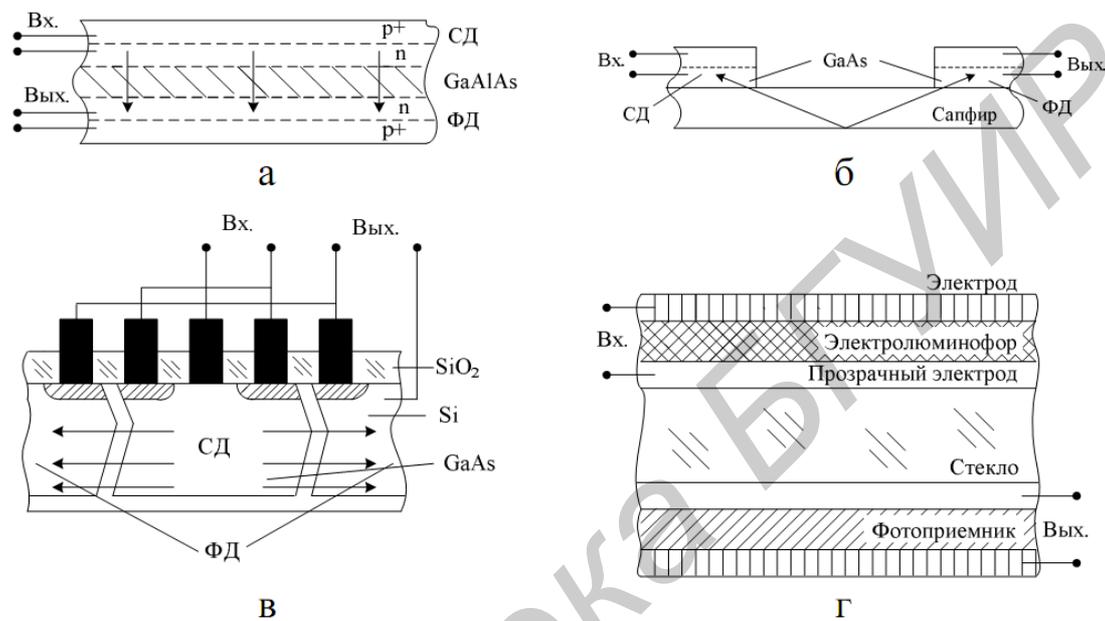


Рис. 2.4. Разновидности монолитных оптопар:

а – на GaAs (GaAlAs)-полуизоляторе; б – на структуре GaAs-сапфир; в – на основе кремния с локально выращенной GaAs-областью; г – тонкопленочная с электролюминофором и фотопроводником; СД -излучатель; ФД – фотодиод

Низкая эффективность излучающих и фоточувствительных структур, плохая светопередача и невысокие изоляционные характеристики оптической среды, невоспроизводимость технологического процесса, неудовлетворительная совместимость используемых материалов – причины, которые порознь или в совокупности не позволяют достигнуть желаемого результата.

Совершенная конструкция оптрона должна сочетать не только монолитность, но и «квазипланарность», т. е. изготовление всех составных элементов в едином технологическом процессе и расположение выводов в одной плоскости, как это принято в устройствах интегральной оптики.

Появление волоконных световодов вызвало создание так называемых **длинных оптронов**, или **волстронов**, в которых излучатель и фотоприемник неразъемно связаны друг с другом отрезком волоконно-оптического кабеля. Такой прибор выгодно отличается от традиционной волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), содержащей пару оптических соединителей, лучшей пере-

даточной характеристикой (выигрыш в K_i достигает 2...5 раз), большей надежностью, меньшими габаритными размерами и стоимостью.

Волстроны длиной от десятков сантиметров до нескольких метров незаменимы в качестве элементов электрической развязки в сверхвысоковольтной радиоэлектронной и электротехнической аппаратуре, во многих случаях внутри-объектового применения они удобнее, чем короткие ВОЛС.

В **оптронах с открытым оптическим каналом** (рис. 2.5) излучатель и фотоприемник смонтированы отдельно друг от друга, и специфика оптопары проявляется лишь в обеспечении наилучшей светопередачи. В оптроне с управляемым оптическим каналом между излучателем и фотоприемником содержится элемент, величина светопропускания которого может регулироваться. Чаще всего это электрооптический (жидкий кристалл, сегнетокерамика) или магнитооптический материал, в котором управление свойствами канала осуществляется электрическим или магнитным полем. Как элемент схемы такой оптрон представляет собой шестиполюсник с двумя входами: по цепи излучателя и по цепи управления оптическим каналом. При его описании кроме параметров оптопар используется еще модуляционная характеристика вида $I_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{упр}}, I_{\text{упр}})$ при $I_{\text{вх}} = \text{const}$ ($I_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$ – входной и выходной токи; $U_{\text{упр}}$, $I_{\text{упр}}$ – напряжение и ток управления). Подобно тому, как это принято для электронной лампы или полевого транзистора, удобно также оперировать таким параметром, как крутизна $\partial I_{\text{вых}} / \partial U_{\text{упр}}$.

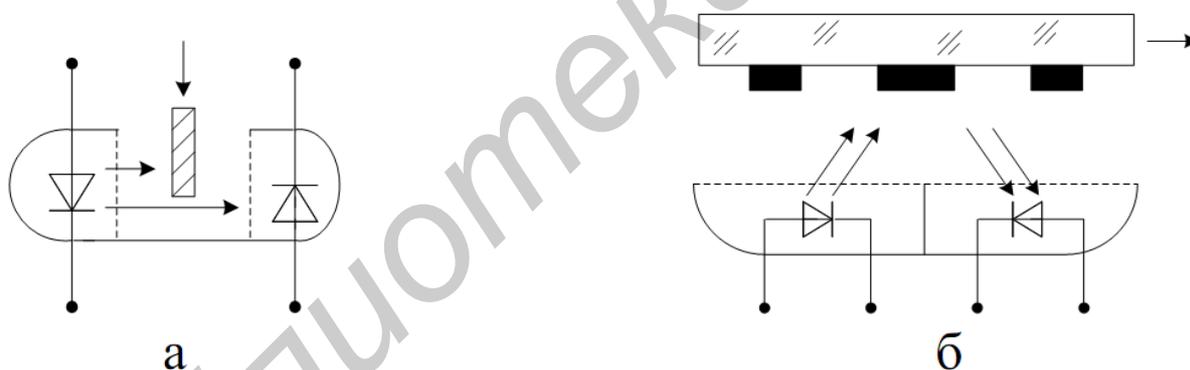


Рис. 2.5. Оптопары с открытым оптическим каналом:

а – щелевого типа, б – отражательная

Светопропускание канала может изменяться и при других формах воздействия: давлении, засветке, нагреве и т. п. В этом случае оптопара с управляемым оптическим каналом, так же как и оптопары с открытым каналом, выступает в качестве сенсорного элемента – датчика.

2.1.6. Примеры использования оптопар при разработке медицинской техники

Перспективные направления развития и применения оптронной техники в значительной степени определились. Оптроны и оптронные микросхемы эффективно применяются для передачи информации между устройствами, не имеющими замкнутых электрических связей (рис. 2.6).

Традиционно сильными остаются позиции оптоэлектронных приборов в технике получения и отображения информации. Самостоятельное значение в этом направлении имеют оптронные датчики, предназначенные для контроля процессов и объектов, весьма различных по природе и назначению. Заметно прогрессирует функциональная оптронная микросхемотехника, ориентированная на выполнение разнообразных операций, связанных с преобразованием, накоплением и хранением информации. Эффективной и полезной оказывается замена громоздких, недолговечных и нетехнологичных (с позиций микроэлектроники) электромеханических изделий (трансформаторов, потенциометров, реле) оптоэлектронными приборами и устройствами (табл. 2.1).

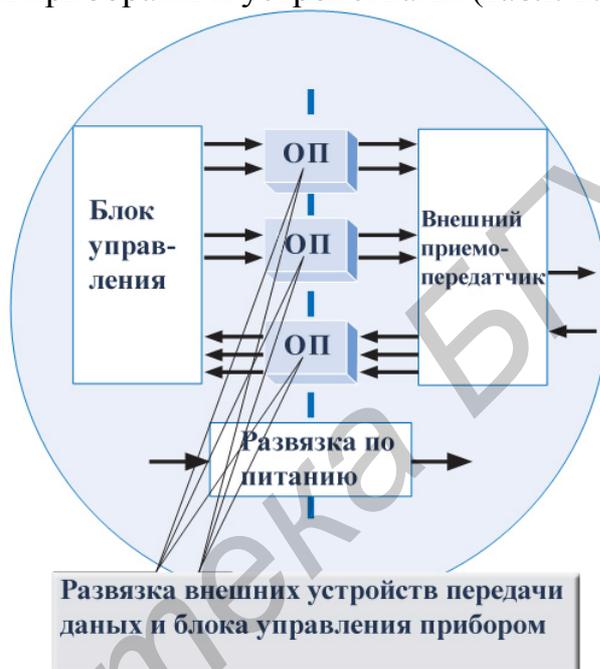


Рис. 2.6. Защита блока управления от помех и электромагнитных наводок, возникающих во внешнем приёмопередатчике

Замена электрорадиокомпонентов на оптронный аналог

Таблица 2.1

Электрорадиокомпонент устройства	Оптронный аналог
1	2
Импульсный трансформатор	Диодная и транзисторная оптопары; оптоэлектронный переключатель; оптоэлектронный развязывающий усилитель
Переключатель	Тиристорная, транзисторная и резисторная оптопары; оптоэлектронный коммутатор
Переменный резистор, потенциометр	Резисторная пара и ее комбинации
Переменный конденсатор, варикап	Оптопара с фотоварикапом
Электрическая батарея	Диодная оптопара и ее наборы

1	2
Линия связи	Волстрон
Полевой транзистор, радиолампа	Оптопара с управляемым оптическим каналом
Бистабильное устройство, триггер	Регенеративный оптрон и его комбинации
Датчик (преобразователь неэлектрических воздействий в электрические сигналы)	Оптопара с открытым оптическим каналом, оптопара с управляемым оптическим каналом
Электронно-оптический преобразователь	Оптрон с оптическим входом и выходом

Оправданным и полезным является использование оптронных элементов в цепях управления импульсных блоков питания (рис. 2.7).

Импульсные источники питания широко используются в современных устройствах. Гальваническая развязка является необходимым требованием надежности и безопасности работы таких источников питания. Быстродействующие оптопары используются в качестве гальванической развязки в цепи обратной связи.

Рассмотрим *усиленную гальваническую изоляцию медицинских приборов*. С ноября 2005 г. любая техника медицинского назначения должна удовлетворять требованиям обновленного стандарта IEC 60601-1-2:2001 EMC. При разработке аппаратуры, осуществляющей передачу цифровых данных, наиболее чувствительные цепи или компоненты, имеющие непосредственный контакт с пациентом, должны быть изолированы от высоковольтных цепей с помощью оптронов или трансформаторов.

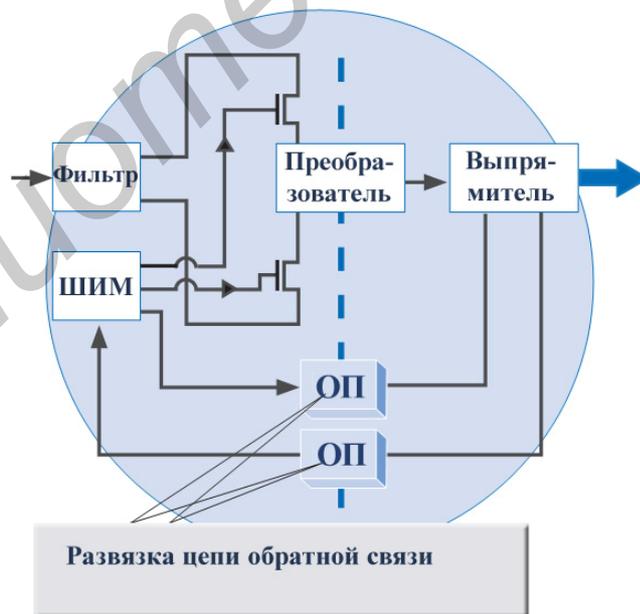


Рис. 2.7. Изоляция в импульсных источниках питания

Оборудование должно иметь защиту от электростатического разряда: не менее 8 кВ по воздуху и не менее 6 кВ при контакте. Медицинские приборы должны быть устойчивы к воздействию радиопомех в полосе частот от 80 МГц до 2,5 ГГц и электромагнитных взаимодействий до 10 В/м для аппаратуры жизнеобеспечения

и 3 В/м для аппаратуры, не связанной с поддержанием жизнедеятельности. Это важнейшие критерии эффективности и безопасности медицинской техники, при воздействии указанных условий не должно происходить отказов компонентов, изменения установленных параметров или их сброса, а также изменения режимов работы и ложного срабатывания схемы защиты. Высококачественные оптроны имеют более высокую устойчивость к внешним электромагнитным полям, чем изолирующие трансформаторы, поскольку в оптопарах при передаче используется оптический сигнал, излучаемый светодиодом и принимаемый фотодиодом. В качестве примера на рис. 2.8 и 2.9 приведены схемы электрокардиографа (ECG) и дефибриллятора с гальванической оптронной развязкой информационных и управляющих сигналов.

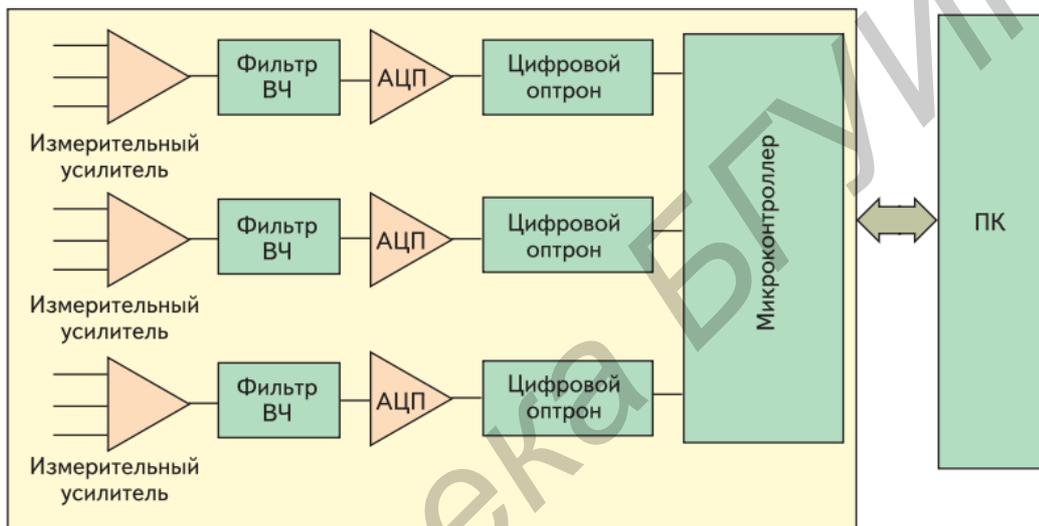


Рис. 2.8. Блок схема входного модуля ЭКГ-аппарата с использованием оптронной развязки при изолировании электродов пациента от электрической схемы прибора

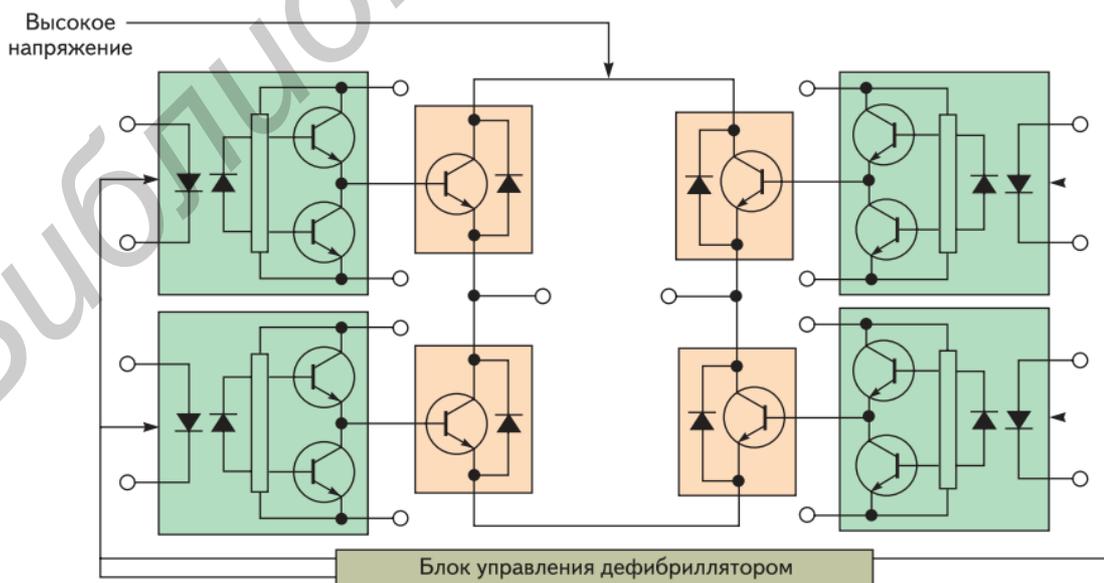


Рис. 2.9. Блок-схема дефибриллятора с использованием оптической развязки для изоляции высоковольтного импульсного каскада от низковольтной управляющей схемы

2.2. Порядок выполнения работы

В данной работе исследуются динамические параметры оптопар 0ЭП9, 0ЭП10, 0ЭП16, АОТ110 и АОТ128.

Установка состоит из задающего генератора 1, который выдает на выходе прямоугольные импульсные опорные сигналы, поступающие также на первый вход двухлучевого осциллографа 2. Время развертки опорного сигнала выбирается так, чтобы на экране осциллографа наблюдать импульс полностью.

Переключатель П1 служит для коммутации соответствующих емкостей (П1-1), задающих требуемую частоту сигналов при одновременном включении в цепь соответствующей оптопары (П1-3) и подачи на второй вход осциллографа выходного сигнала с этой оптопары (П1-2).

Одновременно с опорным сигналом на экране осциллографа наблюдается входной и выходной импульсы соответствующей оптопары. Изменяя время развертки так, чтобы получить удобную для измерений картину, на экране с помощью измерительной сетки определяют для переднего фронта время задержки $\tau_{зд1}$ и время нарастания импульса $\tau_{нар}$, а для заднего фронта время задержки $\tau_{зд2}$ и время спада $\tau_{сп}$ (рис. 2.10).

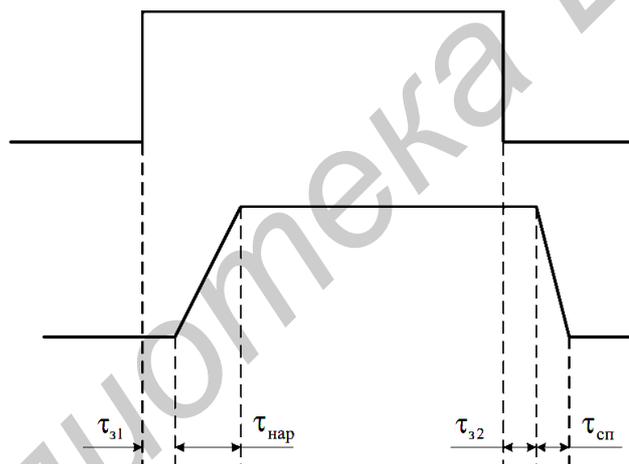


Рис. 2.10. Сигналы на входе и выходе оптопары

С помощью переключателя П1 подключаем к генератору и второму входу осциллографа соответствующую оптопару и, регулируя время развертки, повторяем измерения переднего и заднего фронтов импульса. Таким образом, измеряем динамические параметры всех оптопар.

2.3. Содержание отчета

1. Теоретическая часть (принцип действия, конструкция и основные параметры исследуемых оптопар, взять из справочника).
2. Функциональная схема установки.
3. Рисунки опорного сигнала и выходных сигналов оптопар с указанием измеренных динамических параметров на рисунках.
4. Выводы по работе.

2.4. Контрольные вопросы

1. Что такое оптопара, оптрон?
2. Классификация оптопар.
3. Каковы основные функциональные разновидности оптопар?
4. Параметры оптопар и оптронов.
5. Основные виды оптопар.
6. Каковы особенности и назначение диодных и транзисторных оптопар?
7. Каковы особенности и назначение тиристорных и резисторных оптопар?
8. Устройство и конструкция оптопар.
9. Области использования оптопар.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЛЕ И БЕСКОНТАКТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЛЕ

Цель работы: изучить классификацию, конструктивно-технологические и функциональные особенности слаботочных электрических реле; экспериментально исследовать функциональные параметры бесконтактных полупроводниковых реле, различных видов контактных реле и сравнить их; изучить схемные решения полупроводниковых реле напряжений и влияние параметров схемы на их характеристики.

3.1. Теоретические сведения

3.1.1. Устройство и классификация реле

Конструкцию реле (рис. 3.1) можно представить состоящей из воспринимающей, передающей и исполнительной систем, устройство и принцип действия которых определяют функциональные особенности, области применения и классификацию реле по различным признакам.



Рис. 3.1. Конструкция реле

По принципу действия воспринимающих систем различают следующие виды реле: электромагнитные, магнитоуправляемые (герконовые), магнитогидродинамические, электростатические, электромагнитострикционные, электро-тепловые, электронные, оптоэлектронные, магнитные, криотронные, халькогенидные, оптические. **По принципу действия исполнительных систем** реле делятся на контактные и бесконтактные. По устройству передающих систем реле обычно не классифицируются.

Независимо от устройства и принципа действия общим для всех реле является вид функциональной связи между выходным сигналом Y и входным X . Данная связь может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} Y = Y_{\min} & \text{при } 0 \leq X \leq X_{\text{ср}} ; \\ Y = Y_{\max} & \text{при } X_{\text{ср}} \leq X \leq X_{\text{отп}} ; \\ Y = Y_{\min} & \text{при } X_{\text{отп}} \geq X \geq 0 , \end{cases} \quad (3.1)$$

где Y_{\max} и Y_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения выходного сигнала;

$X_{\text{ср}}$ и $X_{\text{отп}}$ – значения сигнала управления, соответствующие скачкообразным изменениям параметра Y , т.е. срабатыванию и отпусканию реле.

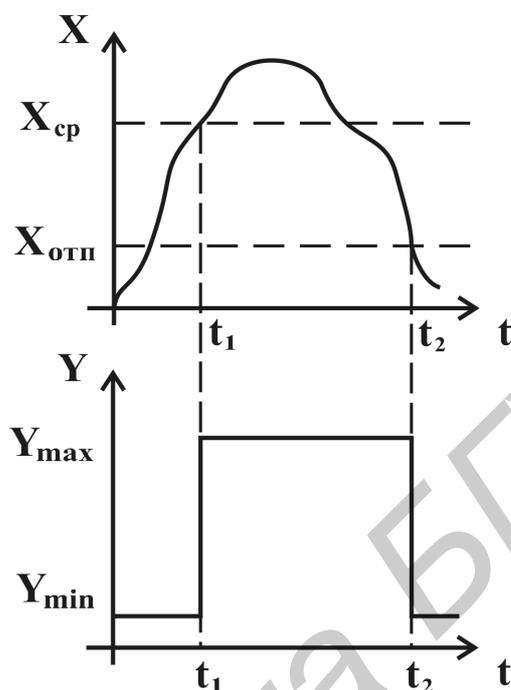


Рис. 3.2. Релейная характеристика реле

Характеристики, описываемые приведенными соотношениями, получили название релейных (рис. 3.2). Основные разновидности релейных характеристик, реализуемые в конкретных конструкциях реле, показаны на рис. 3.3.

По способу управления различают нейтральные, поляризованные и реле-переключатели (импульсные реле). По роду коммутируемого тока реле делятся на низкочастотные (постоянного тока) и высокочастотные. По функциональному назначению реле бывают коммутационные, времени и специальные.

Для управления нейтральными реле используются импульсы любой полярности. Полярность выходного сигнала зависит от электрической схемы исполнительной системы и способу ее подключения к источнику питания.

Управление поляризованными реле осуществляется импульсами строго определенной полярности. В сочетании с электрической схемой подключения исполнительной системы к источнику питания реле определяют такие полярность импульсов на выходе.

Реле-переключатели – это разновидность нейтральных или поляризованных реле. Они имеют один или два входа. После подачи на вход кратковременного импульса управления исполнительная система переключается и находится в фиксированном состоянии до поступления следующего импульса. Фиксирование осуществляется с помощью специального устройства – механической, магнитной или электромагнитной блокировки (защелки). С приходом следую-

щего импульса исполнительная система переходит в другое фиксированное состояние и т. д.

Коммутационные возможности по роду и частоте коммутируемого тока зависят от принципа действия, электроизоляционных и ряда других свойств исполнительной системы, таких, как индуктивность выводов, емкость между коммутируемыми цепями, коэффициент стоячей волны и т. п.

Реле времени предназначены для выдержки (задержки) времени срабатывания исполнительной системы по отношению ко времени поступления и (или) прекращения действия сигнала на входе реле. Значение и точность выдержки времени зависят от принципа действия воспринимающей и передающей систем и других факторов, учитываемых при реализации и эксплуатации реле.

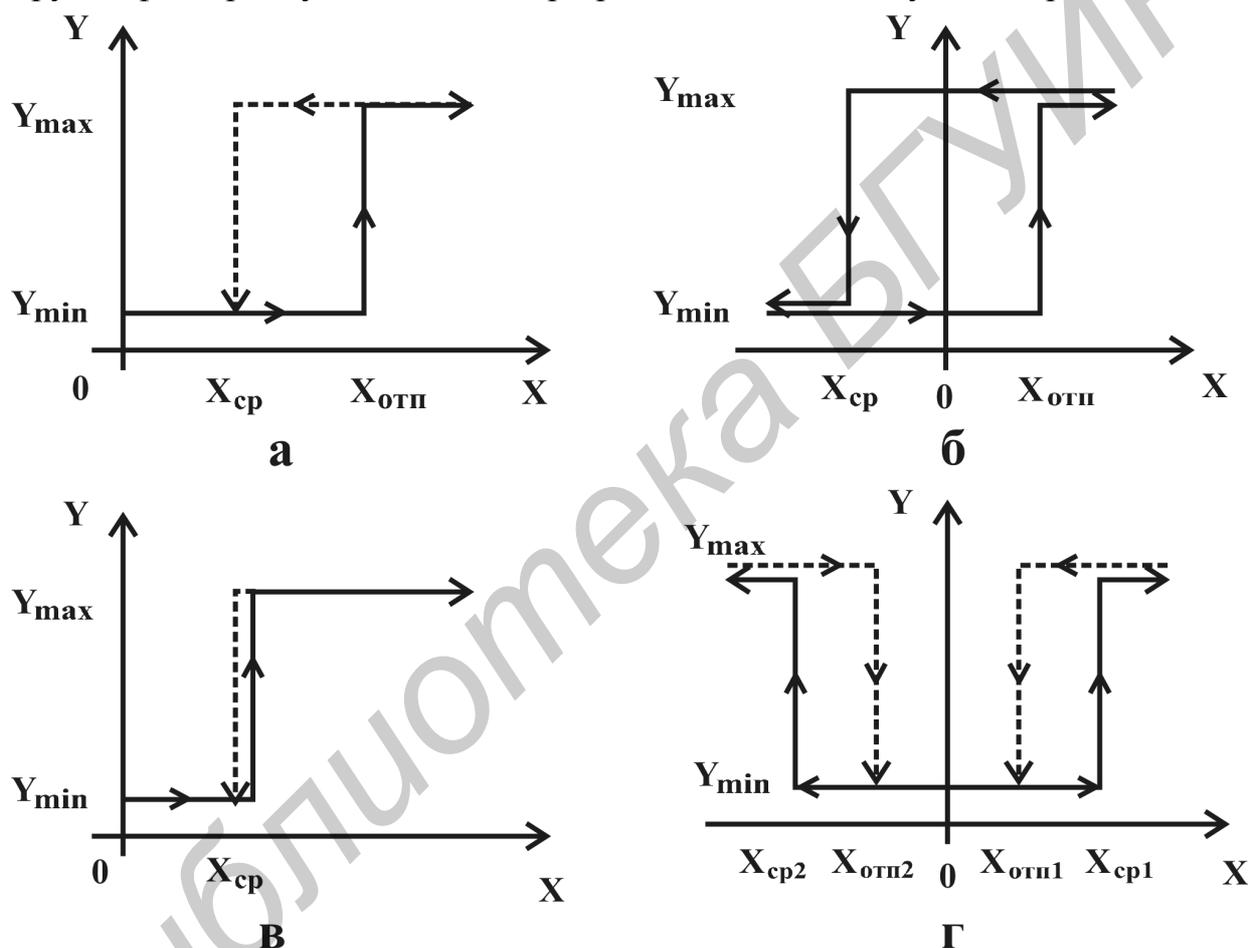


Рис. 3.3. Релейные характеристики реле различного исполнения:

а – нейтральное реле; *б* – реле, имеющее два устойчивых состояния; *в* – однопозиционное реле с механическим самовозвратом; *г* – трехпозиционное реле с нейтральным положением якоря

В группу специальных относят реле, имеющие повышенные показатели по определенным параметрам: сопротивлению изоляции, коэффициенту возврата, коммутируемому напряжению и т. п. К ним относят реле, предназначенные для выполнения узкоцелевых задач, например, реагирования на заданный ток или напряжение (разового действия, индикаторные и т. д.).

3.1.2. Функциональные параметры реле

Чувствительность реле характеризуется минимальной входной мощностью ($X_{\text{ср}}$), при которой происходит скачкообразное изменение выходного параметра – срабатывание реле.

Коэффициент возврата $K_{\text{в}}$ определяется как отношение наибольшей мощности на входе, при которой реле возвращается в исходное положение ($X_{\text{отп}}$), к мощности срабатывания ($X_{\text{ср}}$):

$$K_{\text{в}} = X_{\text{отп}} / X_{\text{ср}}.$$

Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ – это время, отсчитываемое с момента подачи сигнала на вход до появления сигнала на выходе реле.

Время возврата (отпускания) $t_{\text{отп}}$ – это время, отсчитываемое с момента прекращения действия сигнала на входе для реле типа «повторитель» и подачи нового импульса для реле типа «триггер» до исчезновения сигнала на выходе реле.

Рабочее напряжение (ток) $U_{\text{раб}}$ ($I_{\text{раб}}$) выбирается больше, чем напряжение (ток) срабатывания.

Стабильность сопротивления контактного перехода характеризует качество исполнительной системы реле. Она определяет паразитные потери и параметры формируемого сигнала (фронт и амплитуду выходного импульса, уровень помех и искажения).

Сопротивление изоляции характеризует степень электрической развязки между воспринимающей и исполнительной системами, а также коммутируемых цепей между собой и источником питания.

Коммутируемая мощность $P_{\text{ком}}$ – это диапазон мощностей коммутируемых цепей, при которых гарантируется заданное число переключений. В большинстве случаев ограничивается диапазон допустимых коммутируемых токов и напряжений. Коммутируемая мощность – это произведение коммутируемого напряжения в разомкнутом состоянии и коммутируемого тока в замкнутом:

$$P_{\text{ком}} = U_{\text{ком.раз}} \cdot I_{\text{ком.зам}}.$$

Износостойкость реле измеряется числом переключений и колеблется в широких пределах в зависимости от коммутируемой мощности, устройства исполнительной системы и параметров коммутируемой цепи.

Срок службы – это продолжительность работы реле в режимах и условиях, допускаемых технических условиях (ТУ) на них. Износостойкость и срок службы определяют ресурсные возможности реле.

В ТУ на отдельные виды реле могут быть указаны и другие параметры, например, род тока, индуктивность и емкость контактных выводов, сопротивление обмотки и т. д.

3.1.3. Электромагнитные реле

Электромагнитные реле нашли широкое применение в различных областях техники и составляют около 86 % всех выпускаемых реле.

Выпускаемые реле различаются по массе, чувствительности, способу управления, роду коммутируемого тока, коммутируемой мощности и степени защиты от воздействия окружающей среды.

Наибольшей чувствительностью (0,007...5 мВт) обладают **поляризованные реле**. Они предназначены в основном для усиления электрических сигналов в схемах автоматики, измерительных цепях и линиях электросвязи, логических устройствах, допускают большое число переключений (до 10^7) и имеют до пяти входов при большом диапазоне входных сопротивлений (от единиц ом до нескольких килоом). Однако исполнительная система имеет, как правило, одну группу контактов на переключение, коммутируемая мощность не превышает 15 Вт, и они не выпускаются в микроминиатюрном и миниатюрном исполнениях.

Нейтральные реле более универсальны. Они обладают широким диапазоном по чувствительности (10...250 мВт), коммутируемым токам и напряжениям. Используются для управления исполнительными устройствами в системах автоматики, сигнализации, контроля и защиты, в программных, кодирующих и запоминающих устройствах, для коммутаций цепей постоянного и переменного тока частотой до 100 МГц. Допустимое число переключений достигает 10^6 , быстродействие – в пределах 3...10 мс, возможен дребезг контактов при замыкании.

Реле-переключатели представляют собой модификацию поляризованных или нейтральных реле. Управление кратковременным импульсом существенно снижает потребление энергии и обеспечивает более благоприятные условия работы обмоток, так как практически отсутствует перегрев. В результате повышается надежность работы реле.

Устройство магнитной системы реле

В простейшем случае магнитная система состоит из обмотки, размещенной на магнитопроводе, и исполняет роль воспринимающей системы. Предназначена для преобразования поступающей на вход реле электрической энергии в механическую. Основные разновидности используемых магнитных систем показаны на рис. 3.4.

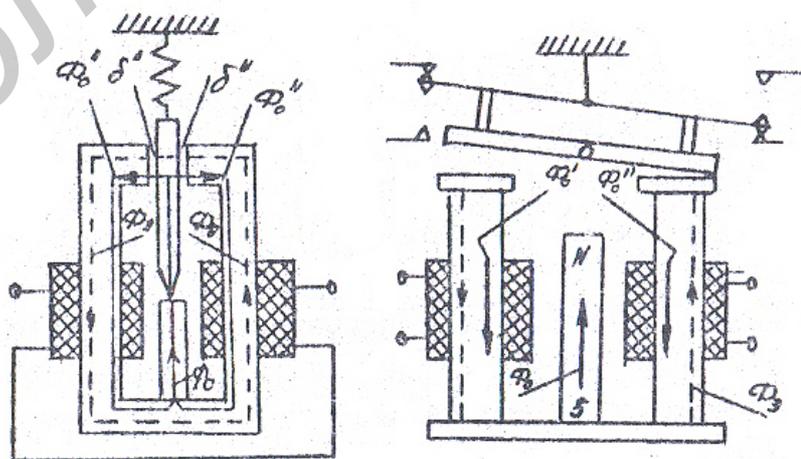


Рис. 3.4. Основные разновидности магнитных систем реле

Системы, показанные на рис. 3.4, используются в поляризованных реле и переключателях. Для них характерно то, что при нахождении якоря в среднем положении магнитный поток постоянного магнита Φ_0 равномерно распределяется по обоим плечам магнитопровода, а создаваемые силы притяжения якоря равны между собой. При пропускании постоянного тока по обмотке возникает магнитный поток Φ_m , который в одном плече магнитопровода суммируется с потоком постоянного магнита, в другом – вычитается. При этом якорь притягивается к полюсу, по которому проходит суммарный поток. При отсутствии сигнала на входе якорь переключателя фиксируется у одного из полюсов потоком постоянного магнита вследствие резкого увеличения его в том плече магнитопровода, к полюсу которого приблизился якорь. В этом и заключается суть магнитной блокировки или защелки. Переключение якоря в другое устойчивое состояние осуществляется подачей импульса необходимой полярности либо в обмотку второго плеча магнитопровода, либо в обмотку первого, к полюсу которого он притянут.

Устройство контактной системы реле

В качестве исполнительной системы реле контактная система должна обеспечивать малое и стабильное значение сопротивления контактов, хорошую изоляцию токоведущих цепей, необходимое число коммутаций, высокую надежность контактирования.

В реле используются преимущественно **точечные** и **плоскостные контакты** (рис. 3.5). По числу контактов на одной контактной пластине (пружине) контактные системы делятся на две группы: с **одинарными** и **двойными контактами**; по способу коммутации электрической цепи: с **одним** и **двумя воздушными зазорами между контактами**. В зависимости от положения в процессе коммутации контакты разделяются на **подвижные** и **неподвижные**. При обесточенной обмотке различают **нормально замкнутые** и **нормально разомкнутые** контакты. В технической документации на реле нормально замкнутые контакты также называют размыкающими (размыкаются при подаче напряжения на обмотку), а нормально разомкнутые – замыкающими.

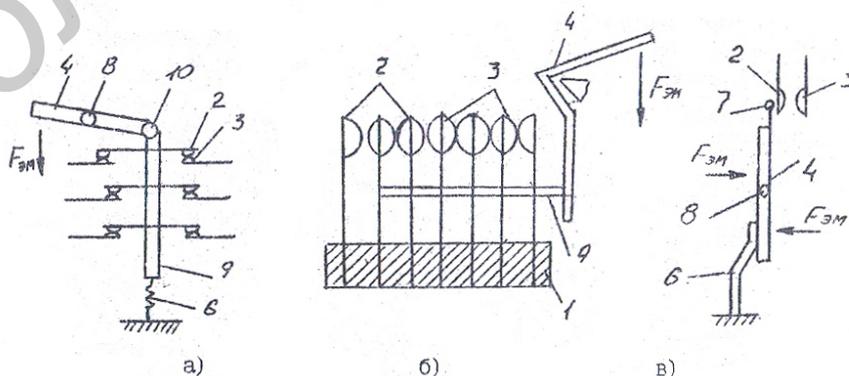


Рис. 3.5 Схематическое устройство передающих систем электромагнитных реле:
 1 – изолятор; 2 – подвижный контакт; 3 – неподвижный контакт; 4 – якорь; 5 – опора;
 6 – возвратная пружина; 7 – бусинка; 8 – ось якоря; 9 – траверса; 10 – шарнир

В замкнутом состоянии контакты прижимаются друг к другу с некоторым усилием P_k , называемым *контактным нажатием*.

При соприкосновении двух контактных поверхностей в силу их шероховатости сумма участков с чистым металлическим контактом (полезная контактная площадь) значительно меньше кажущейся контактной поверхности. Участки с чисто металлической проводимостью образуются за счет разрыва поверхностной пленки выступами поверхностей под действием P_k и вследствие пробоя оксидной пленки на контактах электрическим полем. Ток, проходя из одного контакта в другой, **стягивается к проводящим участкам** (рис. 3.6,а), где плотность его возрастает, что обуславливает **сопротивление стягивания**. Более прочные участки пленки при сжатии приобретают свойства полупроводника с большим удельным сопротивлением (квазиметаллический контакт), что обуславливает появление **сопротивления пленок**. Эквивалентная схема контактного сопротивления контакта представлена на рис. 3.6, б, где $R_{к-д1}$ и $R_{к-д2}$ – сопротивления контакт-деталей контактов; $R_{ст}$ – сопротивления стягивания для обоих контактов; $R_{пл1}$ и $R_{пл2}$ – сопротивления, обусловленные пленками на поверхности контактов; $R_{п}$ – переходное сопротивление контакта; R_k – сопротивление контакта.

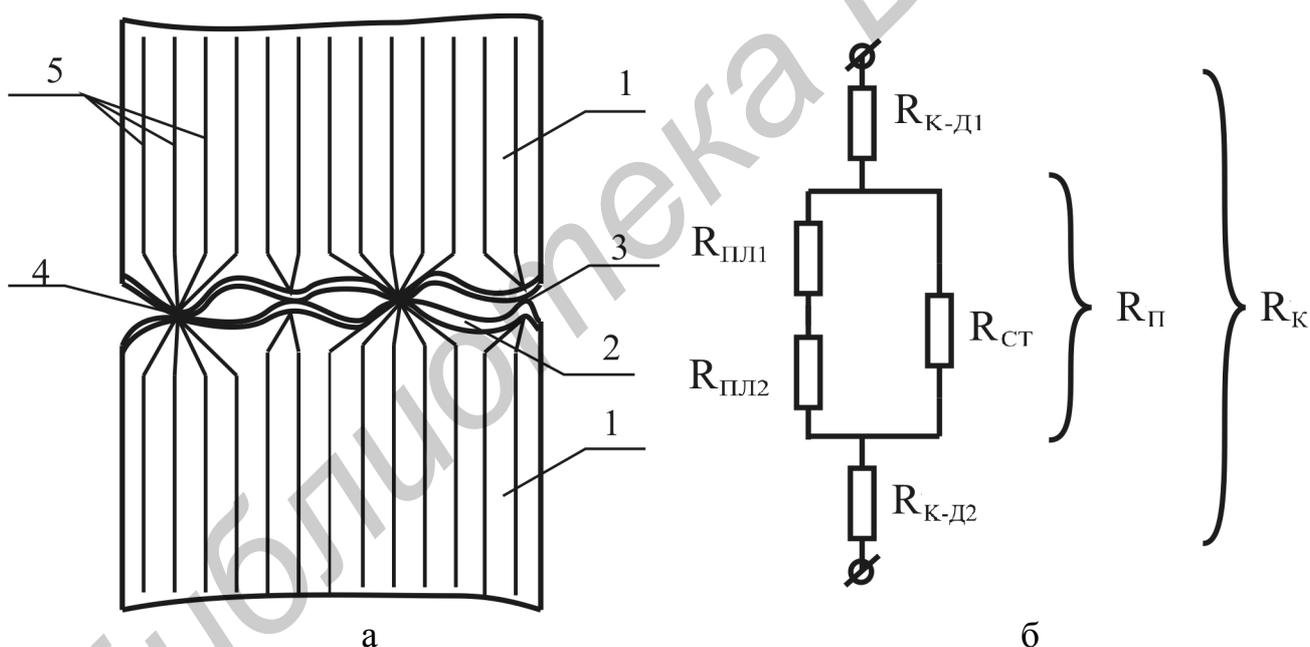


Рис. 3.6 Схематическое изображение контакта реле (а) и эквивалентная схема контактного сопротивления (б):

1 – контакт-детали; 2 – пленки на поверхности контакт-детали; 3 – точка соприкосновения металлических поверхностей через тонкие пленки ($R_{пл}$); 4 – точки прямого соприкосновения металлических поверхностей ($R_{ст}$); 5 – линии протекающего тока

В процессе эксплуатации сопротивление контакта в основном определяется $R_{ст}$ и $R_{пл}$ и в значительной степени зависит от P_k . В зависимости от приложенной силы изменяется количество соприкасающихся точек. При небольшом P_k точек соприкосновения мало. Поэтому $R_{п}$ может резко увеличиваться, и в

цепи наступит разрыв. Чтобы этого не произошло, следует увеличивать R_k . Но при больших R_k происходит деформация, следовательно, быстрый износ контакт-деталей. Минимальное значение R_k , достаточное для контакта, невелико (для золота 1 гс, для серебра 15 гс). В конкретных контактных устройствах применяется R_k в несколько раз больше минимально допустимого (примерно в 3 раза).

В связи с тем, что R_{Π} зависит от множества параметров, значение его после каждого замыкания контактов изменяется. Параметр, который характеризует разброс значений R_{Π} контактной пары, называется **статической нестабильностью сопротивления** электрического контакта. Количественно он определяется как среднеквадратичное отклонение R_{Π} от среднего значения.

В процессе эксплуатации реле в аппаратуре под воздействием механических нагрузок возникают колебания контактных элементов относительно друг друга. При этом сопротивление электрического контакта может как увеличиваться, так и уменьшаться по отношению к его значению при отсутствии вибрации. Параметр, определяющий это изменение, называется **динамической нестабильностью сопротивления** электрического контакта. Его значение зависит от частоты вибрации и ускорения. В ТУ значение динамической и статической нестабильностей задается в процентах от номинального значения сопротивления электрического контакта.

При протекании тока через контакт происходит выделение тепла и перегрев контакта относительно температуры окружающей среды ($T_{\text{окр}}$). Общая температура перегрева зависит от потерь в точках контактирования и в теле контакта при прохождении по нему тока.

Результирующая температура в точках контактирования T_k и теле контакта T_t не может превышать определенных значений, что приводит к ограничению допустимого тока через контакт. T_k ограничивается тем, что при ее повышении активизируется процесс образования пленок. T_t ограничивается допустимой температурой диэлектриков, используемых в конструкции.

Контакты реле изготавливаются из драгоценных металлов и их сплавов. Наиболее часто применяют серебро, золото, сплавы золота с никелем (95 % Au + 5 % Ni) и платины с иридием (90 % Pt + 10 % Ir). Для коммутации малых токов, а также при малом числе срабатываний применяются контакты реле, гальванически покрытые золотом или родием.

Применяются пружинно-контактные сплавы: Ag – Mg – Ni и Ag – Mg – Ni – Au. Они обладают повышенной износостойкостью и обеспечивают более стабильное R_{Π} контактов. Применение их позволяет изготавливать детали, совмещающие функции контакта и пружин. При этом уменьшаются габариты контактных систем и повышается их устойчивость к внешним механическим воздействиям.

Контакты из технически чистого золота в воздухе практически не окисляются, имеют малое и стабильное R_{Π} . Однако они имеют невысокую механическую износостойкость, склонны к иглообразованию при малых токах и свариваются.

ванию при больших. Применяются преимущественно для коммутации токов менее 100 мА и напряжений менее 30 В.

3.1.4. Герконовые реле

Герконовые реле создаются на базе **магнитоуправляемых контактов (МК)**. Наиболее распространенная конструкция МК, используемого в реле, схематически показана на рис. 3.7, *а*. Она состоит из двух пластин, герметически запаянных (заваренных) в стеклянный баллон. Герметичность является характерной особенностью МК. Отсюда их второе название – герконы (герметические контакты).

Пластины МК изготавливаются из магнитных материалов и совмещают в себе функции магнитопровода и электрической контактной цепи. Поэтому, если к баллону поднести постоянный магнит, то его магнитный поток, сосредотачиваясь в пластинах, создает в воздушном зазоре магнитную силу их взаимного притяжения. При соответствующей магнитодвижущей силе (МДС) магнита пластины притягиваются друг к другу и создают электрический контакт. После снятия магнитного поля пластины возвращаются в исходное положение под действием сил упругости. Этот же принцип используется и в МК на переключение (рис. 3.7, *б*). Неподвижный контакт *1* выполняется из немагнитного материала и в исходном состоянии замкнут с подвижным контактом *2*.



Рис. 3.7. Схематическое устройство магнитоуправляемых контактов:
а – МК на замыкание; *б* – МК на переключение

Управление МК можно осуществлять магнитным полем соленоида (рис. 3.8, *а*). При пропускании по обмотке соленоида постоянного тока контакты замыкаются, а при отключении – размыкаются. В ряде случаев для управления МК используются комбинации магнитных полей, создаваемых постоянным магнитом и соленоидом (рис. 3.8, *б*). Если МДС постоянного магнита недостаточна для замыкания контактов, то они будут находиться в разомкнутом состоянии. Пропуская по обмотке ток в направлении, при котором магнитные поля постоянного магнита и соленоида суммируются, получаем магнитный поток, достаточный для замыкания контактов. После отключения обмотки контакты удерживаются в замкнутом состоянии только полем постоянного магнита. Для размыкания этих контактов достаточно кратковременного импульса тока в обмотке соленоида в обратном направлении. В этом случае имеем реле-переключатель или коммутационный элемент запоминания информации.

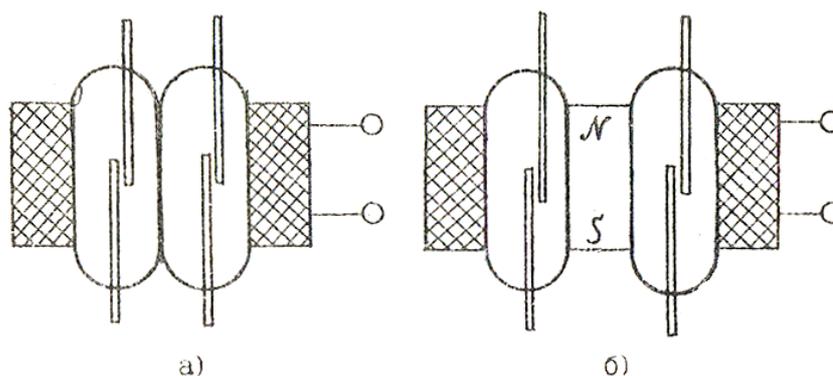


Рис. 3.8. Схематическое устройство герконовых реле:
а – нейтральное реле; *б* – поляризованное реле

Для повышения электропроводности, получения малого и стабильного переходного сопротивления контакты коммутирующей части покрывают серебром, золотом, родием и др.

Для повышения надежности контактирования контакты обезгаживаются при температурах до 400 °С и более. При этом сгорают поверхностные органические пленки, которые являются основной причиной нестабильности сопротивления контактов. Внутри баллона создается вакуум или баллон заполняется сухим газом. Состав газа определяется в зависимости от требований к режимам коммутации.

Индивидуальная герметизация и другие конструктивно-технологические мероприятия позволяют довести число коммутаций до 10^9 , быстродействие – до 0,8...2 мс, сопротивление контактов до 50...150 мОм, сопротивление изоляции до 10^9 МОм и существенно уменьшить габариты высоковольтных реле (в 5 – 6 раз).

Однако токоведущие части МК обладают худшей электропроводностью по сравнению с электромагнитными реле. Поэтому при прочих равных условиях на них теряется большая мощность. Кроме того, газ, вакуум, стекло – плохие проводники тепла, затрудняют рассеивание выделяемой на контактах мощности. Поэтому через пластины МК сечением, равным сечению, например, контактных пружин электромагнитных реле, можно пропускать в 3 – 5 раз меньший ток. Кроме того, МК более чувствительны к влиянию внешних магнитных полей, более критичны к переходным процессам в коммутируемой цепи. В частности, при (3 – 5)-кратной токовой перегрузке по отношению к номинальной возможно сваривание контактов.

Отмеченные особенности делают предпочтительными герконовые реле для коммутации слаботочных цепей с токами до 100...250 мА при напряжениях до 30...60 В в тех случаях, когда необходимо повышение быстродействия и числа коммутаций.

В настоящее время идет поиск новых конструктивных решений, позволяющих при сохранении положительных свойств МК продолжить процесс миниатюризации и улучшения функциональных параметров релейных устройств. Значительные перспективы в этом плане появляются в связи с созданием

пружинно-контактных сплавов с магнитной памятью. Их применение позволяет в 5 – 7 раз уменьшить габариты и массу герконовых реле-переключателей, существенно повысить их быстродействие и чувствительность. Принципиально новым направлением можно считать создание МК с жидкометаллическими контактами. Использование этих МК позволяет получить релейную характеристику с крутизной фронта коммутируемых сигналов меньше 1 пкс, исключить дребезг контактов, обеспечить стабильность $R_{\text{п}}$ контактов до 1...10 %. При этом не предвидится ограничений по числу коммутаций.

3.1.5. Бесконтактные реле

Контактные коммутационные элементы выполняют переключение электрических цепей при непосредственном механическом воздействии для ручного управления и под воздействием электромагнитных сил при автоматическом управлении. Электромагнитные коммутаторы имеют невысокое быстродействие – в лучшем случае порядка нескольких микросекунд. Значительное повышение быстродействия обеспечивается применением электронных коммутационных элементов, построенных на полупроводниковых приборах. Реле этого типа способны коммутировать переменный ток в варианте оптосимистора или постоянный – в варианте оптотиристора. Опционально оптосимисторы могут иметь функцию включения выходного сигнала при переходе через ноль, а также встроенные варисторы для подавления коммутационных помех.

Рассмотрим *MOSFET-реле*. MOSFET-реле объединяют преимущества, достигнутые в области светодиодной и фотодиодной техники, а также полевых транзисторов, что позволяет достигнуть минимальных размеров микросхем и их потребляемой мощности. Как правило, реле содержат двойную цепь нагрузки MOSFET, обеспечивающую полную универсальность их использования, так как для этих устройств неважно, подключена ли нагрузка переменного или постоянного тока и в каком направлении. На рис. 3.9 представлена внутренняя структура исследуемого реле G3VM-61A1.

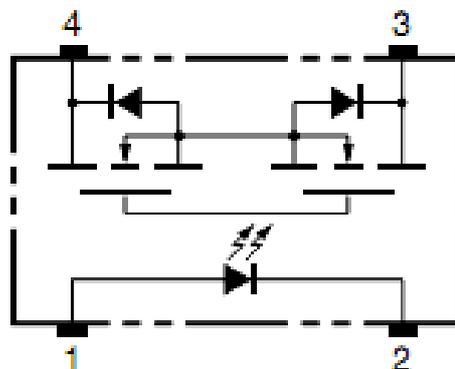


Рис. 3.9 – Структура бесконтактного полупроводникового реле

Принцип действия данного реле состоит в том, что когда на управляющие контакты 1 и 2 подается управляющий сигнал – напряжение от 1,0 до 1,3 В, то входной сигнал, поданный на вход 4, пропускается открытым в данном случае

составным ключом на двух полевых транзисторах. Если уровень входного управляющего напряжения низкий (меньше 1 В), то ключ находится в запертом состоянии. Пропускная способность реле – $I_{\text{вх max}} = 500 \text{ мА}$, $U_{\text{вх max}} = 60 \text{ В}$. Ток утечки при открытом выходе реле – до 1 А. На рис. 3.10 представлены временные характеристики включения и выключения реле, а также зависимость предельного $I_{\text{вх}}$ от изменения температуры. Время включения находится в пределах от 0,8 до 2,0 мс; время выключения – от 0,1 до 0,5 мс. Ёмкость между входом-выходом $C = 0,8 \text{ пФ}$.

В зависимости от области применения реле делятся на следующие группы:

- общего назначения;
- специального назначения, как правило, низковольтные;
- предназначенные для применения в телекоммуникационном оборудовании с повышенной диэлектрической прочностью или встроенной функцией ограничения тока;

• высококачественные с уменьшенным сопротивлением канала в открытом состоянии.

Кроме того, у каждого типа реле существуют варианты как с нормально разомкнутыми контактами, так и с нормально замкнутыми.

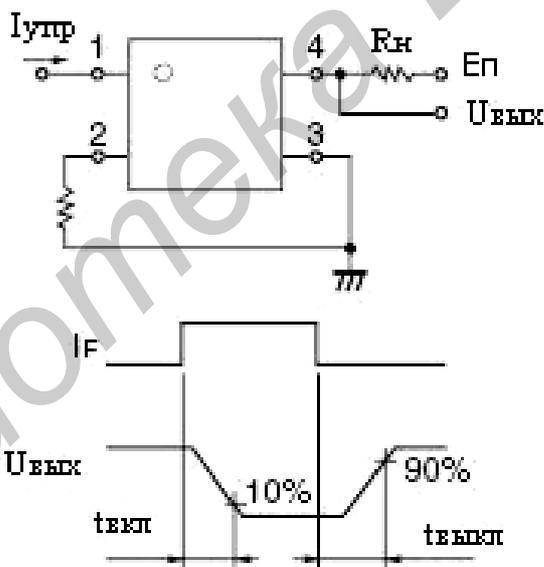


Рис. 3.10. Временные диаграммы срабатывания БПР

3.2. Методика исследования параметров реле

3.2.1. Методика измерения величины и статической нестабильности переходного сопротивления контактов реле

Переходное сопротивление контактов реле измеряется методом вольтметра-амперметра согласно ГОСТ 24606.3 – 82.

Метод вольтметра-амперметра заключается в определении значения падения напряжения на контактном переходе при заданном значении тока. Измере-

ния проводятся на постоянном токе. При этом ЭДС в цепи измерения должна быть в пределах 1...60 В. Сопротивление вольтметра должно в 100 раз превышать значение измеряемого сопротивления контакта. Значение сопротивления нагрузочного резистора должно быть больше сопротивления контакта не менее чем в 100 раз.

Измерение сопротивления контакта производят следующим образом. Замыкают контакт-детали и после этого измеряют падение напряжения U на контактном переходе и ток I в цепи контакта. Затем рассчитывают переходное сопротивление по формуле

$$R_x = U/I, \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

Погрешность измерения сопротивления контакта с вероятностью $f = 0.9$ в этом случае будет равна

$$\delta = 1,1\sqrt{\delta_V^2 + \delta_A^2}, \quad (3.3)$$

где δ_V и δ_A – соответственно погрешности вольтметра и амперметра, %.

Измерение статической нестабильности сопротивления заключается в определении его среднеквадратичного отклонения по результатам многократных измерений.

Измерения сопротивления контактов проводят по методике, описанной выше. Перед каждым измерением производят размыкание контактов без электрической нагрузки.

По результатам измерений рассчитывают среднее арифметическое значение сопротивления контакта R_{cp} по формуле

$$R_{cp} = \sum_{i=1}^n R_{xi} / n, \quad (3.4)$$

где n – число измерений; R_{xi} – значение сопротивления при i -м измерении, Ом.

Статическую нестабильность переходного сопротивления контакта определяют по формуле

$$\Delta R_{ст} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_c - R_{xi})^2 / n}. \quad (3.5)$$

3.2.2. Методика определения параметров быстрого действия реле

К параметрам быстрого действия реле относятся такие параметры, как время срабатывания, время отпускания и предельная частота срабатывания.

Измерения проводят следующим образом. С источника прямоугольных импульсов одновременно на реле и на вход первого канала осциллографа подают импульсы амплитудой, достаточной для надежного срабатывания реле. Сигнал, снимаемый с выхода реле, подают на вход второго канала осциллографа. На экране осциллографа наблюдают сдвиг переднего и заднего фронтов импульсов на выходе реле относительно соответствующих фронтов импульсов на входе. Величину этого сдвига и определяют значения времени срабатываний $t_{ср}$ и времени отпускания $t_{отп}$.

Изменяя частоту следования импульсов, можно определить предельную частоту, при которой реле успевает замыкать и размыкать контакты, т. е. когда сигнал, снимаемый с выхода реле, имеет форму повторяющихся импульсов.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание к исследуемым реле, методики исследования параметров реле, а также конструкцию лабораторного макета.

2. Определить напряжения срабатывания и отпускания реле; построить релейные характеристики исследуемых реле.

3. Определить статическую нестабильность переходного сопротивления контактов исследуемых реле.

4. Определить время срабатывания и отпускания, предельную частоту срабатывания исследуемых реле.

5. Смоделировать в среде MicroCap простейшую схему подключения БПР с его внутренней структурой, представленную ниже. Затем провести исследование временных и частотных характеристик, изменяя следующие параметры:

3.4. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Экспериментальные и расчетные данные по исследуемым в макете реле.

4. Схема и результаты проектирования в среде MicroCap

5. Выводы по полученным результатам, сравнение БПР с другими исследуемыми реле.

3.5. Контрольные вопросы

1. Общий принцип работы реле, конструкция реле.

2. Классификация реле.

3. Релейная характеристика реле, виды релейных характеристик.

4. Основные функциональные параметры реле.

5. Устройство и принципы работы электромагнитных реле.

6. Особенности конструкции контактной системы реле.

7. Статическая и динамическая нестабильности переходного сопротивления контактов.

8. Устройство и принципы работы герконовых реле.

9. Принцип работы бесконтактных полупроводниковых реле.

Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: изучить характеристики и эксплуатационные особенности катушек индуктивности; усвоить практические методики расчета и приобрести навыки в экспериментальном исследовании параметров катушек индуктивности.

4.1. Теоретические сведения

4.1.1. Принцип действия и общие свойства катушек индуктивности

Катушки индуктивности (КИ) – электрорадиоэлементы, работа которых основана на эффекте самоиндукции, т. е. на взаимодействии электрического тока проводника и магнитного поля, создаваемого этим током. Для увеличения степени взаимодействия (потокосцепления) проводник выполняют в виде витка (контура) или совокупности витков. Ток, протекающий по замкнутому контуру, создает магнитный поток, пронизывающий данный контур. Собственная индуктивность L замкнутого витка определяется как отношение $L = \omega/I$, где ω – потокосцепление; I – ток витка. Иными словами, собственная индуктивность (в дальнейшем просто индуктивность) является коэффициентом пропорциональности между током проводника и суммарным потокосцеплением. Если проводник выполнен в виде множества витков, что характерно для КИ то в общем случае необходимо учитывать процессы электромагнитного взаимодействия совокупности элементарных витков. Единицей измерения индуктивности является Генри (Гн). 1 Гн – такая индуктивность, при которой ток в 1 А порождает потокосцепление в 1 Вб.

КИ применяются в РЭА для перераспределения токов различной частоты в электрических цепях. В частности, они используются в фильтрах, колебательных контурах, генераторах, интеграторах, в качестве дросселей ВЧ и в других устройствах. Под КИ обычно понимают высокочастотные катушки, рассчитанные для работы на частотах выше 100 кГц. Именно такие КИ являются предметом изучения и исследования в данной работе.

Основными параметрами КИ являются *индуктивность, допустимое предельное отклонение индуктивности, собственная емкость, добротность, стабильность и надежность*.

Индуктивность КИ в зависимости от функционального назначения может быть от нескольких наногенри до нескольких десятков миллигенри. Допустимое относительное отклонение индуктивности катушек может быть различным: от 0,1...0,5 % – для катушек высокодобротных контуров; до 20 % и более – для катушек дросселей и других элементов с низкими требованиями по точности.

Собственная емкость катушек индуктивности обусловлена распределенной емкостью между витками и емкостью между обмоткой и корпусом или экраном катушки.

Добротность Q характеризует суммарную величину потерь энергии электрического тока и электромагнитного поля в элементах конструкции катушки (проводах обмотки, диэлектрике каркаса, сердечнике и др.). Добротность КИ определяется отношением $Q = \omega L/R$ где ω – круговая частота R – эквивалентное сопротивление потерь. Добротность большинства КИ широкого применения находится в диапазоне 30...400.

Потери и собственная емкость являются паразитными параметрами, степень влияния которых сильно зависит от рабочей частоты. Особенность их проявления и взаимодействия с параметром индуктивности в первом приближении поясняет схема замещения катушки индуктивности (рис. 4.1), которая включает собственно индуктивность L , собственную емкость C_L , сопротивление потерь в индуктивной ветви R_L (в проводе) и сопротивление потерь R_{LC} , учитывающее потери в диэлектрике, сердечнике, экране. Потери увеличиваются с ростом частоты. При расчете добротности потери приводятся к одному эквивалентному сопротивлению R . Собственная емкость C_L совместно с индуктивностью L образует параллельный резонансный контур, добротность которого определяется сопротивлением потерь R . Резонансная частота этого контура равна $f_0 = 1/(2\pi(LC_L)^{1/2})$ и называется *собственной резонансной частотой* КИ. Индуктивный характер сопротивления реальная катушка имеет на частотах ниже резонансной. На практике, как правило, КИ применяются на частотах не выше $f_0/3$.

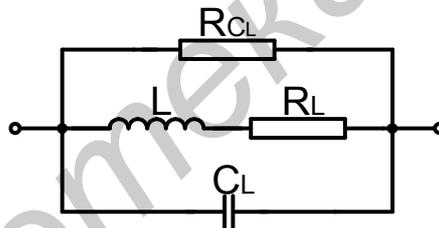


Рис. 4.1. Эквивалентная схема катушки индуктивности

Стабильность КИ характеризуется изменением ее параметров под воздействием температуры, влаги, во времени и сильно зависит от конструкции.

Температурная стабильность величины индуктивности количественно характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ) $\alpha_L = (1/L_0)(dL/dT)$, где L_0 – начальное значение индуктивности при температуре T_0 ; dL – изменение величины индуктивности, возникающее при изменении температуры на dT относительно T_0 .

Температурная нестабильность параметров катушек индуктивности обусловлена следующими основными факторами:

- изменение диаметра каркаса при изменении температуры;
- изменение толщины скин-слоя, по которому протекает ток высокой частоты вследствие температурного изменения удельного сопротивления материала провода;

- изменение влияния экрана при его наличии;
- изменение магнитных свойств сердечника (для КИ с сердечником).

Влияние температуры на добротность обусловлено в основном изменением сопротивления провода. При использовании медного провода добротность катушки падает примерно на 10 % на каждые 30° повышения температуры.

Временная стабильность величины индуктивности характеризуется коэффициентом старения $\beta_t = (1/L_0)(dL/dt)$, где t – время.

Наиболее сильное старение наблюдается у катушек с каркасами из органических диэлектриков. Поэтому в стабильных катушках применяются керамические каркасы, практически не подверженные старению.

Влажность вызывает увеличение собственной емкости и вследствие возрастания диэлектрических потерь снижение добротности. Для защиты катушек от действия влаги применяют герметизацию или пропитку и обволакивание обмотки компаундами и лаками. Хотя это и приводит к увеличению собственной емкости и снижению добротности, но тем не менее повышает влагостойкость и механическую прочность.

Надежность КИ количественно оценивается одним из параметров – средним временем безотказной работы или средней интенсивностью отказов. Для катушек индуктивности наиболее характерны медленные отказы, вызываемые старением диэлектрических и магнитных материалов и окислением проводников. Повышенная влажность и температура способствуют ускоренному протеканию этих процессов. Внезапные отказы обычно происходят вследствие нарушения электрических контактов проводов обмоток с выводами и механических повреждений обмоток.

4.1.2. Конструктивные особенности катушек индуктивности

По различным конструктивным признакам КИ могут быть разделены на:

- однослойные и многослойные;
- экранированные и неэкранированные;
- без сердечника и с сердечником (магнитным или немагнитным);
- цилиндрические, плоские и печатные (пленочные);
- незащищенные (открытые), частично защищенные пропиткой, обволакиванием или опресовкой и защищенные герметичным или негерметичным кожухом.

Конструкция КИ должна обеспечивать выполнение заданных технических и эксплуатационных требований, быть технологичной, иметь минимальную стоимость.

Электрические параметры и стоимость катушки в значительной степени определяются ее каркасом. Каркас должен обеспечивать удобство намотки провода, распайку выводов обмотки, надежную фиксацию подстроечного сердечника при его использовании. Материал каркаса выбирается из соображений технологичности и получения заданных характеристик катушки. Он должен

быть достаточно механически прочным, влаго- и теплостойким, вносить малые потери, иметь небольшой температурный коэффициент линейного расширения.

Каркасы катушек с не очень высокими параметрами могут изготавливаться из дешевых органических материалов: полистирола, фенопластов, различных пресс-материалов. Каркасы катушек с повышенными показателями изготавливаются из радиотехнической керамики типа В: на УКВ и КВ – из ультрафарфора и ВЧ-стеатита, на ДВ и СВ – из радиофарфора.

Размеры каркаса определяют из общих конструктивных соображений и требуемой добротности, которая пропорциональна диаметру.

Выводы в каркасах из пластмасс запрессовывают непосредственно в тело каркаса. В керамических каркасах выводы выполняют в виде специальных хомутиков, штифтов или металлизированных полосок, к которым и присоединяется намоточный провод.

Некоторые типовые формы каркасов КИ различного назначения приведены на рис. 4.2.

Обмотки КИ по виду укладки делятся на однослойные и многослойные (рис. 4.3). К однослойным обмоткам относятся сплошная однослойная и обмотка с шагом (см. рис. 4.3, а, б).

Катушки со сплошной однослойной обмоткой отличаются высокой добротностью (150...250) и стабильностью при индуктивности не выше 200...500 мкГн (табл. 4.1) и применяются в контурах КВ и СВ.

Таблица 4.1

Предельная индуктивность сплошной однослойной обмотки

Диаметр каркаса, мм	10	15	20	30	50
Предельная инд-сть, мкГн	30	50	100	200	500

Однослойные катушки с шагом отличаются высокой добротностью (150...400) и стабильностью и применяются в контурах КВ и УКВ. Значения предельной индуктивности для обмоток с шагом зависят от диаметра каркаса и приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Предельная индуктивность однослойной обмотки с шагом

Диаметр каркаса, мм	6	10	15	20	25
Предельная индуктивность, мГн	1,8	4	10	20	30

Для повышения точности намотки провода применяются нарезные каркасы, у которых на поверхности имеется неглубокая спиральная канавка, фиксирующая провод при намотке. Однако погружение провода в диэлектрик каркаса несколько понижает добротность и увеличивает собственную емкость. Чтобы этого не происходило, применяют ребристые каркасы.

Для высокостабильных КИ применяются специальные способы намотки: тугая, горячая и осажденная. Тугая намотка производится со значительным натяжением. При горячей намотке провод нагревается до 120...180 °С и незначительно натягивается. В КИ с осажденной обмоткой витки образуются нанесением слоя металла на поверхность керамического каркаса методом вжигания и последующего гальванического наращивания.

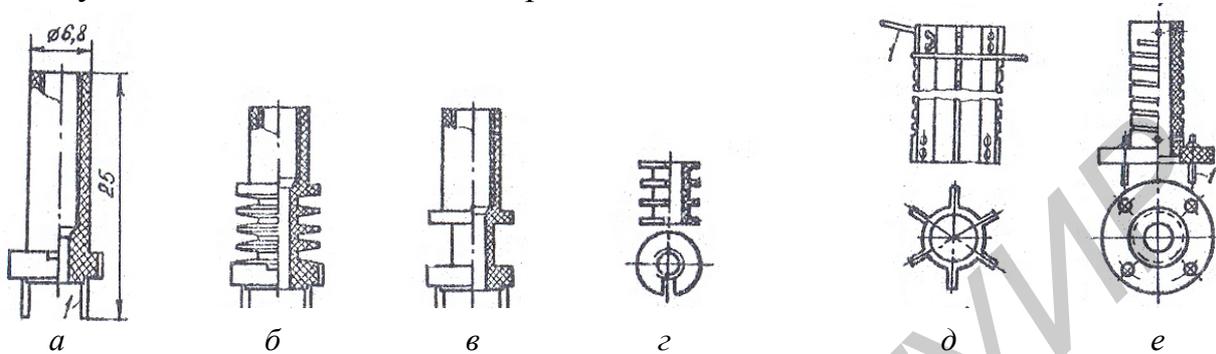


Рис. 4.2. Каркасы цилиндрических катушек:

а, б, в – типовые каркасы для приемников длинных и средних волн; *г* – каркасы для броневых сердечников; *д* – ребристый каркас; *е* – каркас с канавкой (нарезной)

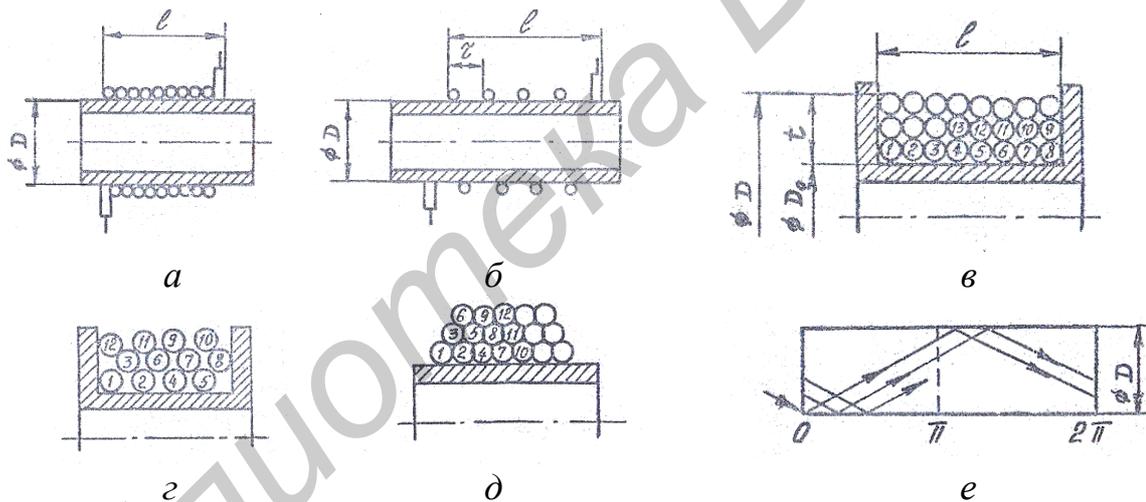


Рис. 4.3. Типы намоток катушек индуктивности:

а – однослойная сплошная; *б* – однослойная с шагом; *в* – многослойная рядовая; *г* – многослойная «внавал»; *д* – пирамидальная; *е* – универсальная с двумя переходами (перегибами провода) на виток (развертка)

Для изготовления катушек с индуктивностью выше 200...500 мкГн применяются многослойные обмотки – простая рядовая, «внавал», универсальные (обычная и перекрестная), пирамидальная (рис. 4.3, *в–е*).

В простой рядовой обмотке витки укладываются на каркас правильными рядами, а в обмотке «внавал» – без определенной закономерности, хаотично. Эти обмотки отличаются низкой добротностью и стабильностью, большой собственной емкостью и применяются в катушках для ДВ и дросселях. Для улуч-

шения их параметров используют секционирование, которое позволяет достичь добротности 160...170 и уменьшить собственную емкость.

Универсальные и пирамидальную обмотки относят к сложным обмоткам. В универсальной обмотке витки идут попеременно от одного края катушки к другому, пересекаясь под некоторым углом. Это придает катушке высокую механическую прочность без специальных каркасов, достаточно высокую добротность и незначительную собственную емкость. Универсальную намотку характеризуют числом перегибов провода за один виток (2 и более) и другими параметрами. Такие катушки обычно имеют внутренний диаметр 5...10 мм, длину 2...5 мм, добротность 80...100.

Для получения длинных катушек применяют так называемую универсальную перекрестную намотку, характерным параметром которой является число витков на один переход провода с одной стороны катушки на другую и обратно (один цикл). Катушки с такой намоткой отличаются пониженной добротностью и сравнительно большой собственной емкостью. Поэтому они находят применение в специальных катушках контуров, настраиваемых длинными цилиндрическими магнитными сердечниками.

Общим недостатком рассмотренных типов обмоток является низкая электрическая прочность, особенно у обмотки «внавал».

Пирамидальная обмотка обладает высокой электрической прочностью и малой собственной емкостью, так как соседние витки имеют небольшую разность потенциалов. Обычно пирамидальная обмотка содержит два слоя и применяется в ВЧ дросселях мощных радиопередатчиков.

Для наматывания обмоток катушек индуктивности применяют в основном медные провода круглого сечения с эмалевой изоляцией (ПЭ, ПЭЛ, ПЭВ, ПЭТВ, ПЭШО), а для катушек с шагом – также неизолированный провод МГМ, покрытый слоем серебра.

4.1.3. Расчет параметров катушек индуктивности

При расчете основных параметров КИ используются геометрические размеры их обмоток: диаметр D , длина l и толщина t (последнее только для многослойных обмоток) (рис. 4.3).

В однослойной катушке диаметр D представляет собой диаметр окружности, образуемой центром тяжести активного сечения провода. На высоких частотах диаметр D можно принять равным внутреннему диаметру витков.

Длина катушки l представляет собой расстояние между осевыми линиями крайних витков. Расстояние между осевыми линиями смежных витков называется шагом намотки τ . Величины l и τ связаны между собой простым соотношением

$$l = \tau(N - 1) = \rho \cdot d_0(N - 1). \quad (4.1)$$

где N – число витков.

При сплошной намотке расстояние между смежными витками определяется диаметром провода в изоляции d_0 и неплотностью прилегания витков друг к другу. Последнее может быть учтено коэффициентом неплотности ρ , который зависит в основном от диаметра провода (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Значения коэффициента неплотности ρ

Диаметр провода, мм	0,08 ... 0,11	0,15 ... 0,25	0,35 ... 0,41	0,51 ... 0,93	>1,0
Коэффициент ρ	1,3	1,25	1,2	1,1	1,05

Размеры многослойной катушки определяются наружным D и внутренним D_0 диаметрами и длиной намотки. Часто в расчетах используются толщина намотки $t = (D - D_0)/2$ и средний диаметр $D_{cp} = (D + D_0)/2 = D_0 + t$.

Расчет индуктивности. Из теоретической электротехники известно следующее выражение для расчета индуктивности длинного соленоида круглого сечения (без сердечника):

$$L = \frac{4\pi N^2 S}{l} 10^{-3}. \quad (4.2)$$

Здесь индуктивность L получается выраженной в микрогенри, если длину намотки l выразить в сантиметрах, а площадь сечения S – в квадратных сантиметрах.

В реальных катушках длина обычно соизмерима с диаметром, вследствие чего сильнее сказывается уменьшение магнитного сцепления крайних витков и фактическая индуктивность оказывается меньше расчетной. Точный учет этого явления приводит к громоздким и неудобным формулам.

На практике используют простые полуэмпирические формулы с поправочными коэффициентами, зависящими от относительных размеров катушки.

Для расчета индуктивности сплошной однослойной обмотки применяется следующая формула, обеспечивающая погрешность расчета не более 2 ... 3 %:

$$L = L_0 N^2 D \cdot 10^{-3}, \quad (4.3)$$

где L – индуктивность, мкГн; D – диаметр катушки (каркаса), см; L_0 – поправочный коэффициент, величина которого зависит от отношения l/D , а значения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициента L_0

l/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
L_0	20,2	15,8	13,4	11,6	10,4	9,4	8,6	7,9	7,3	6,8
l/D	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
L_0	6,8	4,0	2,9	2,2	1,8	1,53	1,33	1,17	1,05	0,95

При намотке с шагом происходит дополнительное уменьшение потокосцепления и индуктивности. Поэтому для более точного расчета индуктивности КИ, намотанной с шагом проводом круглого сечения, при числе витков не менее 4...5 следует использовать формулу:

$$L = L' - 2\pi ND(A + B) \cdot 10^{-3}, \quad (4.4)$$

где L – фактическая индуктивность, мкГн; L' – индуктивность, рассчитанная для сплошной обмотки по (4.3), мкГн; D – диаметр катушки, см; A и B – поправочные коэффициенты, зависящие соответственно от отношения диаметра провода без изоляции к шагу намотки d/τ и числа витков (рис. 4.4).

Формула (4.4) может использоваться и для расчета индуктивности многослойных катушек. В этом случае в формулу в качестве D подставляется средний диаметр D_{cp} , а для более точного расчета необходимо учитывать зависимость коэффициента L_0 не только от отношения l/D_{cp} , но и от отношения t/D_{cp} .

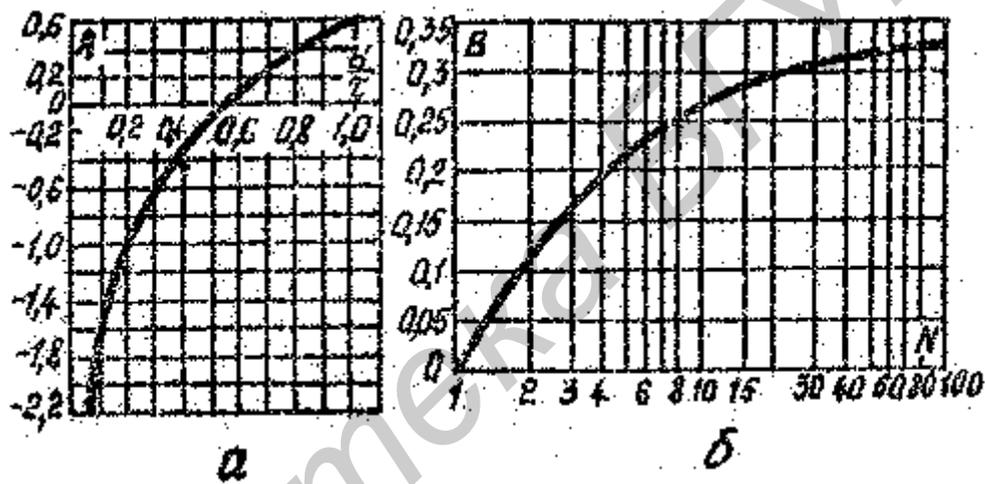


Рис. 4.4. Значения коэффициентов A и B для расчета индуктивности катушек, намотанных с шагом

Расчет числа витков. При проектировании КИ величина индуктивности, как правило, является исходной величиной. Может быть задан также один из размеров катушки, чаще всего – диаметр обмотки. Необходимо найти число витков и остальные размеры катушки, предварительно выбрав, если не заданы, конструкцию и тип намотки.

Формулу для расчета числа витков можно получить из уравнения (4.3), решив его относительно N :

$$N = \left(\frac{10^3 L}{L_0 D} \right)^{1/2}. \quad (4.5)$$

Вследствие того что коэффициент L_0 сложным образом зависит от размеров катушки, формула дает возможность определения требуемого числа витков, если известны все размеры катушки. Обычно хотя бы один из размеров являет-

ся неизвестным. Поэтому расчет числа витков должен производиться методом последовательного приближения.

Расчет собственной емкости. Величина собственной емкости C_0 зависит от размеров катушки, конструкции обмотки, диэлектрической проницаемости изоляции провода и каркаса, близости экрана или деталей корпуса прибора и ряда других факторов. Чем больше диаметр катушки, ближе друг к другу расположены витки, выше диэлектрическая проницаемость изоляции провода и материала каркаса, тем больше собственная емкость катушки индуктивности.

Для однослойной незэкранированной КИ расчет C_0 производится по выражению

$$C_0 = \frac{\pi D}{8.3 \lg[a + (a^2 - 1)^{1/2}]}, \quad (4.6)$$

где $a = \tau/d$, d – диаметр провода без изоляции.

Наименьшей собственной емкостью (1...2 пФ) обладают однослойные катушки, намотанные с шагом. Собственная емкость многослойных катушек зависит от способа и плотности намотки, толщины и диэлектрической проницаемости изоляции провода. Для простых многослойных обмоток собственную емкость приближенно можно определить по формуле

$$C_0 = \pi D_{\text{cp}} (8,45\varepsilon + 8,23) 10^{-2}, \quad (4.7)$$

где D_{cp} – средний диаметр обмотки, см; ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции провода.

Собственная емкость катушек с универсальной намоткой обычно составляет 5–10 пФ. Для значительного уменьшения собственной емкости многослойных катушек применяют секционирование.

4.1.4. Катушки индуктивности с магнитными сердечниками

Введение магнитного сердечника увеличивает индуктивность КИ. Это равносильно тому, что КИ при заданной индуктивности имеют меньшее число витков, малую длину провода, небольшие размеры. Дополнительным их преимуществом является возможность подстройки величины индуктивности в небольших пределах путем перемещения специального сердечника.

Магнитные сердечники КИ могут быть охарактеризованы следующими основными параметрами: относительной (действующей) магнитной проницаемостью, коэффициентом использования магнитных свойств материала, относительной добротностью, потерями, стабильностью, диапазоном рабочих частот. Определение этих параметров производится применительно к конкретной катушке, в которой используется сердечник.

Относительная (действующая) магнитная проницаемость представляет собой отношение индуктивности L_c КИ с сердечником к индуктивности L этой же катушки, но без сердечника:

$$\mu_r = L_c / L. \quad (4.8)$$

Ее величина зависит от начальной магнитной проницаемости материала, формы и размеров сердечника и катушки, частоты. Чем больше проницаемость магнитного материала, чем ближе к виткам расположен сердечник, и чем ниже частота, тем выше будет его действующая магнитная проницаемость.

Коэффициент использования магнитных свойств материала есть отношение действующей магнитной проницаемости сердечника к начальной магнитной проницаемости материала:

$$k_{\mu} = \mu_r / \mu_n . \quad (4.9)$$

Относительная добротность Q_r – это отношение добротности КИ с сердечником Q_c к добротности этой же катушки Q , но без сердечника:

$$Q_r = Q_c / Q . \quad (4.10)$$

Q_r характеризует потери, вносимые сердечником, и сильно зависит от свойств материала и частоты. С увеличением частоты потери возрастают, проницаемость падает, что приводит к уменьшению добротности. Потери, вносимые сердечником в катушку, состоят из потерь на гистерезис, частотных и диэлектрических потерь. Приближенно можно считать, что добротность КИ с сердечником в $Q_r^{1/2}$ раз больше добротности катушки с той же индуктивностью, но без сердечника (на частотах, где потери, вносимые сердечником, малы).

Стабильность катушек с сердечниками хуже, чем катушек без сердечников, из-за изменения его магнитных свойств.

Типы магнитных сердечников. В катушках индуктивности находят применение сердечники различной формы: цилиндрические, броневые, кольцевые (тороидальные) Ш, Н, О-образные и некоторые другие. Наиболее употребительные формы сердечников представлены на рис. 4.5.

Цилиндрические сердечники являются наиболее простыми по конструкции, но характеризуются малым коэффициентом использования магнитных свойств. Они чаще всего применяются для точной подстройки катушек контуров. Диапазон перестройки составляет 10...15 %.

Броневые сердечники позволяют получать малогабаритные КИ с высокой добротностью и удовлетворительной стабильностью. Они отличаются высоким коэффициентом использования магнитных свойств и слабым полем рассеяния, что облегчает экранирование. Для уменьшения потерь и повышения стабильности в броневые сердечники может вводиться зазор. При этом однако уменьшается коэффициент использования магнитных свойств.

Кольцевые (тороидальные) сердечники дают наиболее полное использование магнитных свойств. Поэтому их применяют, когда необходимо получить наибольшую индуктивность при минимальных размерах. Тороидальные сердечники позволяют получать высокодобротные катушки с $Q = 400...500$. Их основные недостатки – сложность намотки и невозможность подстройки.

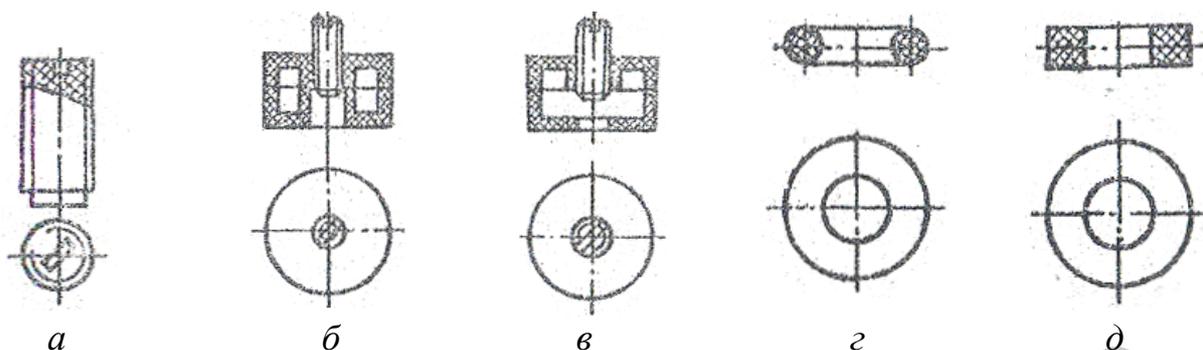


Рис. 4.5. Магнитные сердечники катушек индуктивности:
a – цилиндрический с резьбой; *б* – броневой с замкнутой магнитной цепью;
в – броневой с разомкнутой магнитной цепью; *г*, *д* – кольцевые

Магнитные сердечники для катушек индуктивности изготавливают из магнитодиэлектриков и ферритов.

Магнитодиэлектрики представляют собой смесь частиц ферромагнитного вещества и диэлектрика. В качестве ферромагнетика используется альсифер или карбонильное железо, а в качестве диэлектрика – бакелит, аминопласт и др. Сердечники получают прессованием (холодным, горячим) или литьем под давлением.

Общим достоинством магнитодиэлектриков являются достаточно высокая температурная и временная стабильность, негигроскопичность, постоянство магнитной проницаемости в широком диапазоне частот, малые потери. Их недостатком является невысокая магнитная проницаемость (10...25).

Ферриты представляют собой твердые растворы окислов металлов второй группы (Ni, Mn, Li, Cu, Pb), цинка (Zn) и кадмия (Cd) с окисью железа (Fe_2O_3). Изготовление сердечников осуществляется прессованием или литьем под давлением с последующим спеканием и механообработкой.

Основным достоинством ферритов является высокая магнитная проницаемость. Недостатками являются низкая температурная стабильность, старение, достаточно сильная зависимость магнитной проницаемости от частоты, повышенная нелинейность, гигроскопичность.

В высокочастотных катушках индуктивности применяются магнитомягкие ферриты для слабых полей – никель-цинковые (НЦ), марганец-цинковые (МЦ), литий-цинковые (ЛЦ) и др.

4.1.5. Экранированные катушки индуктивности

Экранирование КИ используется для устранения влияния электромагнитного поля катушки на другие элементы и влияния внешних полей на катушку. Экранирование заключается в помещении катушки в заземленный металлический экран. Эффективность экранирования характеризуется отношением напряженности внешнего поля катушки при наличии экрана к напряженности по-

ля при отсутствии экрана, называемое коэффициентом экранирования. Для экранов среднего качества это отношение составляет 0,01...0,05.

Наличие экрана приводит к изменению основных свойств катушек КИ: уменьшается индуктивность, увеличивается сопротивление и собственная емкость, уменьшается добротность. Степень изменения параметров зависит от соотношения размеров катушки и экрана.

Индуктивность экранированной катушки определяется формулой

$$L_s = L(1 - k^2), \quad (4.11)$$

где L – индуктивность неэкранированной катушки; k – коэффициент связи между катушкой и экраном.

Для однослойных и тонких многослойных КИ коэффициент связи может быть определен по формуле

$$k^2 = \lambda \left(\frac{D}{D_s} \right), \quad (4.12)$$

где D – диаметр катушки; D_s – диаметр экрана; λ – коэффициент, зависящий от отношения L/D катушки.

Рекомендуется отношение диаметра экрана к диаметру катушки выбирать в диапазоне:

- для обычных катушек – $D_s/D = 1,6...2,5$;
- для стабильных катушек – $D_s/D > 2,5$.

Стабильность экранированных КИ меньше, чем неэкранированных, так как под влиянием дестабилизирующих факторов изменяются геометрические размеры и сопротивление экрана, что влияет на параметры катушки.

Экраны выполняют в виде круглых или прямоугольных стаканов из алюминия, меди или латуни. Наименьшие потери вносят медные экраны, но алюминиевые дешевле и поэтому находят большее применение.

4.1.6. Катушки индуктивности для поверхностного монтажа

Для поверхностного монтажа применяются два вида конструктивного исполнения КИ: проволочные и тонкопленочные многослойные. КИ первого вида имеют большую индуктивность, более дешевые и получили более широкое применение. КИ второго вида отличаются большей помехустойчивостью, меньшими размерами и используются в основном в СВЧ технике, где размеры имеют существенное влияние на характеристики устройств.

КИ для поверхностного монтажа выпускаются в чип-корпусах. Конструкция и внешний вид проволочных чип-катушек индуктивности приведены на рис. 4.6, а характеристики некоторых моделей – в табл. 4.5. Температурный коэффициент индуктивности таких КИ составляет 0,0006, допустимый диапазон рабочих температур – 30...80 °С, ряд номинальных значений – E12. Конструкция чип-катушек индуктивности обеспечивает двухразовую пайку в течение

не более 3 с при температуре 260 ± 5 °С без теплоотвода и предварительного обслуживания.

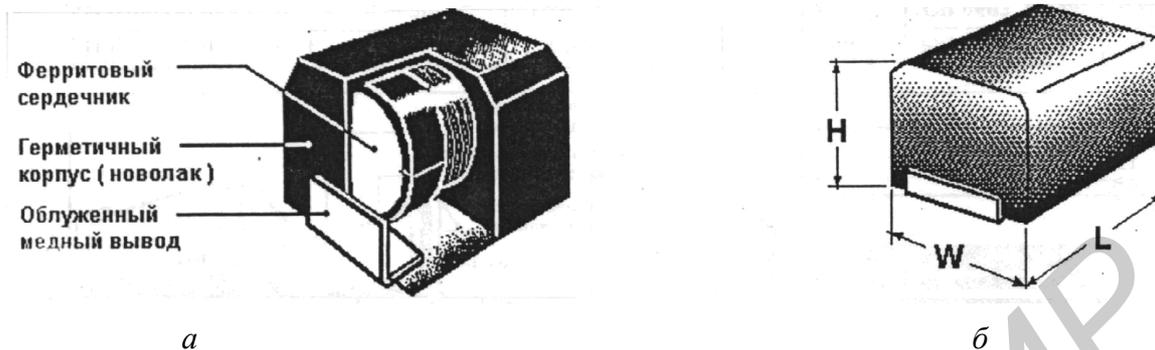


Рис. 4.6 – Чип-катушки индуктивности:
а – конструкция; б – внешний вид

Таблица 4.5

Характеристики чип-катушек индуктивности

Модель / Параметры	Диапазон номиналов	Ток, мА	Резонансная частота, МГц	L	W	H
СМ 453232 (1812)	0,1 мкГн...1000 мкГн	30...800	2,5...300	4,5	3,2	3,2
СМ 322525 (1210)	47 нГн...220 мкГн	45...450	7...680	3,2	2,5	2,5

4.2. Лабораторное оборудование и образцы

В работе используется измеритель добротности (Q -метр) и набор образцов исследуемых катушек индуктивности.

Порядок работы с Q -метром и методика измерений даны в дополнительной инструкции к лабораторному макету.

Параметры (размеры) исследуемых образцов приводятся в справочных таблицах, прилагаемых к лабораторному макету.

4.3. Порядок выполнения работы

1. Рассчитать индуктивность L образцов КИ, не имеющих сердечника и экрана, используя описанные методики и справочные материалы на образцы.

2. В соответствии с прилагаемой инструкцией с помощью Q -метра определить значения индуктивности, собственной емкости, сопротивления потерь и добротности исследуемых образцов КИ в указанном диапазоне частот (5...6 точек на диапазон). Построить частотные зависимости индуктивности, добротности и сопротивления потерь. Используя рассчитанные в предыдущем пункте значения параметров, определить относительную погрешность расчета индуктивности и собственной емкости.

3. Определить относительную магнитную проницаемость μ_r и относительную добротность Q_r сердечника для конструктивно одинаковых КИ, отличающихся только наличием сердечника, а также построить их зависимость от частоты.

4. Исследовать влияние экрана на индуктивность, собственную емкость и добротность катушки, сопоставив параметры идентичных катушек без экрана и с экраном. Рассчитать коэффициент связи экрана с катушкой.

4.4. Содержание отчета

1. Функциональные схемы лабораторных исследований. Конструктивные и электрические параметры исследуемых образцов КИ.
2. Результаты аналитических расчетов параметров исследуемых КИ.
3. Результаты экспериментальных исследований характеристик КИ.
4. Графические зависимости.
5. Выводы с анализом результатов.

4.5. Контрольные вопросы

1. Параметры катушек индуктивности.
2. Каркасы и обмотки катушек индуктивности.
3. Расчет индуктивности катушек с однослойной обмоткой.
4. Расчет индуктивности катушек с многослойной обмоткой.
5. Расчет числа витков катушек индуктивности.
6. Сердечники КИ: типы, материалы, технология изготовления.
7. Влияние сердечника на параметры катушек индуктивности.
8. Влияние экрана на параметры катушек индуктивности.
9. Особенности конструирования высокочастотных катушек.
10. Особенности конструирования высокостабильных катушек.
11. Зависимость параметров катушек от частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): учебник для вузов. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2007.
2. Келим, Ю. М. Типовые элементы систем автоматического управления: учеб. пособие для студ. учреждений средн. проф. образования / Ю. М. Келим. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2002.
3. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения / Г. Г. Ишанин. – СПб. : Папирус, 2003.
4. Рычина, Т. А. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы : учеб. для вузов / Т. А. Рычина, А. В. Зеленский. – М. : Радио и связь, 1989.
5. Немцов, М. В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М. : Энергия, 1989.
6. Речицкий, В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты / В. И. Речицкий – М. : Сов. радио, 1980.
7. Достанко А. П. Технология интегральных схем / А. П. Достанко. – Минск : Выш. шк., 1982,
8. Носов, Ю. Р. Оптроны и их применение / Ю. Р. Носов, А. С. Сидоров. – М. : Радио и связь, 1981.
9. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов / Г. Г. Ишанин. – Л.: Машиностроение, 1986.
10. Геда, Н. Ф. Измерение параметров приборов оптоэлектроники. / Н. Ф. Геда – М. : Радио и связь, 1981.
11. Кайдалов, С. А. Приемники излучения и их применение / С. А. Кайдалов. – М. : Радио и связь, 1995.
12. Слаботочные реле / Г. Я. Рыбин [и др.]. – М. : Радио и связь, 1982, 80с.
13. Лярский, В. Д. Электрические соединители: справочник / В. Д. Лярский, О. Б. Мурадян. – М. : Радио и связь, 1988.

Учебное издание

Дик Сергей Константинович
Гурский Леонид Ильич
Давыдов Максим Викторович и др.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Лабораторный практикум
для студентов специальностей
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС», «Проектирование и
производство РЭС», «Медицинская электроника», «Техническое обеспечение
безопасности», «Инженерно-психологическое обеспечение информационных
технологий» дневной формы обучения

Редактор Л. А. Шичко
Корректор Е. Н. Батурчик
Компьютерная верстка М. В. Гуртатовская

Подписано в печать 24.05.2010.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 3,49.
Уч.-изд. л. 3,0.	Тираж 120 экз.	Заказ 215.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6