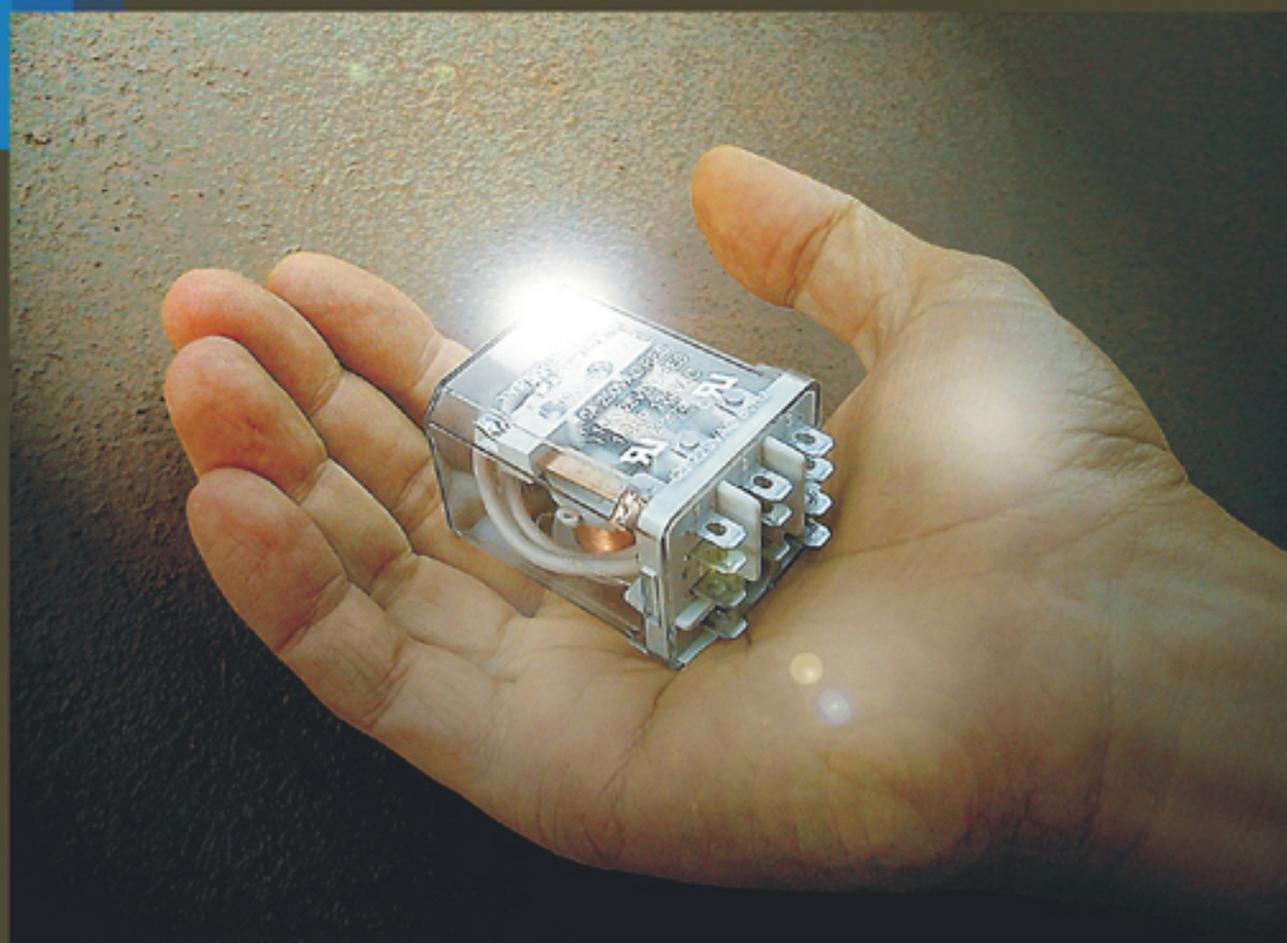


# МОЩНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ



СПРАВОЧНИК ИНЖЕНЕРА

Эту книгу можно считать своеобразным учебником по технологии и схемотехнике электромагнитных реле.

Издание предназначено для инженеров и конструкторов, желающих познакомиться с основами работы и применения мощных электромагнитных реле. Материал не обременен теоретическим балластом, но все, кто интересуется реле, получают из этой книги багаж знаний, вполне достаточных для выбора реле и проектирования оборудования.

При подборке и обработке материалов особое внимание уделялось практическим аспектам применения реле в промышленной электротехнике. Численные примеры, расчеты и графики иллюстрируют особенности работы реле при коммутации мощных нагрузок.

Как и у большинства технических изданий, у этой книги множество авторов из нескольких стран мира. Редакция постаралась собрать «под одну обложку» всю доступную и полезную информацию, которую можно было найти в справочниках, монографиях, технических отчетах и интернет-публикациях.

---

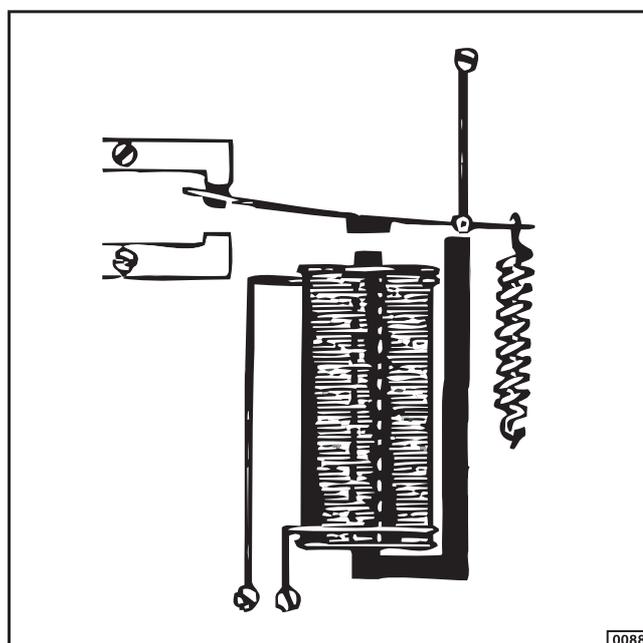
## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Введение</b>	<b>4</b>
Зачем написана эта книга	
<b>Функциональные узлы электромагнитного реле</b>	<b>9</b>
Основные элементы конструкции	
<b>Контактная система</b>	<b>18</b>
Мощные контакты в теории и на практике	
<b>Магнитная система реле</b>	<b>96</b>
Катушка и якорь - сердце и движущая сила реле	
<b>Хранение и установка реле в оборудование</b>	<b>142</b>
Правильное хранение и правильное применение реле	
<b>Производство надежных реле</b>	<b>146</b>
Аспекты производства высококачественных реле	
<b>Список использованной литературы</b>	<b>152</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное реле - хорошо известное и широко применяемое на практике электротехническое изделие. Область применения электромагнитных реле простирается от отметивших свой 150-летний юбилей схем релейной автоматики до новейшего телекоммуникационного оборудования и интерфейсов между контроллерами и промышленными системами управления, где требуются надежные и мощные схемы для управления исполнительными устройствами, гарантирующие высоковольтную гальваническую развязку между объектом управления и управляющей системой. Можно без преувеличения сказать, что вся современная электротехника и промышленная автоматика выросла из дискретных устройств на базе электромагнитного реле.

Первое электромагнитное реле было придумано и практически реализовано в 30-х годах XIX века, когда потребовалась передача депеш на большие расстояния. С.Морзе пришла в голову идея создания телеграфного аппарата с регистратором принятой информации на основе электромагнита. Инженерам понравилось свойство реле при слабом токе управления коммутировать мощные цепи, после чего в телеграфе реле превратилось в импульсный усилитель слабых сигналов. (Рис.1) Промежуточные усилители в линии связи позволили уже в 60-х годах XIX века передавать телеграфные сообщения на расстояния до нескольких тысяч километ-

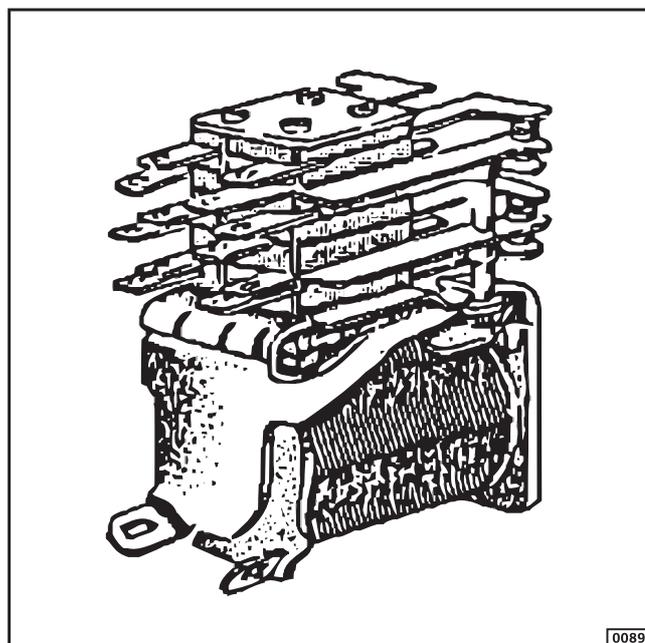


Самое старое изображение реле, которое удалось найти: рисунок датируется 1895 годом!  
Рисунок 1

ров. Само название «реле» было заимствовано из французского языка, где этим термином обозначалась смена лошадей при переездах на большие расстояния. Таким вот образом в истории техники работа электромагнитного реле началась в области телекоммуникаций.

При появлении электростанций и электрического освещения возникла потребность в распределении электроэнергии и управлении электрическими сетями, а с развитием промышленности появились и первые системы управления, где реле немедленно нашло свое место. Развитие дискретной математики и электротехники привело к разработке в 90-е годы XIX века управляющих автоматов, сначала простых, но потом все более и более сложных, нашедших применение в телефонных станциях и автоматической электросвязи. Изобретение радио и электронных ламп не помешали совершенствованию электромагнитного реле, которое постепенно становится все более миниатюрным, экономичным и надежным. Конструкторы разрабатывают реле времени, поляризованные реле и многопозиционные реле для программного управления процессами. Реле и мощные электромагнитные пускатели позволяют коммутировать электрические подстанции распределения энергии, удаленные на расстояние до сотен километров от диспетчерских пультов, создавая предпосылку появления в 30-х годах XX века телемеханики и систем дистанционного управления.

Реле везде находит свое место, промышленность всех развитых стран мира осваивает и наращивает выпуск реле сотен видов и типов для нужд науки и техники (Рис.2). В справочниках подробно описываются тончайшие аспекты настройки и регулировки реле, ветераны релейной техники учат начинающих техников искать причины отказов в автоматике, появляются специальные инструменты для чистки контактов и особые смазки («Вечный контакт» - вот смазка, дающая вашему реле вторую жизнь» - американская реклама специальной густой смазки для контактов, 1940 год).



Реле из учебника электротехники  
выпуска 1935 года:  
вполне современная конструкция  
Рисунок 2

Электронные лампы, способные работать в качестве мощных коммутирующих устройств (триоды, тиратроны с холодным катодом, водородные тиратроны) начинают вытеснять реле из устройств автоматики в 40-х годах XX века, а с середины 50-х годов начинается эпоха транзисторов, плавно перешедшая в конце 60-х в эру микросхем. Объем производства реле, однако, при этом не только не падает, но и постоянно растет, и электромагнитное реле продолжает применяться как в качестве коммутатора и силового ключа для управления нагрузками, так и для построения логических схем. Только в 80-е годы реле окончательно покидает коммутационные поля автоматических телефонных станций, работая в электронных АТС и сегодня в качестве входного коммутатора абонентских линий.

Силовые реле на протяжении XX века многократно меняют свою конструкцию, но в итоге техническая революция приводит к появлению промышленных стандартов для реле. Расширение международной торговли и понижение температуры холодной войны принуждают промышленников выпускать «стандартные» реле, и подобно тому, как стандартизация привела к унификации цоколей и баллонов электронных ламп, промышленные стандарты приводят к возможности применения в оборудовании реле, выпущенных в различных странах.

XX век закончился и наступление третьего тысячелетия отмечается невиданным спросом на реле в промышленности, требующей все больше и больше электромагнитных реле как для потребительских товаров (стиральные машины, кухонная техника, телефоны), так и для развития средств производства (контроллеры и автоматизация промышленных процессов) и средств связи (телефонные станции, связное оборудование).

Несмотря на то, что электромагнитное реле представляет собой относительно простое устройство, технология производства реле сложна, а правильное применение реле (обеспечивающее желаемые технические характеристики и надежность) требует специальных знаний. Сложности и трудности при конструировании и применении реле обусловлены тем, что электромагнитное реле представляет собой *электромеханическое устройство*, сочетающее в себе как механические детали, так и электрические узлы, каждый из которых требует тщательного расчета, подбора материалов и технологии производства. При проектировании и эксплуатации реле необходимо одновременно учитывать механические нагрузки и электрические эффекты при наличии всевозможных химических процессов, ярко проявляющихся при старении и нагреве пластиков и металлов.

Современная промышленность и современное оборудование ежегодно повышают требования к электромагнитным реле в области уменьшения габаритов, повышения надежности и снижения стоимости. Удовлетворить всем этим требованиям одновременно можно лишь при совершенствовании соответствующих технологий. В этой книге мы не будем затрагивать вопросы производства реле, это совсем особая тема для разговора, да и кроме того, технология изготовления хороших реле поддерживается фирмами-производителями в секрете.

Правильное понимание проблем, возникающих при работе электромагнитных реле, и правильный выбор реле для конкретного применения - вот задача, стоящая перед инженером-разработчиком или конструктором. Целью книги является желание познакомить читателя с основами технологии и применения реле и дать при этом заинтересованному читателю необходимые практические знания для разработки надежных и современных устройств и систем, содержащих электромагнитные реле.

Сознавая, что не у всякого инженера есть время (и желание) для овладения этими знаниями по всем правилам *академической и прикладной науки*, авторы постарались обойтись без сложного математического аппарата. Основное внимание было сосредоточено на практических знаниях, полученных разработчиками и эксплуатационниками за десятки лет, и приведении этих практических знаний в форму, удобную и приятную для восприятия. Также понимая, что профессионалы с опытом работы не склонны доверять *чистой теории*, всюду по тексту будут указываться данные, полученные путем практических испытаний и наработанного с годами опыта эксплуатации электромагнитных реле.

В эту книгу собраны многие полезные сведения, разбросанные во всемирной технической литературе. При подборе материалов ставилась задача не пропустить нужной и воспрепятствовать проникновению непроверенной информации, для чего редакторы постоянно прибегали к помощи конструкторов реле и опытных инженеров-разработчиков. Все приводимые численные данные подтверждаются как минимум двумя независимыми источниками, а все рекомендации проверены на практике.

Вместе с этим эта книга представляет собой всего лишь разумное дополнение к техническим описаниям или каталогам. Каталоги обычно не содержат советов и обобщений: дается конкретное изделие с конкретными параметрами, а литература побуждает читателей к размышлениям и выводам.

Мы надеемся, что знания, полученные из этой книги, позволят специалистам с легкостью читать и понимать каталоги заводов-производителей и правильно оценивать приводимые там данные на предмет пригодности конкретного реле для своей разработки.

Если эта книга даст необходимую информацию начинающим инженерам и освежит в памяти знания опытных разработчиков - значит, мы работали не зря.

# ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ РЕЛЕ

## Реле и релейная технология: немного истории

Электромагнитное реле было изобретено более полутора веков назад. После этого на протяжении примерно ста лет конструкция реле менялась в целом столь незначительно, что реле середины XIX века почти не отличались по виду от реле выпуска 1920 года. Революция в конструкции реле свершилась только после появления пластмасс и в особенности термопластов, а произошло это в 40-е годы XX века после синтеза полиамидов и фторопластов.

Кроме химии полимеров развивалось металловедение, успехи которого привели к созданию качественно новых материалов для контактов реле - в итоге размер контактов уменьшился, а коммутируемые мощности возросли во много раз. Усовершенствование механической части реле в совокупности с новыми материалами контактов дали возможность в десятки раз уменьшить объем катушек и одновременно повысить чувствительность.

Поиск новых платежеспособных сфер торговли привел к созданию в конце 50-х необъятного рынка бытовой электротехники, где тотчас потребовались сотни миллионов хороших и дешевых реле в год.

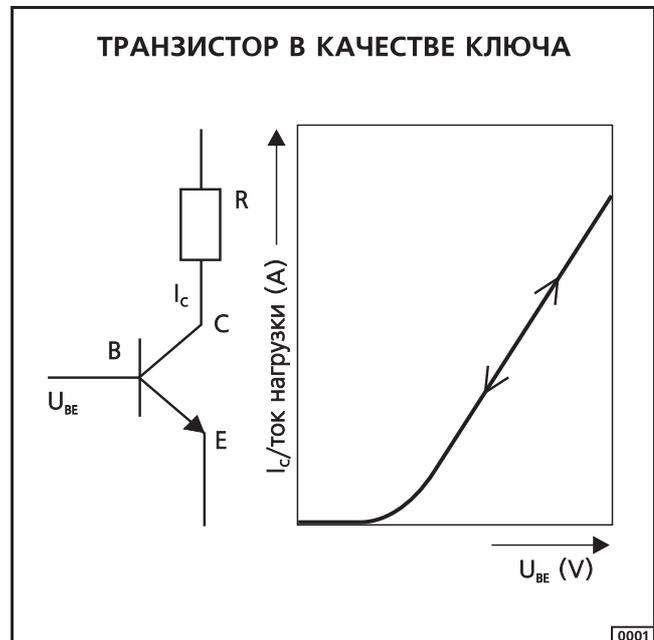
С тех пор прошло не так и много времени. Именно в начале 60-х определился круг задач реле, требовавшихся для создания лабораторного оборудования, систем связи, компьютерных интерфейсов, домашних электроприборов, систем кондиционирования воздуха, автомобильной электроники, управления дорожным движением, инженерных сетей больших промышленных и жилых зданий, электростанций, офисного оборудования, станков с программным управлением, авиации и индустрии игрушек и развлечений, военной и космической техники.

## Функции, выполняемые реле

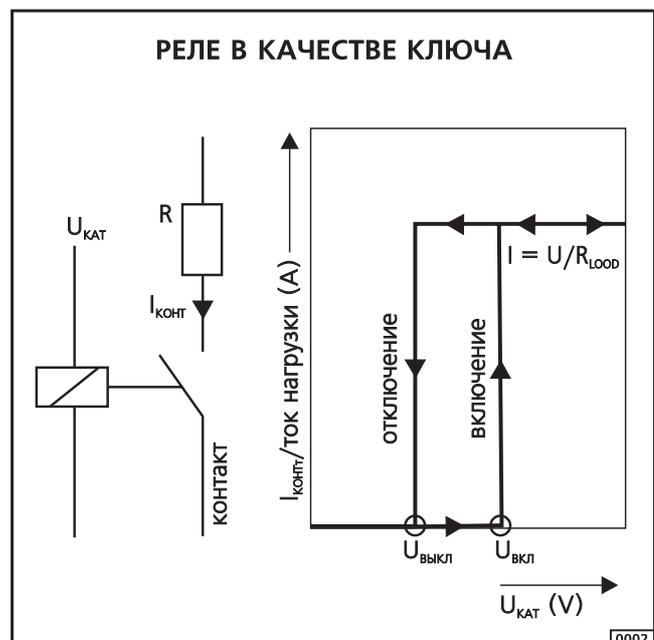
Электромагнитное реле является электрическим ключом, управляемым с помощью электромагнита. При протекании электрического тока через катушку реле переключаются один или несколько изолированных от катушки электрических контактов, коммутируя нагрузку реле. Электромагнитное реле можно поэтому считать универсальным коммутатором аналоговых и импульсных сигналов.

**Электромагнитное реле выполняет следующие функции:**

- гальваническая развязка между цепью управления реле и цепью нагрузки реле;
- размножение одного управляющего сигнала на несколько выходных сигналов;
- усиление мощности управляющего сигнала;
- независимое управление несколькими выходными цепями с различными уровнями тока и напряжения (различными мощностями);
- разделение цепей с различными уровнями рабочих токов и напряжений, а также цепей переменного и постоянного тока;



Вольт-амперная характеристика транзистора: любой транзистор - это хороший дискретный ключ  
Рисунок 3



Гистерезис и резкая переходная характеристика характерны для любого электромагнитного реле  
Рисунок 4

- преобразование и нормирование уровней электрических сигналов.

Главной темой нашей работы является мощное электромагнитное реле, обладающее важной для промышленной электротехники способностью коммутации мощных электрических цепей при помощи маломощного сигнала управления.

Реле является дискретным ключом с двумя устойчивыми положениями, обозначаемыми как «включено-выключено». Мощный транзистор тоже способен выполнять роль дискретного ключа, но реле в отличие от мощного транзистора не способно выполнять роль аналогового усилителя мощности. Переходные характеристики транзистора и реле показаны на рис. 3 и 4, из которых можно видеть, что:

- транзистор может усиливать как импульсный (двухуровневый), так и аналоговый сигнал, а реле - только импульсный, и
- реле обладает гистерезисом передаточной характеристики, а именно - у реле напряжение включения и напряжение выключения различаются на величину гистерезиса, что необходимо учитывать при расчете и разработке практических схем.

Коэффициент передачи реле  $K_p$  («усиление») рассчитывается как отношение мощности катушки реле к мощности, коммутируемой контактами реле. Например, для типичного мощного миниатюрного реле с катушкой мощностью 0,6 Вт и контактной группой 16А/220 ВАС коэффициент усиления составляет:

$$K_p = (16 * 220) / 0,6 = 5800$$

Это очень большая величина, если учесть, что такое миниатюрное реле помещается в корпусе объемом 6 кубических сантиметра.

## **Классификация электромагнитных реле**

Все электромагнитные реле имеют общие детали конструкции, а именно: магнитную систему и систему электрических контактов. Конструкция конкретных типов реле существенно отличается друг от друга, но принцип действия остается общим:

- преобразование входного электрического сигнала в промежуточный сигнал;

- управление с помощью промежуточного сигнала контактной группой;
- наличие в контактной группе пружинного механизма самовозврата контактов в исходное состояние после отключения катушки реле от источника сигнала.

На рис.5. показан общий принцип работы электромагнитного реле.

В настоящее время получили распространение следующие типы реле:

- **Электромеханические (электромагнитные) реле**, в которых электрическими контактами управляет электромагнит с толкателем;
- **Герконовые реле**, в которых магнитное поле катушки управления непосредственно управляет контактами, выполненными из ферромагнитного сплава;
- **Соленоидные реле**, в которых вся механическая конструкция выполнена в виде соленоида с подвижным сердечником - это, как правило, очень мощные реле или контакторы;
- **Реле с вращающимся ротором**, напоминающие по конструкции шаговые электродвигатели (эти реле используются там, где требуется работа при исключительно сильных вибрациях).

Практический интерес для инженеров представляют в основном электромеханические и герконовые реле, остальные достаточно экзотичны. Мощные соленоидные реле принадлежат в основном к классу контакторов, то есть особо мощных реле с мостовым контактом, разрывающим цепь управления одновременно в двух точках. Герконовые реле применяют для коммутации очень слабых сигналов, например, в измерительной технике, но и там они активно вытесняются электромагнитными реле.



Принцип действия реле: цепь управления - среда передачи - цепь нагрузки

Рисунок 5

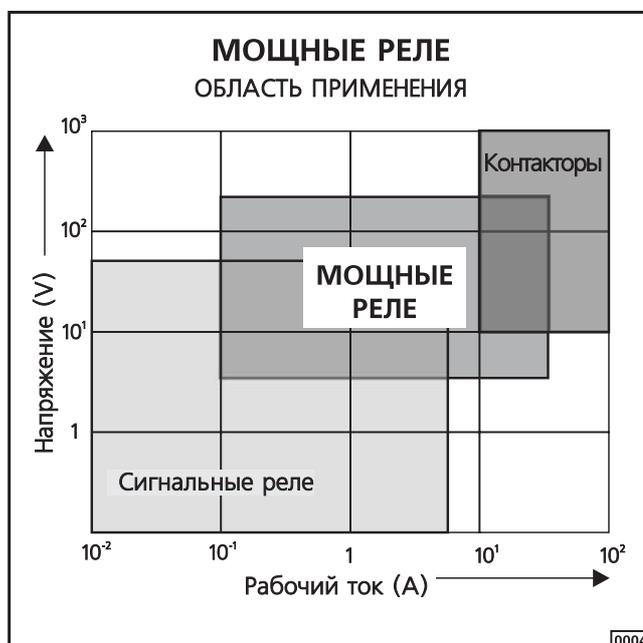
К самым экзотическим, но все еще применяющимся в современной технике реле можно отнести такие устройства, как:

- **тепловые реле**, в которых элементом задержки включения или выключения является биметаллическая пластина;
- **шаговые реле**, где якорь электромагнита толкает шестерню с храповиком, позволяя создавать переключатель на несколько положений;
- **резонансные реле**, где встроенный в реле «камертон» включает контакты вать при подаче на катушку сигнала переменного тока определенной частоты (такие реле были основой телемеханики в 30-х и 40-х годах).

## Иерархия электромагнитных реле по мощности контактов

На рис. 6 представлены области мощностей, коммутируемых контактами электромагнитных реле. Для удобства терминологии все реле в зависимости от способности коммутировать определенные мощности отнесены к трем категориям: сигнальные реле, мощные реле и контакторы. Для унификации можно считать, что сигнальные реле коммутируют активные нагрузки при рабочих токах до 1...2 А. Основной областью применения сигнальных реле является аппарата-ра связи и телекоммуникаций, измерительная техника и маломощная интерфейсная схемотехника.

Мощные реле способны коммутировать мощные активные нагрузки (до 15...25 А при 250...380 VAC) и индуктивные нагрузки небольшой мощности, обычно до 200...500 VA.



Контакты мощных реле оптимизированы для коммутации токов в диапазоне от 0,1 до 30 А  
Рисунок 6

Контакторам отводится роль коммутаторов мощных индуктивных нагрузок с мощностью от сотен ватт до мегаватт, основным назначением контакторов является управление электродвигателями.

По устоявшейся международной классификации нагрузка мощных реле ограничена током 30 А. Здесь следует дистанцироваться от автомобильных реле, контакты которых предназначены для работы только с низковольтными цепями 12 VDC (разрушительное воздействие электрической дуги при таких напряжениях почти не проявляется), что дает возможность производить миниатюрные автомобильные реле с контактами на ток до 50 А.

Реле для установки на печатных платах рассчитаны на ток максимум 16 А, но так называемые промышленные реле выпускаются на токи контактов до 25...30 А. Такие мощные реле по конструкции остаются еще в классе электромагнитных реле (пружинный контакт с коммутацией в одной точке), но по габаритам и цене приближаются к маломощным контакторам.

Как миниатюрные реле для печатных плат, так и мощные промышленные реле снабжаются панельками для монтажа на рейках DIN в электротехнических шкафах, где традиционным способом соединения является винтовой контакт. Если реле должно устанавливаться на печатную плату, но ресурс реле меньше, чем планируемый ресурс работы всего электронного узла, то в распоряжении конструкторов имеются панельки для установки на печатную плату. Такие панельки позволяют заменять реле в оборудовании без смены всей электроники, что намного экономичнее.

Независимо от конкретной конструкции и технологии производства все типовые свойства мощных реле можно рассматривать, применяя общие математические и технические модели.

## Конструкция реле

Конструкции мощных миниатюрных и стандартных промышленных реле существенно различаются, но имеется ряд обязательных общих элементов, а именно:

- **корпус реле** (хотя встречаются реле вообще без корпуса, так называемого открытого типа);

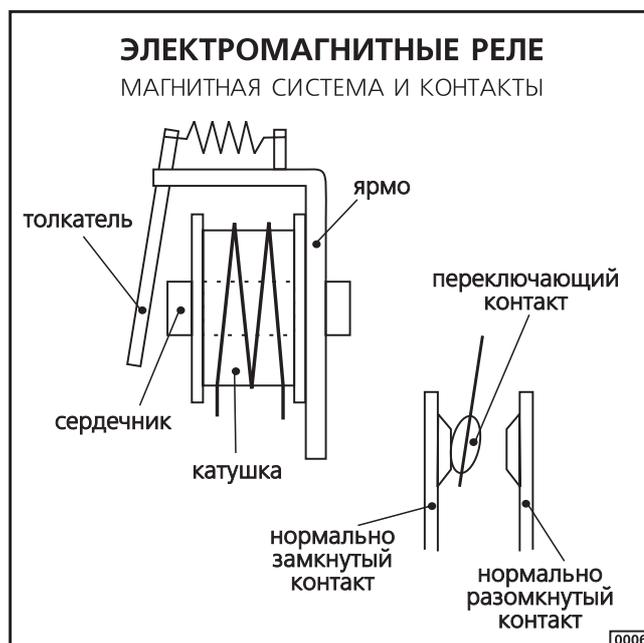
- **катушка реле**, представляющая собой сердечник и обмотку на этом сердечнике;
- **толкатель**, управляющий контактными группами;
- **контактные группы**, состоящие из неподвижных и подвижных контактов;
- **выводы реле**, то есть выводы катушки и контактных групп.

В современных реле все изолирующие элементы выполнены из пластмасс, где господствуют термопласты, хотя часто встречаются и фенопласты.

На рис. 7. упрощенно показана конструкция реле в виде катушки с толкателем. Конструкция столь проста, что работа реле почти не требует пояснений:

- обмотка реле размещается на сердечнике и к обмотке подключают источник управляющего напряжения или тока;
- при протекании по обмотке тока достаточной величины толкатель притягивается к сердечнику электромагнита;
- толкатель механически воздействует на контакты и растягивает пружину, выполняющую роль возвратного механизма (если контакты реле сделаны из пружинящего материала, то возвратной пружиной служат сами контакты);
- контакты подразделяются на неподвижные и подвижные, образуя нормально замкнутые (NC) или нормально разомкнутые (NO) группы контактов;
- при воздействии на контактные группы производится размыкание NC контактов и замыкание NO контактов.

Магнитная система и контактные группы реле размещаются в корпусе, защищающем катушку и контакты от внешних механических воздействий и загрязнений. Корпус реле состоит из:



Очень упрощенная конструкция реле: принцип работы понятен без объяснений  
Рисунок 7

- основания, на котором собрана магнитная система и контактные группы, через основание выведены наружу контакты для присоединения реле к внешним устройствам,
- крышки и герметичной прокладки (герметичной заливки).

Итак, электромагнитное реле состоит из нескольких функциональных узлов, показанных на рис. 9, а на фотографии рис. 8 можно рассмотреть все узлы внутри современного миниатюрного реле.

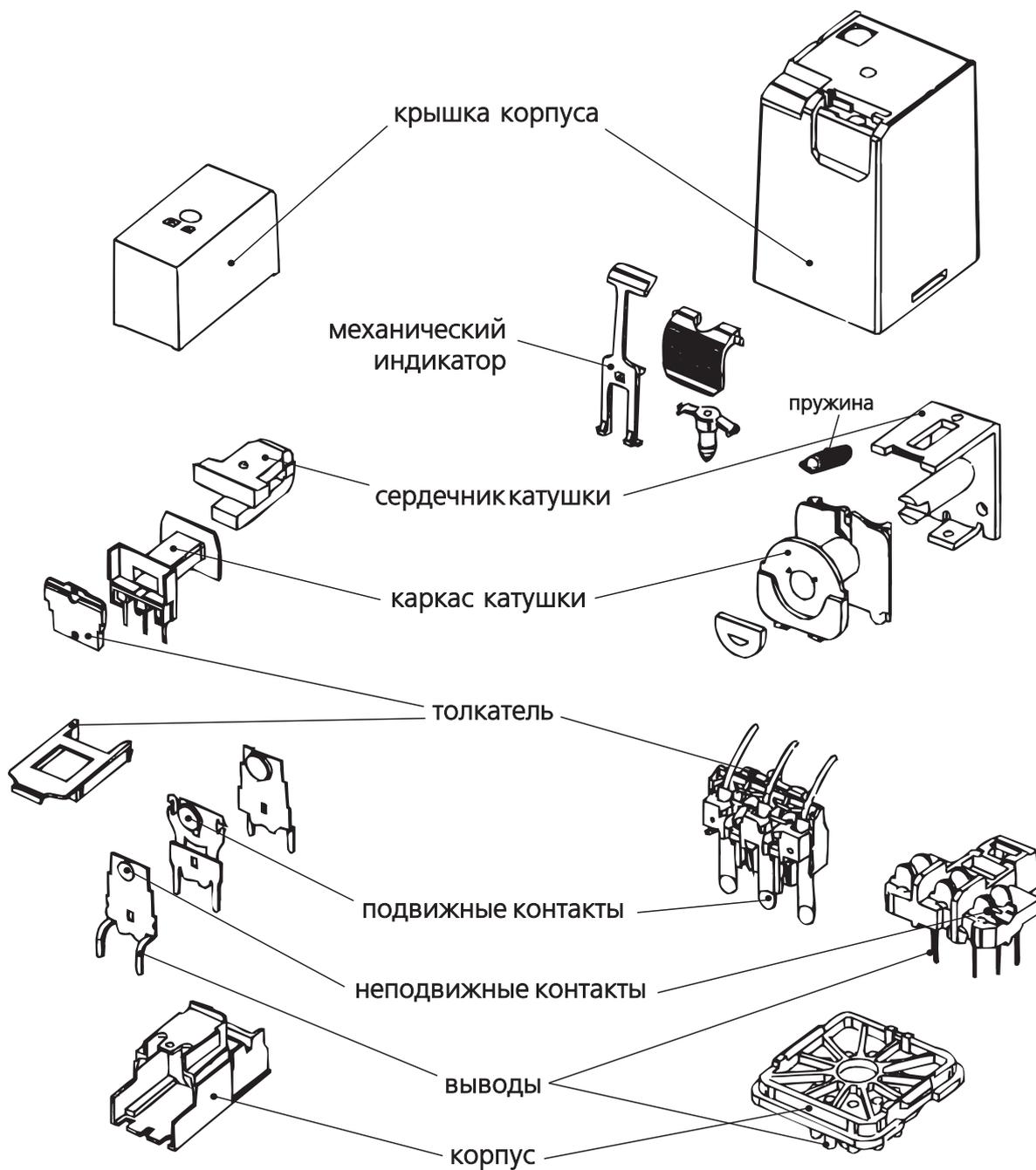
Прозрачный корпус реле позволяет увидеть катушку, толкатель и контактную группу, смонтированные на пластмассовом основании и помещенные в прозрачный герметичный корпус.

Только надежная совместная работа всех элементов конструкции обеспечивает надежную работу и требуемые технические параметры реле.



Прозрачный корпус позволяет увидеть все элементы конструкции: катушку, толкатель и контактную группу  
Рисунок 8

## МОЩНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РЕЛЕ ТИПОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ



0005

В принципе, все реле имеют очень похожие конструкции  
Рисунок 9

# КОНТАКТНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ

## Конструкция электрического контакта

Общим термином «контакт» мы будем называть один или несколько электротехнических элементов, предназначенных для совместной работы друг с другом и создания соединения или разрыва электрической цепи. С точки зрения конструкции реле для нас представляют особый интерес контакты, которые:

- могут создавать многократное и надежное электрическое соединение или разрыв цепи под воздействием приложенного к контактам механического усилия;
- создают при работе скользящие контактные поверхности, что служит для очистки поверхности контактов от загрязнений и окисных слоев и способствует уменьшению *электрического сопротивления контакта*;
- обладают способностью коммутации электрических сигналов в широком диапазоне токов и напряжений.

В электротехническом оборудовании можно везде найти контакты всех мыслимых видов и конструкций, но при рассмотрении электромагнитных реле нас интересуют контактные группы, аналогичные показанным на рис. 9.

Контакты в современных реле разрабатываются преимущественно так, чтобы совместить в конструкции электрический контакт и пружинный механизм - получается «пружинный контакт». Качество электрического соединения полностью определяется выбором и качеством применяемых в контактах металлов и сплавов, но это верно только при правильном выборе мощности катушки реле, что дает необходимую силу прижима контактов друг к другу.

Идеальный контакт состоит из металла, хорошо проводящего электрический ток и обладающего способностью длительно сохранять хорошую электропроводность. Иными словами, этот металл не должен со временем окисляться и корродировать. Между идеальными контактами должна создаваться контактная поверхность максимальной площади: это снижает переходное сопротивление. Между разомкнутыми контактами должен иметься зазор, обеспечивающий необходимую электрическую прочность изоляции контактов. И кроме того, пружинный контакт обладает свойствами идеальной пружины, рассчитанной на десятки миллионов циклов «сжатие-растяжение» с минимальной остаточной деформацией.

Остается сожалеть, но таких идеальных контактов не существует. Хорошие и не корродирующие проводники электрического тока подходят для контактов, но не способны быть хорошими пружинами и наоборот: пружинные сплавы по всем показателям являются плохими контактами. Как и везде в технике, разработчикам приходится идти на разумный компромисс, дающий желаемые технические параметры при учете габаритов и экономических факторов. При конструировании реле разработка контактов сводится к задаче многомерной оптимизации, учитывающей величину коммутируемого тока, геометрические размеры, усилие прижима контактов, требуемую чувствительность реле, напряжение изоляции между катушкой и контактными группами, предельные габариты реле и множество других показателей качества и надежности.

Типовые внешние воздействия на контакты реле сведены в две таблицы.

<b>ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ РЕЛЕ</b>		
<b>ВИД ВОЗДЕЙСТВИЯ</b>	<b>ПАРАМЕТРЫ</b>	<b>ЭФФЕКТ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ КОНТАКТОВ</b>
Электрическое	ток напряжение	нагрев, сплавление, миграция материала, химические реакции, электрическая эрозия, электрический пробой, изменение сопротивления контакта
Термическое	электрическая дуга	плавление контактов, износ, холодная сварка контактов, увеличение сопротивления контакта
Условия внешней среды	пыль корродирующие газы	ускорение износа, увеличение сопротивления контакта, образование органических и неорганических пленок на поверхности контактов, коррозия
Химическое	образование оксидов	увеличение сопротивления контакта, образование органических и неорганических пленок на поверхности контактов, коррозия
Механическое	трение давление	деформация, износ, холодная сварка контактов, изменение сопротивления контакта

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА КОНТАКТЫ РЕЛЕ			
УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ	ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ	МАТЕРИАЛ КОНТАКТОВ	НА ЧТО ИНЖЕНЕРУ СЛЕДУЕТ ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ:
"Микротоки" менее 100 мВ, менее 10 мА "Сигнальные цепи" менее 1 В, менее 10 мА	механический химический	Au - сплавы и покрытие контактов золотом (Au)	сопротивление контактов, герметичность реле, скользящие контакты, не выделяющий газов и механически прочный пластик корпуса реле
Средний уровень менее 15 В, менее 300 мА	механический химический электрический	AgNi 0.15 AgNi 10 (AgSnO) (AgCdO) (AgCu)	герметичность реле, электроэрозия, миграция материала контактов, сопротивление контактов, не выделяющий газов и механически устойчивый пластик корпуса реле
Мощные контакты 10...400 В, 0,3...30 А	химический электрический	AgNi 0.15 AgNi 10 AgSnO AgCdO AgCu	электрический ресурс реле, сплавление контактов, электрический износ, высокие температуры, надежная изоляция, вентиляция контактов реле при предельных режимах работы

## СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТОВ

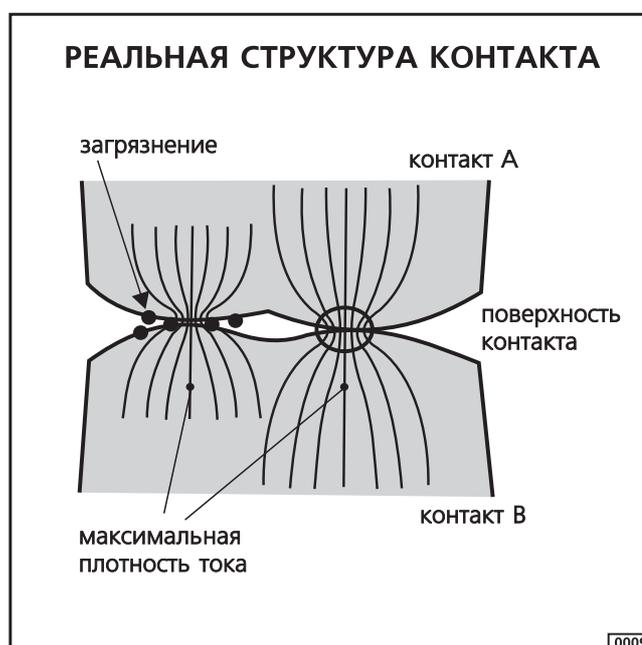
### Неидеальность электрического контакта

Электрические контакты оказывают сопротивление протекающему через них электрическому току. В идеальном случае это сопротивление равно нулю, в реальной действительности переходное сопротивление контакта  $R_k$  равно сумме сопротивлений от двух физически совершенно различных эффектов:

$$R_k = R_c + R_p,$$

где одновременно участвуют:

- сопротивление поверхности контакта  $R_p$  без оксидного слоя,
- сопротивление поверхностного слоя контакта  $R_c$ .



Контакты реле при прижиге образуют множество локальных точек контакта  
Рисунок 10

Сопротивление поверхности контакта  $R_p$  обусловлено протеканием тока через контакт определенной площади и объема и определяется физическими свойствами материала контакта, качеством обработки поверхности и усилием прижима контактов друг к другу. При рассмотрении контактов под микроскопом можно обнаружить, что поверхность контакта представляет собой множество контактных точек. Ток, протекающий через контакты, концентрируется именно в этих точках, а увеличение усилия прижима приводит к увеличению контактной поверхности и снижению переходного сопротивления контакта.

## **Загрязнения и оксидные слои на поверхности контактов**

Любые загрязнения на поверхности контактов вызывают сокращение количества точек контактирования, рост переходного сопротивления и как следствие, разогрев точки контакта. Разработчику следует учесть, что разогрев контактов свыше 70...100 °С приводит к термическому разложению органических и неорганических загрязнений на поверхности контактов, что ведет к еще большему росту переходного сопротивления контакта. С этой точки зрения при проектировании ответственного оборудования следует устранять саму возможность загрязнения контактов, применяя реле в пылезащитных или герметичных корпусах.

Абсолютно чистых и свободных от окислов контактов не бывает. Исключение составляет золото, но золотые или позолоченные контакты не применяются в мощных реле по той простой причине, что золото по своим физическим свойствам совершенно не подходит для коммутации токов более 1...2 А при напряжении коммутации выше 40...50 В. Контакты из палладия Pd очень слабо поддаются окислению, но применяются редко по причине высокой цены. Для коммутации больших токов и напряжений применяются контакты на основе серебра в сплавах с оксидами олова (AgSnO-контакты), кадмия (AgCdO-контакты) или меди (AgCu-контакты). В последнее время получил распространение контактный сплав AgNi, обладающий хорошими мощностными характеристиками и высокой механической износостойкостью.

На поверхности контактов из серебряных сплавов обязательно присутствуют тонкие пленки оксидов, сульфидов или нитридов, характерные для реле, работающих в загрязненной промышленной атмосфере. Серебро, в особенности при повышенной температуре, активно абсорбирует из окружающей среды молекулы серы и кислорода. При старении и нагреве корпусов и деталей реле из пластиков выделяются высокомолекулярные органические соединения, активно принимающие участие в создании пленок на поверхности контактов. Толщина пленок зависит от качества пластика, чистоты атмосферы при производстве реле и состояния окружающей среды при эксплуатации реле.

В любом случае образование тонких высокоомных слоев на поверхности контактов мощных реле неизбежно и требует учета при разработке и эксплуатации реле.

Пленки оксидов и сульфидов обладают свойствами изоляторов или даже полупроводников, но благодаря туннельному эффекту тонкие слои оказывают незначительное влияние на рост переходного сопротивления. При увеличении толщины слоя (например, при работе негерметичного реле на открытом воздухе) растет его сопротивление. Для создания надежного контакта непроводящий слой при срабатывании реле должен быть разрушен. В правильно спроектированных реле разрушение слоя происходит *механическим путем* (контакты ударяются и трутся друг о друга) и *термоэлектрическим способом* при протекании тока большой величины через контакты.

Следует особо отметить загрязнения, вызванные накоплением загрязняющих веществ и частиц на контактах реле. Это могут быть, например, частицы атмосферной пыли или капли смазочных масел, вызывающих повышение переходного сопротивления контактов. При механическом износе реле трущиеся детали образуют пластмассовую пыль, оседающую на контактах, поэтому при определении потенциальной надежности реле разработчику следует уделить внимание снижению надежности контактов в механически изношенных реле. Все виды органических загрязняющих веществ при нагреве склонны к термическому разложению с образованием корродирующих газов и жидкостей, которые также повреждают поверхность контактов реле.

## **Герметичные корпуса реле и вентиляция контактов**

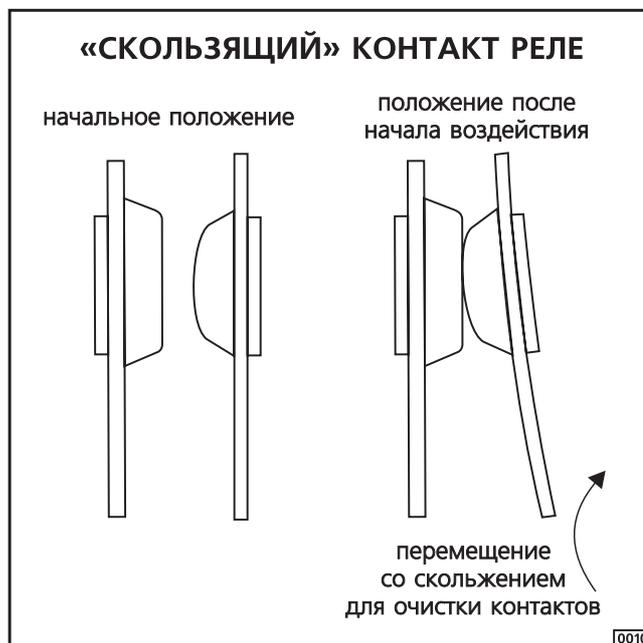
Герметичные корпуса реле позволяют почти исключить проблему загрязнения контактов, но при эксплуатации мощных реле с предельными токами нагрузки бывает недопустимо велик перегрев миниатюрных корпусов. В этом случае производители миниатюрных мощных реле предусматривают на корпусе герметичного реле вентилирующий клапан, который дает возможность эксплуатировать реле на пределе его конструктивных возможностей. В момент поставки клапан, сделанный обычно в виде выступа, закрыт, но после окончания сборки или промывки печатной платы клапан можно отломить, позволяя реле вентилироваться. При хранении оборудования на складе до начала эксплуатации лучше клапан не открывать, тогда контакты не будут подвергаться окислению.

## Механическая очистка контактов

При соприкосновении контактов друг с другом происходит механическая очистка контактов, как это показано на рис. 11. Если контакты выполнены в виде пружинящих пластин, то при включении реле контакты не только ударяются, но и трутся друг о друга, дополнительно очищая поверхность и уменьшая переходное сопротивление. Даже такой вредный эффект, как дребезг контактов, оказывает дополнительное очищающее действие.

При проектировании контактных групп конструкторы для достижения требуемого переходного сопротивления рассчитывают усилие прижима контактов с учетом трения. Правильно выбранное усилие прижима

и скольжение контактов позволяют оптимизировать усилие прижима и создать чувствительное реле с маломощной и миниатюрной катушкой.



Контакты при соприкосновении трутся друг о друга и при этом самоочищаются от окислов

Рисунок 11

## Электрическая очистка контактов реле

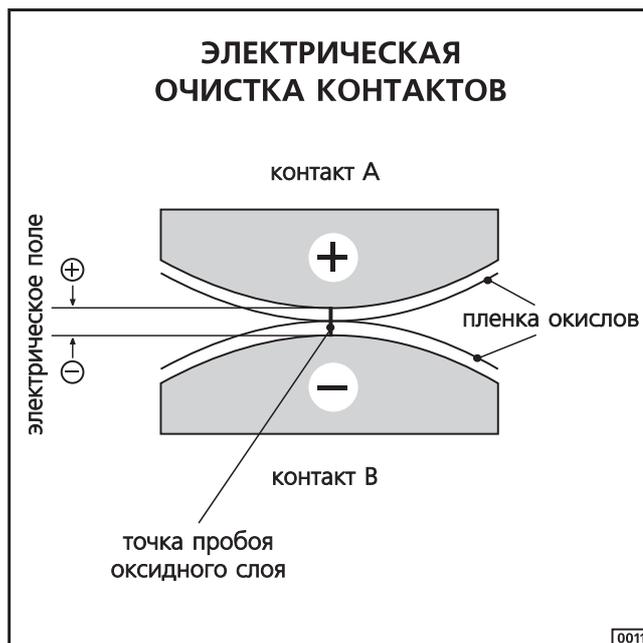
Тонкие непроводящие слои на поверхности контактов реле могут быть разрушены в результате воздействия следующих факторов:

- высоких (или относительно высоких) напряжений, что в англоязычной литературе образно называется «электрическим пробоем» контактов;
- теплового действия электрического тока, вызывающего нагрев и разрушение оксидных слоев;
- термических эффектов, появляющихся вследствие воздействия электрической дуги.

Рассмотрим все эти явления подробно, потому что контакты полностью определяют качество работы мощных реле.

### «Электрический пробой» контактов

Если контакты реле замкнуты на длительное время (например, нормально замкнутые контакты реле), то механические эффекты очистки не работают должным образом. В этом случае электрический пробой позволяет поддерживать низкое переходное сопротивление, невзирая на наличие диэлектрического слоя на поверхности контакта. На рис. 12. показан механизм работы электрического пробоя, теоретически ничем не отличающийся от высоковольтного пробоя диэлектрика в конденсаторе при приложении к обкладкам напряжения выше определенного предела. Толщина оксидного слоя на поверхности контактов обычно составляет 0,1 мкм и пробивное напряжение не превышает 10 В. Пробой развивается согласно всем законам физики:



В первый момент после коммутации контакты напоминают по структуре электрический конденсатор  
Рисунок 12

- в точках максимальной напряженности электрического поля в оксидном слое возникает начальный ток утечки, величина которого не превышает десятков пикоампер;
- после появления тока утечки происходит разогрев точки контакта и локального перегрева всего на несколько градусов уже достаточно для «разгона» молекул оксида и возрастания тока утечки до сотен наноампер;
- разогрев принимает лавинный характер, ток утечки вместе с температурой контакта возрастают до величины, обуславливающей

разрушение оксидного слоя и установление низкоомного электрического контакта.

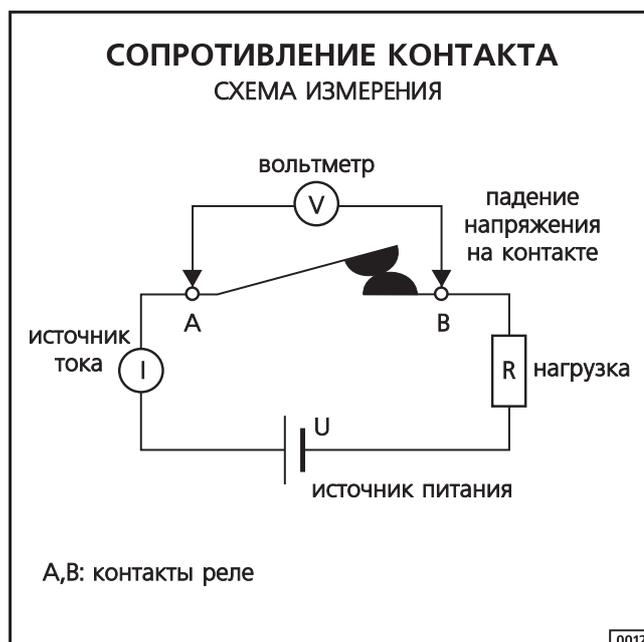
Разработчики должны помнить, что электрическая очистка контактов работает при напряжении на контактах реле только выше некоторого «пробивного» значения. При коммутации сигналов с напряжением ниже 10 В эффект электрической очистки не работает.

## Очистка контактов тепловым действием электрического тока

Предположим, что в одной из точек контакта, где оксидный слой имел наименьшую толщину, произошел электрический пробой, оксидный слой разрушился и установился электрический контакт. При протекании тока контакт разогревается и напряжение электрического пробоя для других контактных точек, изолированных слоем оксида, становится меньше. Это приводит в действие механизм электрического пробоя в других контактных точках и переходное сопротивление контакта реле соответственно уменьшается.

## Электрическая дуга как способ очистки контактов

Маломощная электрическая дуга при коммутации способна очищать контакты реле от поверхностных загрязнений. Надо помнить, что мощная дуга приводит к перегреву контактов, термическому разложению поверхностных загрязнений и прочим нежелательным эффектам, снижающим срок службы контактов и реле в целом.



Сопротивление контакта реле следует измерять при определенных токе и напряжении на контакте  
Рисунок 13

## Измерение переходного сопротивления контактов

Переходное сопротивление контактов необходимо измерять при определенных токе и напряжении на контакте. Измерять сопротивление контактов напрямую с помощью цифрового омметра бессмысленно, так как такие приборы пропускают через измеряемую цепь токи около 0.5 мА при напряжении на измеряемой цепи порядка 1...2 В. Многие типы мощных контактов не способны обеспечивать паспортное переходное сопротивление при таких малых нагрузках.

Для определения сопротивления контакта реле достаточно собрать простую схему косвенного измерения, показанную на рис. 13. Дополнительное сопротивление R ограничивает ток через контакт, а падение напряжения на контакте при известном токе позволяет рассчитать переходное сопротивление.

При выборе элементов схемы измерения следует устанавливать следующие токи тестирования:

РАБОЧИЙ ТОК КОНТАКТОВ РЕЛЕ, А	МИНИМАЛЬНЫЙ ТОК ПРОВЕРКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ, мА
0,01 - 0,1	10
0,1 - 1	100
> 1	1000

При тестировании контактов переходное сопротивление сильно зависит от их температуры и степени загрязнения, поэтому при поведении измерений следует выбирать напряжение и ток через контакты, примерно соответствующие условиям применения реле в конкретной схеме.

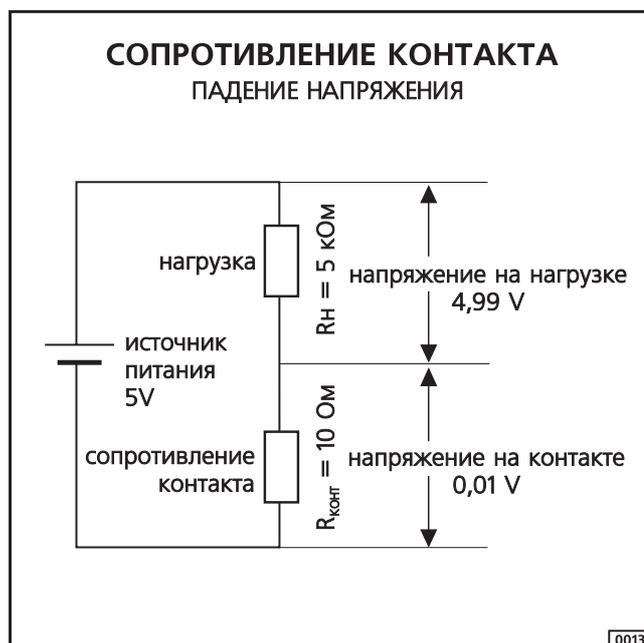
При коммутации мощных нагрузок следует учитывать тот факт, что первоначальное относительно высокое сопротивление контакта (иногда достигающее до 1...2 Ом) после коммутации быстро уменьшается до десятков и единиц миллиом под действием электрической очистки.

Конструктор должен помнить, что мощное реле может надежно коммутировать мощные индуктивные нагрузки с переходным сопротивлением контактов менее 100 мОм, но неустойчиво работать при коммутации сигнальной цепи 5 мА / 5 VDC, создавая нестабильное во времени переходное сопро-

тивление контакта. Для сигнальных цепей этим сопротивлением почти всегда можно пренебречь, особенно при коммутации дискретных сигналов, что и показано на рис. 14.

### Коммутация микротоков и цепей без тока

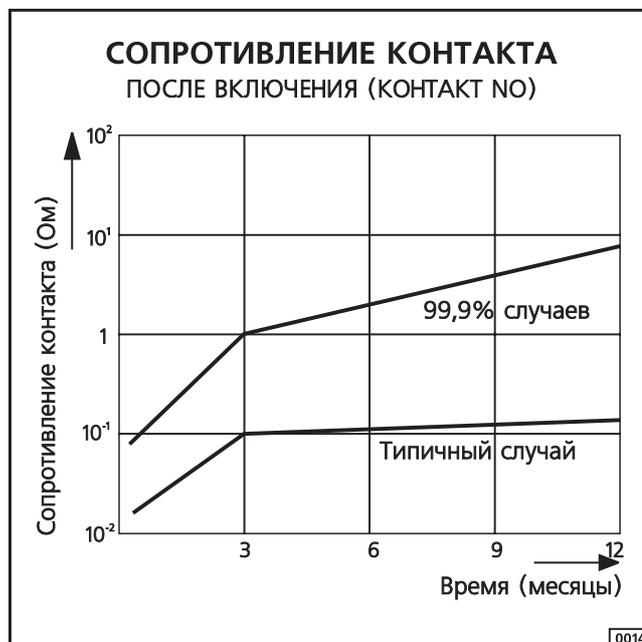
В американской технической литературе распространен термин «dry contact», то есть «сухой контакт». Так обозначается цепь, по которой протекают микротоки на уровне 10...1000 мкА. К таким цепям относятся, например, светодиодные индикаторы с рабочим током в диапазоне от 1 до 5 мА. В промышленной автоматике к микротоковым цепям относятся входные цепи оптопар, установленных в промышленных контроллерах для гальванической развязки. В «сухих контактах» рабочие токи оказываются слишком малы для работы электрической очистки, поэтому здесь единственным эффективным способом обеспечения надежной работы контактов реле будут механическая самоочистка и подпитывание контактов дополнительным током (в американской литературе в дополнение к «сухому контакту» этот ток называют «смазывающим»). «Смазывающий» ток можно создать путем включения параллельно «сухой цепи» небольшой резистивной нагрузки для увеличения общего тока через контакты реле до 8...10 мА. При невозможности введения балластной нагрузки необходимо подобрать реле с золочеными контактами, надежно коммутирующими микротоки.



Эта схема показывает, что в некоторых случаях можно пренебречь относительно большим переходным сопротивлением контакта  
Рисунок 14

## Влияние окружающей среды на сопротивление контактов

Оксидные слои на контактах имеют свойство изменять сопротивление контактов со временем. На рис. 15 показано типичное изменение переходного сопротивления контактов реле на протяжении одного года эксплуатации. Основное влияние оказывают корродирующие газы атмосферы, окружающей реле: сульфиды, хлориды, окись азота, аммиак и бензин обладают высокой химической активностью и образуют с металлами контактов устойчивые и растущие со временем поверхностные слои. Герметичные реле свободны от проблем с грязной атмосферой и по сравнению с реле открытой конструкции обладают более стабильным переходным сопротивлением контактов. Это позволяет рекомендовать применение герметичных реле везде, где только возможно.



Изменение переходного сопротивления после включения реле  
Рисунок 15

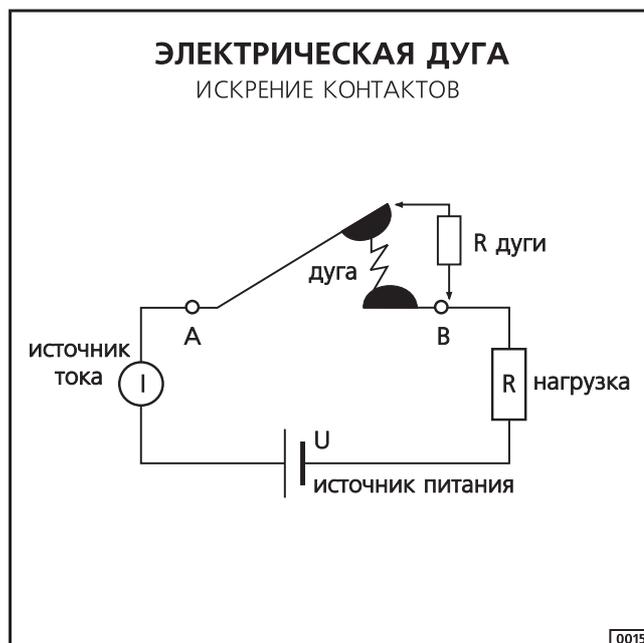
При необходимости длительного хранения реле на складе в заводской упаковке (или установленных в оборудовании) следует отдавать предпочтение герметичным реле. По последним данным, герметичные реле можно хранить до момента начала применения до 25 лет, а современные пластики позволяют прогнозировать конструктивный срок службы механических элементов реле до 30...40 лет.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

Электрическая дуга представляет собой электрический разряд в газовой среде между контактами, возникающий при размыкании электрического контакта или при нестабильности переходного сопротивления контактов (искрение). При наличии электрического поля воздух в промежутке между парой контактов ионизируется и газовая среда в промежутке между контактами становится электропроводящей. Электропроводность среды сохраняется до тех пор, пока к контактам будет приложено электрическое поле необходимой напряженности. На рис. 16 показана схема замещения электрической дуги в виде сопротивления  $R_{\text{дуги}}$ . График рис. 17 показывает минимальные рабочие токи и напряжения возникновения электрической дуги для серебряных контактов (данные справедливы и для контактных сплавов  $\text{AgNi}$ ,  $\text{AgCdO}$ ,  $\text{AgSnO}$  и  $\text{AgCu}$ ). Из графика видно, что увеличение расстояния между контактами в три раза (от 0,1 мм до 0,3 мм) приводит к росту минимального напряжения дуги всего на 10 вольт!

Важно отметить, что *при работе с напряжениями менее 15 В и при рабочих токах менее 0,3 А дуга не возникает.*

Внутри дуги в плазме развивается температура от 6000 до 10000 °С. Высоковольтная дуга имеет характерную голубоватую окраску, подчеркиваемую свечением ионов меди, испаряемой с поверхности пружин контактов. При работе на постоянном токе с поверхности контактов-анодов металлы испаряются и осаждаются на контактах-катодах, вследствие чего оба контакта реле постепенно теряют форму и разрушаются, что наглядно иллюстрирует



При замыкании и размыкании контактов в контактном промежутке образуется электрическая дуга  
Рисунок 16

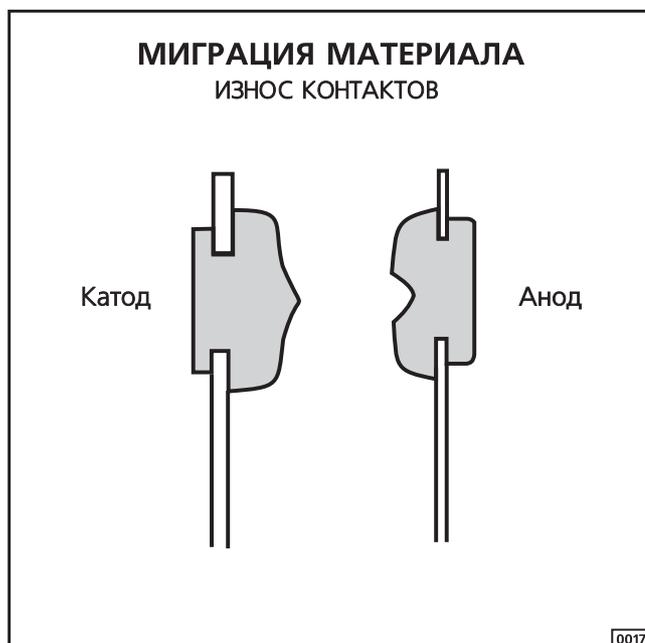
рис.18. Уменьшение зазора между контактами облегчает появление дуги при дальнейших коммутациях. Побочным эффектом испарения контактов является осаждение паров металлов на изолирующие элементы реле, что снижает электрическую прочность изоляции и в итоге приводит к замыканиям между контактами.

Основной причиной появления электрической дуги является размыкание цепей с большими индуктивностями и с большими напряжениями самоиндукции, возникающей при резком прекращении тока через катушку индуктивности. Дуга может генерироваться и при замыкании контактов, например:

- при замыкании контактов уменьшение зазора между ними повышает напряженность электрического поля в контактном промежутке, что приводит к пробоям и искрению;
- при ударе контактов друг о друга высвобождается кинетическая энергия и пружины контактов начинают колебаться («дребезг контактов»). При дребезге контакты расходятся на незначительное расстояние, при этом в воздушных зазорах



При работе с низкими напряжениями электрическая дуга не возникает  
Рисунок 17



Перенос металла с контакта на контакт аналогичен процессу электролиза  
Рисунок 18

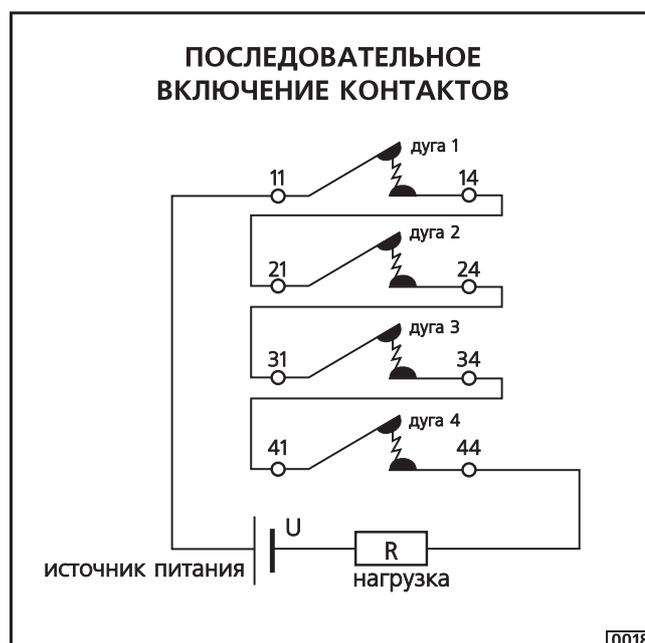
появляются электрические пробои. Дополнительные механические нагрузки изнашивают контакты, что иногда заканчивается свариванием контактов между собой.

Электрическая дуга представляет для контактов большую опасность, с которой можно и нужно бороться, а для этого необходимо проанализировать причины появления электрической дуги.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Коммутация активных нагрузок

В цепях постоянного тока дуга возникает между контактами при разрыве цепи. При расцеплении контактов вначале расстояние между контактами мало и между ними зарождается дуга, которая погасает при расхождении контактов на некоторое расстояние. Проблемы возникают при коммутации высоковольтных нагрузок при недостаточно большом зазоре между контактами. При малом зазоре и высоком напряжении коммутации появившаяся дуга не погасает и через несколько секунд контакты под воздействием высокой температуры дуги нагреваются и необратимо повреждаются. Способом борьбы с дугой здесь является последовательное включение нескольких контактных групп для перераспределения напряжения



Дорогой, но эффективный способ борьбы с электрической дугой путем последовательного соединения контактов  
Рисунок 19

источника питания на 2 и более воздушных промежутка (см. рис. 19), либо выбор реле с большими контактными промежутками (более 2...3 мм). Такие реле хотя и выпускаются промышленностью, но более дороги вследствие усложнения механизма реле.

Последовательное включение контактов полезно при работе как на переменном, так и на постоянном токе, но недостатки этого способа тоже очевидны: требуется более дорогое реле с несколькими группами контактов и растут потери при коммутации за счет появления в цепи нескольких сопротивлений контактов.

### **Коммутация индуктивных нагрузок**

Катушка индуктивности запасает энергию, прямо пропорциональную индуктивности  $L$  и квадрату тока  $I$  через катушку:

$$E = (L * I^2)/2$$

При включении индуктивности в цепь источника питания ток через катушку нарастает медленно (индуктивность не допускает броска тока) с постоянной времени, пропорциональной индуктивности катушки  $L$  и суммарному сопротивлению  $R_{\Sigma}$  всей последовательно с катушкой включенной цепи:

$$T = L * R_{\Sigma}$$

Таким образом, индуктивные нагрузки не создают проблем при *включении* (за исключением соленоидов с подвижным сердечником и электромоторов, где при включении индуктивность мала и пусковой ток может быть в десятки раз больше токов в установившемся режиме).

При отключении индуктивностей выделяется запасенная в катушке энергия, создавая напряжение самоиндукции, равное рабочему напряжению, умноженному на добротность катушки. Добротность индуктивной нагрузки бывает на практике от 0,5 (катушки с большим внутренним сопротивлением) до 50 (типичные соленоиды электромеханических замков, катушки контакторов и мощных реле, электромоторы и т.д.). Напряжение самоиндукции катушки обычного промышленного реле с рабочим напряжением 24 VDC может превышать 1 киловольт!

При необходимости коммутации индуктивных нагрузок следует отдавать предпочтение реле, у которых:

- минимальное время выключения;
- максимальное расстояние между контактами;
- контакты выполнены из сплавов AgCdO или AgSnO.

Хорошо помогают гасить дугу специальные *искрогасящие цепи*, их рассмотрению будет посвящен особый раздел.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В цепи переменного тока 50 Гц напряжение на контактах 50 раз в секунду переходит через нуль, что способствует гашению дуги. Дуга может не погаснуть совсем, если коммутируемое напряжение достаточно высокое, а промежуток между контактами позволяет поддерживать дуговой разряд. Борьба с электрической дугой в цепях переменного тока аналогична методам, приведенным для дуги на постоянном токе. Искрогасящие цепи помогают сократить время горения дуги и увеличить ресурс контактов реле.

Отметим, что при работе на переменном токе слабое искрение контактов существенно сокращает их ресурс, зато интенсивная электрическая очистка поверхности контактов уменьшает переходное сопротивление. Этот парадокс замечают многие эксплуатационники, говоря о таких реле: искрит, но не греется.

## **Виды электрических нагрузок**

Для более детального анализа работы контактов реле приведем классификацию электрических нагрузок.

Электрические нагрузки, часто встречающиеся на практике, бывают как чисто активные (нагреватели, лампы накаливания), так и смешанного типа, например, активно-индуктивные (контакторы, трансформаторы) или активно-емкостные (источники питания, корректоры «косинуса фи»).

Линейные нагрузки сохраняют свой импеданс неизменным для любых уровней тока и напряжения.

Нелинейные нагрузки изменяют импеданс в зависимости от приложенного тока или напряжения.

ШУНТ ПАРАЛЛЕЛЬНО КАТУШКЕ РЕЛЕ	ПИКОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВЫБРОСА НА КАТУШКЕ РЕЛЕ (% ОТ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ)	ВРЕМЯ ВЫКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ, МС (% ОТ ПАСПОРТНОГО ЗНАЧЕНИЯ)
Без шунтирования	950 (3400 %)	1,5 (100 %)
Конденсатор 0,22 мкФ	120 (428 %)	1,55 (103 %)
Стабилитрон, рабочее напряжение 60 вольт	190 (678 %)	1,7 (113 %)
Диод + последовательный резистор 470 Ом	80 (286 %)	5,4 (360 %)
Варистор, напряжение ограничения 60 вольт	64 (229 %)	2,7 (180 %)

## Активные нагрузки

Представляют собой омическое сопротивление, известное разработчику заранее или легко поддающееся расчету (например, по мощности нагревателя и напряжению питающей сети однозначно рассчитывается рабочий ток). Активные нагрузки обычно не требуют защиты контактов реле искрогасящими цепями, исключением является случай коммутации высоковольтных нагрузок с напряжением источника питания более 500...1000 В, где необходимо выбирать реле с максимальным контактным промежутком или использовать *контактор* (мощное реле с мостиковыми контактами и большим промежутком между контактами).

## Индуктивные нагрузки

Индуктивная нагрузка является инерционным элементом, а ток через индуктивность не может меняться скачком, что приводит к плавному включению индуктивных нагрузок. На рис. 20. показаны зависимости тока и напряжения на нагрузке при переходных процессах, а именно при замыкании и размыкании контактов реле.

Для контактов реле включение индуктивной нагрузки - простая задача, потому что ток через контакты растет медленно. При скачкообразном выключении напряжения на нагрузке запасенная в индуктивности энергия ищет выход, порождая напряжение самоиндукции, по полярности обратное напряжению источника питания. Эквивалентной схемой замещения индуктивной нагрузки является RL - цепь, причем от величины активного сопротивления катушки  $R$  зависит добротность катушки и в итоге мощность разряда самоиндукции.

При работе RL - цепи на переменном токе (рис. 21) в цепи катушки создается сдвиг фаз между питающим током и напряжением, поэтому при коммутации мощных индуктивных нагрузок на переменном токе бессмысленно отключать нагрузку в «нуле» напряжения, как это сделано во многих



Выброс напряжения при отключении индуктивной нагрузки: большая проблема для контактов реле  
Рисунок 20



Сдвиг по фазе между  $I$  и  $U$  в индуктивной нагрузке: контакты следует размыкать в «нуле» тока  
Рисунок 21

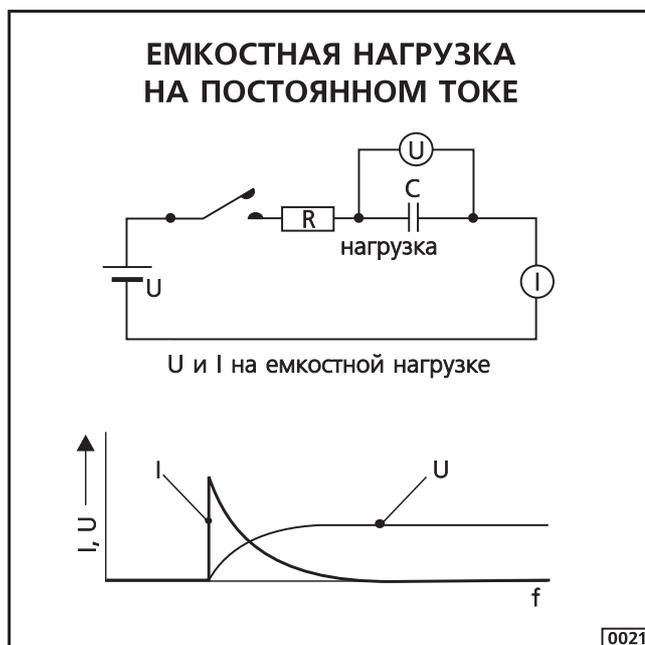
оптосимисторных коммутаторах. Индуктивную нагрузку необходимо отключать в «нуле» тока, это приведет к отсутствию переходных процессов при выключении нагрузки и повышению ресурса реле в десятки раз.

## Емкостные нагрузки

На рис. 22 показан переходный процесс при коммутации емкостной нагрузки на постоянном токе. На переменном токе конденсатор представляет собой стабильную по импедансу нагрузку, вызывающую фазовый сдвиг между питающим током и напряжением. Инженеры должны помнить, что мощными емкостными нагрузками являются такие устройства, как:

- длинные кабели и линии питания, обладающие конструктивной емкостью, достигающей до 1 мкФ/км;
- источники питания и источники бесперебойного питания (надо помнить о фильтрующих конденсаторах емкостью до 1000 мкФ, установленных после выпрямительного мостика);
- люминесцентные лампы и ртутные лампы высокого давления (десятки мкФ);
- силовые фильтры помех, где входная емкость фильтра составляет 0,47...10 мкФ.

Пример: импульсный источник питания обычного бытового компьютера (всем известного, как PC) мощностью 200 Вт имеет рабочий ток 1,3 А и пусковой ток 60 А при заряде конденсаторов, длительность перегрузки около 0,2 сек. Такой источник питания представляет собой крайне неприятную нагрузку для контактов реле и странно видеть некоторые схемы, где подобные импульсные источники питания комму-



Бросок тока при включении - основная сложность при коммутации емкостных нагрузок  
Рисунок 22

тируются сигнальными реле с рабочими токами 1...2 А. Работают такие неправильно спроектированные схемы, правда, недолго.

Емкостные нагрузки создают бросок тока через контакты реле при включении питания но при отключении питания никаких переходных процессов не будет.

## Величина нагрузки контактов реле

На рис. 23 показаны условные области, характерные для классификации контактов реле по рабочему току. Для *микротоков* характерны коммутируемые напряжения менее 100...300 мВ при токах менее 10 мА. Не всякие контакты обычных реле способны стабильно коммутировать такие малые уровни тока и напряжения. При коммутации микротоков сопротивление мощного контакта реле сильно изменяется во времени, а при наличии вибраций в дополнение к нестабильному сопротивлению контакта дребезг создает в коммутируемой цепи помеху, называемую вибро-эдс. Основной причиной старения контактов в сигнальных реле является механический износ, причем в современных конструкциях реле механический ресурс доведен до 100 миллионов коммутаций (что по-прежнему недостижимо для мощных реле, рассчитанных на ток 15...20 А).

При коммутации токов до 300 мА и напряжений менее 30 В говорят о *промежуточных уровнях мощности*. Коммутация здесь сопровождается появлением маломощных дуговых разрядов, а типичными областями применения являются телекоммуникационное оборудование, аудио-видео-техника, устройства пожарной и охранной сигнализации и офисное оборудование.



Контакты реле оптимизированы для работы в одном из трех указанных диапазонов тока и напряжения  
Рисунок 23

Мощные нагрузки - это область коммутации напряжений свыше 30 В и токов более 300 мА. Здесь обычны стабильные и мощные дуговые разряды, электрическая эрозия контактов, перенос материала с контакта на контакт, перегрев контактов и очень сильная зависимость ресурса реле от величины коммутируемой мощности.

## **Максимальная и минимальная мощность коммутации**

Контакты реле неидеальны и характеризуются как максимальной, так и минимальной мощностями коммутации. Для контактов из любых материалов гарантируются определенные минимальные токи и напряжения коммутации, при которых создается и поддерживается стабильное переходное сопротивление.

При подборе материала для контактов разработчики придерживаются правила соответствия контакта назначению реле. Мощные контакты из  $\text{AgCdO}$ ,  $\text{AgSnO}$ ,  $\text{AgNi}$  и  $\text{AgCu}$  оптимизированы для коммутации активных и индуктивных нагрузок с переходным сопротивлением максимум 100 мОм. В промышленной электронике и автоматике с целью унификации получили широкое распространение так называемые универсальные реле с многослойными контактами, представляющими собой обычные мощные реле с золотым покрытием силовых контактов. Золочение нельзя производить напрямую по серебряным сплавам вследствие активной диффузии молекул серебра сквозь тонкие пленки золота, поэтому золото наносят на защитный подслои никеля или палладия (или несколько слоев различных металлов), что и привело к появлению термина «многослойные покрытия». Обычно золотое покрытие имеет стандартную толщину 0,2 или 3 мкм, что разрешает коммутировать мощными контактами микротоковые нагрузки. Внимание: после первой же коммутации мощной нагрузки ( $I > 0,5 \text{ A}$  и  $U > 50 \text{ B}$ ) золотой слой на контактах полностью разрушается и такое реле навсегда теряет свою универсальность, оставаясь далее просто мощным реле.

Максимальные токи контактов реле ограничиваются следующими факторами:

- токами переходных процессов при включении емкостных нагрузок или электродвигателей;
- геометрическими размерами контактов реле и связанными

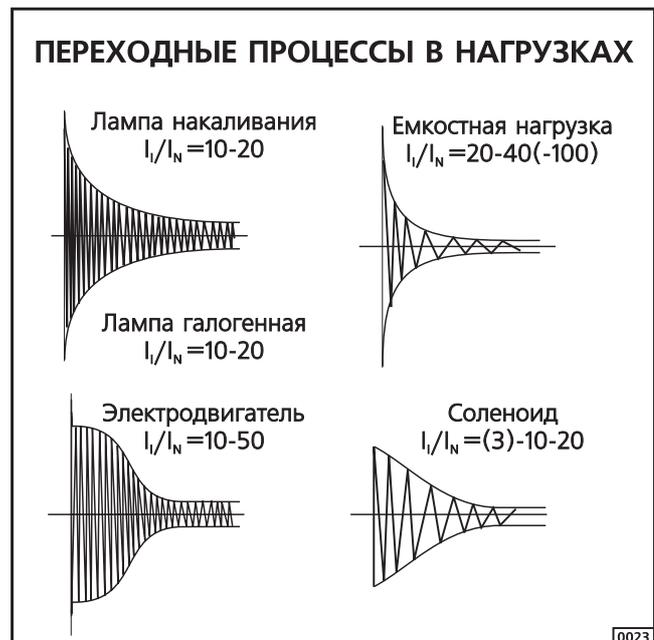
- с ними предельными токами коммутации;
- расстоянием между разомкнутыми контактами, ограничивающим максимальное напряжение коммутации или максимальные токи коммутации индуктивных нагрузок;
- возможностью охлаждения контактов при коммутации больших токов, а также высокой температурой окружающей среды.

## Температура и надежность

При разработке оборудования, содержащего реле, необходимо предельно серьезно относиться к окружающей температуре при эксплуатации. Для расчета надежности при отсутствии экспериментальных данных применяется подтвержденное многолетней практикой *правило десяти градусов*:

При каждом повышении температуры окружающей среды на 10 °С по отношению к предельной температуре, указанной в каталоге или паспорте на реле, ресурс реле уменьшается в два раза. Это означает, что для реле с электрическим ресурсом 100 тысяч коммутаций при максимальной паспортной температуре +55 °С при повышении температуры до +65 °С ресурс падает до 50 тысяч коммутаций, а при +75 °С составляет всего 25 тысяч коммутаций.

Правило десяти градусов справедливо только в температурном диапазоне, находящимся в допустимых пределах для изоляционных материалов корпуса и механизма реле. Обычно современные справочники по надежности требуют безусловного ограничения кратковременно действующей окружающей температуры «обычных» промышленных реле на уровне +90 °С. Появление новых пластиков позволило создавать недорогие мощные реле, надежно работающие при окружающей температуре до +125 °С, но такие реле по конструктивным сооб-



Все сложные нагрузки ведут себя примерно одинаково и создают проблему для контактов реле  
Рисунок 24

ражениям невозможно производить в корпусах со степенью защиты более IP54: требуется вентиляция контактов. Эти реле находят применение в «горячем» кухонном оборудовании - электроплитах, печах, грилях и сушильных шкафах.

Переходные процессы при включении мощных нагрузок показаны на рис.24, где представлены примерные осциллограммы тока в нагрузке и даны значения перегрузки по току при включении.

В инженерной практике особенно важно знать характер поведения ламп накаливания, люминесцентных ламп, электродвигателей и соленоидов.

## **Лампы накаливания**

Холодная нить лампы накаливания имеет примерно в 10 раз меньшее сопротивление, чем нить, раскаленная до желто-белого цвета свечения (все проводники при нагревании увеличивают свое сопротивление). Перегрузка по току продолжается до разогрева нити накаливания, обычно это время не превышает 0,5 сек. В галогенных лампах бросок тока при включении достигает 20-кратного значения, что требует повышенного внимания к разработке цепей коммутации галогенных ламп. Для натриевых ламп перегрузка меньше и обычно принимается равной 300%.

В нагревателях (например, ТЭНах) разница в сопротивлении между «холодным» и «горячим» нагревательным элементом очень мала и броска тока при включении нет.

При выключении ламп накаливания перегрузки контактов реле не происходит.

Для включения ламп накаливания следует применять реле с контактами, рассчитанными на большие пусковые токи. Для ориентировочной оценки можно считать, что реле с коммутационной способностью на активной нагрузке, равной 100%, сохранит свой электрический ресурс при включении ламп накаливания с мощностью на уровне 20-30% от номинальной коммутируемой мощности.

## Люминесцентные лампы

Перегрузка при включении превышает рабочий ток в 5...10 раз. В люминесцентных лампах со встроенным электронным корректором «косинуса фи» бросок тока больше и может достигать 20-кратной перегрузки. Длительность переходного процесса обычно не превышает 0,2...0,5 сек, при отключении перегрузки контактов реле не будет.

## Электродвигатели

Здесь проблема с перегрузкой при включении стоит особенно остро. Для конструкции современных асинхронных электродвигателей характерно снижение сопротивления обмотки для уменьшения тепловых потерь, но при включении таких моторов перегрузка по току составляет до 2000% от номинального тока электродвигателя. Длительность перегрузки зависит от скорости разгона двигателя, что непосредственно связано с нагрузкой самого двигателя. Для насосов и вентиляторов время разгона может быть более 10 секунд, что сильно перегружает контакты реле. При отключении электродвигатель ведет себя подобно индуктивной нагрузке с высоким напряжением самоиндукции, что требует правильного подбора контактов реле.

На корпусах многих реле дается значение максимальной мощности коммутируемого двигателя, в американском стандарте до сих пор мощность измеряется в лошадиных силах (horse power, HP). На реле можно найти такое, например, обозначение: 1/4 HP, 240 VAC, что расшифровывается как возможность коммутации контактами реле двигателя мощностью в четверть лошадиной силы (примерно 200 Вт) при напряжении источника питания 240 VAC. При снижении напряжения источника питания у реле не обязательно появляется возможность коммутации более высоких токов или сохранения указанной на реле мощности электродвигателя: здесь желательна консультация с производителем реле.

Коммутация электромоторов - тяжелая задача для контактов реле, поэтому инженерам следует внимательно изучать каталог и паспортные данные для принятия решения о возможности применения конкретного реле для включения двигателей необходимой мощности. При выполнении ответственных

проектов всегда следует отдавать предпочтение одновременной коммутации двух полюсов для однофазных электродвигателей - при этом контакты реле включены последовательно и разрушающее действие электрической дуги ослабляется.

## **Соленоиды и контакторы**

Мощные электромагниты с подвижным сердечником (соленоиды) и электромагнитные пускатели (контакторы) в исходном состоянии имеют малую индуктивность катушки. При включении питания в начальный момент рабочий ток через контактор или соленоид ограничивается только омическим сопротивлением катушки и перегрузка по току при переходном процессе достигает 1000...2000% от рабочего значения. Таким образом, при включении контактор ведет себя подобно мощной емкостной нагрузке, приводя к перегрузкам по току контактов реле. Длительность переходного процесса равна времени включения контактора или соленоида и для типичных промышленных устройств такого типа не превышает 20...100 мс. При выключении на катушке контактора или соленоида генерируется напряжение самоиндукции, зажигающее дугу на контактах реле. Подобно электродвигателям, контакторы и соленоиды нагружают контакты реле как при включении, так и при выключении.

При высокой частоте коммутации необходимо внимательно проанализировать режим работы реле и в любом случае останавливать свой выбор на реле, способных к перегрузкам, как минимум в 10 раз превышающим рабочие токи контакторов и соленоидов. Контакты этих реле должны быть обязательно выполнены из материалов, способных противостоять электроэрозии: AgCu, AgCdO, AgNi или AgSnO.

## **Категории нагрузок реле**

Для унификации требований к контактам в стандартах Международной Электротехнической Комиссии (МЭК, международная аббревиатура IEC) произведена классификация нагрузок, работающих на постоянном (DC) и переменном (AC) токе. В таблицах помещены коды и типы нагрузок, а подробно стандарты изложены в документах МЭК: IEC 947-3, IEC 947-4, IEC 947-5.

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (АС)	КАТЕГОРИЯ НАГРУЗКИ	ТИПИЧНЫЕ ПРИМЕРЫ НАГРУЗОК
<b>АС</b>	АС-1	активные нагрузки или нагрузки с незначительной индуктивностью
	АС-2	коллекторные электродвигатели, включение и выключение
	АС-3	асинхронные электродвигатели с КЗ ротором, включение, выключение при вращающемся роторе
	АС-4	асинхронные электродвигатели с КЗ ротором, включение и выключение при вращающемся роторе
	АС-5a	включение люминесцентных ламп или ламп с электронным управлением разрядом
	АС-5b	включение ламп накаливания
	АС-6a	включение и отключение трансформаторов
	АС-6b	включение батарей конденсаторов
	АС-7a	небольшие индуктивные нагрузки в оборудовании для бытовой электротехники
	АС-7b	включение и отключение электродвигателей бытовой электротехники
	АС-8a	герметичные компрессоры холодильников с ручным сбросом после возникновения перегрузки
	АС-8b	герметичные компрессоры холодильников с автоматическим сбросом и перезапуском после возникновения перегрузки
	АС-12	управление резистивными нагрузками и полупроводниковыми приборами при применении опторазвязок для гальванической изоляции
	АС-13	управление резистивными нагрузками и полупроводниковыми приборами при применении трансформаторов для гальванической изоляции
	АС-14	управление небольшими электромагнитами и контакторами
	АС-15	управление электромагнитами переменного тока
	АС-20	коммутация при отсутствии тока нагрузки
	АС-21	управление резистивными нагрузками с небольшими перегрузками при переходных процессах
	АС-22	управление резистивно-индуктивными нагрузками, включая небольшие перегрузки при переходных процессах
АС-23	коммутация электродвигателей или других мощных индуктивных нагрузок	

Рассмотрим пример зависимости предельной мощности коммутации контактов реле от характера нагрузки. В одном из отчетов солидной американской фирмы-производителя электромагнитных реле приведены экспериментальные данные по зависимости электрического ресурса реле от вида нагрузки. Речь идет о миниатюрном реле с одним переключающим С/О или

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА АС/ДС	КАТЕГОРИЯ НАГРУЗКИ	ТИПИЧНЫЕ ПРИМЕРЫ НАГРУЗОК
	A	защитные схемы без требований к кратковременному току перегрузки
	B	защитные схемы с нормированным кратковременным током перегрузки

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДС)	КАТЕГОРИЯ НАГРУЗКИ	ТИПИЧНЫЕ ПРИМЕРЫ НАГРУЗОК
DC	DC-1	активные нагрузки или нагрузки с незначительной индуктивностью
	DC-3	шунтовые электродвигатели, включение, выключение при вращающемся роторе, динамическое торможение
	DC-5	электродвигатели, включение, выключение при вращающемся роторе, динамическое торможение
	DC-6	включение ламп накаливания
	DC-12	управление резистивными нагрузками и полупроводниковыми приборами при применении опторазвязок для гальванической изоляции
	DC-13	управление электромагнитами
	DC-14	управление электромагнитными нагрузками со встроенными ограничительными резисторами
	DC-20	коммутация при отсутствии тока нагрузки
	DC-21	управление резистивными нагрузками с небольшими перегрузками при переходных процессах
	DC-22	управление резистивно-индуктивными нагрузками, включая небольшие перегрузки при переходных процессах (например, шунтовые электродвигатели)
DC-23	коммутация электродвигателей или других мощных индуктивных нагрузок	

одним нормально разомкнутым NO контактом на номинальный ток 30 А/277 ВАС. Реле имеет габариты 28x28x43 мм и снабжено ножевыми выводами FASTON. Формально, согласно каталогу, такое реле способно коммутировать резистивную нагрузку мощностью  $277 * 30 = 8000$  (ВА). Завод-производитель не отказывается от этой мощности, но предлагает ознакомиться с реальными мощностями коммутации и ресурсом, приведенными в таблице.

НАГРУЗКА	НАПРЯЖЕНИЕ НА НАГРУЗКЕ	NO ИЛИ NC КОНТАКТ РЕЛЕ		C/O КОНТАКТ РЕЛЕ		ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕСУРС, ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ
		NO контакт	NC контакт	NO контакт	NC контакт	
резистор (***)	240 VAC	30 A	15 A (*)	20 A	10 A	100 000
	240 VAC	20 A	15 A (*)	20 A	15 A (*)	100 000
	28 VDC	20 A	10 A	20 A	10 A	100 000
нагреватель	240 VAC	25 A	—	—	—	100 000
электродвигатель	125 VAC	800 VA	200 VA	800 VA	200 VA	1000
	240 VAC	1600 VA	800 VA	1600 VA	800 VA	1000
электродвигатель: FLA/LRA (**)	125 VAC	22/98 A	—	—	—	30 000
	240 VAC	30/80 A	12/30 A	30/80 A	12/30 A	30 000
лампа накаливания	240 VAC	10 A	—	10 A	—	25 000
люминесцентная лампа с электронны балластом	277 VAC	10 A	3 A	10 A	3 A	6000

(\*) только для неответственных случаев применения (стандарт UL 508, раздел B и UL873, разделы B, C, D). Для ответственных применений ток равен 10 A (UL873 разделы E, F, UL 1950).

(\*\*) FLA - ток электродвигателя при полной нагрузке, LRA - ток электродвигателя при заклинивании (остановке) ротора

(\*\*\*) резистивная нагрузка в американской литературе называется «нагрузкой общего назначения» (general purpose)

Итак, анализ таблицы показывает, что у этого мощного реле при работе на индуктивную нагрузку падает не только нагрузочная способность (в 10 раз), но и ресурс (в 100 раз). При наличии серьезных ограничений на параметры электродвигателя ресурс снижается в 3 раза. Лампы накаливания понижают нагрузочную способность в 3 раза, а ресурс в 4 раза. Все эти данные верны только для случая включения нагрузки нормально разомкнутым контактом NO. При управлении нагрузкой контактом NC нагрузочная способность реле еще более ухудшается, что вызвано меньшей силой прижима контактов NC (работает только пружинный прижим контактов) по сравнению с контактами NO (при замыкании сила прижима равна усилию, развиваемому электромагнитом катушки реле).

Приведенная таблица отражает высокую добросовестность фирмы, предлагающей пользователю достоверную информацию о конкретном типе реле. При отсутствии в каталоге таких данных и необходимости коммутации электродвигателей или ламп накаливания всегда полезно запросить завод-производитель о возможности работы выбранного реле с такими нагрузками.

Инженер должен внимательно выбирать реле для коммутации индуктивных нагрузок, ламп накаливания и электронных балластов. Для таких нагрузок необходимо учитывать снижение как коммутационной способности контактов, так и уменьшение ресурса реле.

## Детальное рассмотрение процессов коммутации

Работа электромеханического контакта описывается достаточно сложными уравнениями, но в этом разделе мы будем пользоваться упрощенной моделью контактов. Инженерам, применяющим реле, наиболее интересно знать, что происходит в цепи управления при:

- механическом замыкании нормально открытого контакта реле;
- начальном процессе создания электрического контакта в управляемой цепи;
- установившемся режиме работы цепи;
- начальном моменте при размыкании контакта реле;
- окончании процесса размыкания в управляемой цепи.

## Замыкание нормально разомкнутых контактов реле

На рис. 25 показаны зависимости напряжения и тока на катушке реле от времени в процессе коммутации нормально разомкнутого контакта. Там же показаны зависимость механического положения контактов и пояснены временные параметры при включении, а именно: задержка включения, вызванная инерционностью катушки индуктивности



Задержка при включении и дребезг: неизбежность для электромагнитного реле  
Рисунок 25

(LR-цепь, электрическая задержка) и механическая задержка, вызванная конечными геометрическими размерами механизма и ограниченной скоростью перемещения движущихся деталей реле.

Прежде всего обратим внимание на дребезг контактов при включении. Дребезг вызван тем, что пружинные контакты при столкновении склонны к передаче друг другу кинетической энергии, при этом возникают вибрации и кратковременные нарушения электрического контакта. В каталогах можно найти следующие основные параметры, описывающие процесс включения реле:

- время включения (ON delay, ON time) - суммарная электрическая и механическая задержка);
- время дребезга (bouncing time) - обычно равно времени длительности дрожания контактов;
- напряжение срабатывания (pick-up voltage, V ON) - минимальное напряжение, приложенное к катушке реле и вызывающее уверенное включение реле.

Эти параметры могут зависеть от температуры и относятся к определенной конструкции реле. При механическом износе время включения возрастает и дребезг контактов усиливается, что приводит к дополнительному усилению искрения и электроэрозии контактов.

При включении нагрузок, создающих кратковременные перегрузки по току, контакты реле при включении подвергаются воздействию тепловых перегрузок, особенно неприятных в момент дребезга контактов. В каталогах указываются:

- рабочий ток контактов реле (load current), который реле способно коммутировать в течение продолжительного (неограниченного) времени;
- пусковой ток (inrush current), то есть ток перегрузки, обычно рядом приводится максимальное время воздействия перегрузки;
- сопротивление контактов (contact resistance): обычно дается для определенного тока контактов, на момент поставки, без учета возможности окисления контактов в процессе хранения.

## Перегрузки по току в установившемся режиме коммутации

При замкнутых контактах в установившемся режиме для реле кратковременные перегрузки по току намного менее опасны, чем в момент включения. В хороших промышленных реле допускается перегрузка по току в установившемся режиме до 150% от величины номинального тока, длительность перегрузки ограничена возрастанием температуры контактов до некоторого предельного значения (при -40 °С предельное время воздействия перегрузок примерно в 10 раз больше, чем при +70 °С).

В любом случае при необходимости работы контактов реле с перегрузками по току следует провести экспериментальное исследование для определения скорости роста температуры контактов при увеличении рабочего тока свыше паспортного значения.

На рис. 26 показана типовая зависимость переходного сопротивления мощного контакта при включении. Для большинства практических приложений первоначальное повышенное сопротивление контакта не играет никакой роли, если ток контакта и рабочее напряжение на нагрузке обеспечивают работу механизма электрической очистки контактов.



После включения сопротивление контакта начинает уменьшаться: так работает электрическая очистка

Рисунок 26

## Безопасный режим работы контактов реле по току

На рис. 27 показана область безопасной работы контактов реле. Критерием здесь является параметр  $I^2t$ , определяемый для контактной группы с конкретной конструкцией. На рис. 27 график рассчитан для  $I^2t = 2500 \text{ A}^2\text{сек}$ .

По сути этот параметр является предельной мощностью, рассеиваемой контактами реле в течение длительного времени. По форме график похож на характеристику срабатывания плавкого предохранителя.

Каждый контакт обладает максимальным предельным током коммутации, зависящим от геометрических размеров контакта. Для миниатюрных промышленных реле с рабочим током контактов 16 А максимальный ток обычно принимается равным 200 А при  $I^2t = 1000 \text{ A}^2\text{сек}$ .

Параметр  $I^2t$  позволяет рассчитать допустимые кратковременные перегрузки контактов.

Например, при  $I^2t = 1000 \text{ A}^2\text{сек}$  и длительности перегрузки 300 мс предельный ток коммутации будет равен 57 А.

При наличии в каталоге информации о максимальном токе перегрузки и длительности перегрузки можно самостоятельно рассчитать величину  $I^2t$ , но при работе с большими перегрузками по току лучше запросить фирму-производитель для получения точных характеристик.

## Защита контактов реле от коротких замыканий

Плавкий предохранитель является самым дешевым и надежным защитным элементом для контактов реле. Обычно для реле с С/О контактом достаточно одного предохранителя в цепи переключающего контакта. Выбор типа предохранителя неоднозначен и зависит как от предельного импульсного тока контактов реле, так и от свойств нагрузки. При выборе предохранителя необходимо учитывать:



Перегрузка по току для контакта реле допустима только в строго определенных пределах  
Рисунок 27

- параметр  $I^2t$  при защите контактов реле;
- предельные нагрузочные способности коммутируемой цепи;
- сечение и длину соединительных проводов от реле до нагрузки;
- скорость срабатывания предохранителя (для защиты контактов достаточно медленного предохранителя (характеристика М), для защиты электроники необходимы быстрые предохранители (типа F или FF)).

Напомним, что защита контактов реле предохранителем добавляет сопротивление самого предохранителя в коммутируемую цепь. На предохранителе возникает падение напряжения, а сам предохранитель во время работы нагревается, выделяя некоторую мощность. Для стеклянных предохранителей размерами 5x20 мм необходимо рассчитывать максимальное тепловыделение на уровне 1..1,5 Вт (при работе предохранителя с токами, близкими к его значению срабатывания).

При наличии в оборудовании большого количества реле и защитных предохранителей следует внимательно проверить тепловой режим всей системы.

Появление самовосстанавливающихся предохранителей на основе полупроводниковых пластиков или керамики позволяет защищать коммутируемые цепи с самовосстановлением после устранения короткого замыкания. На таких предохранителях также выделяется тепло, требующее учета при проектировании схемы или узла оборудования.

## **Коммутация микротоков и переходные процессы при включении**

Малые напряжения и токи коммутации не дают возможности для электрической очистки поверхности контактов, поэтому разработчику надлежит правильно выбирать сигнальные реле для надежной коммутации микротоков. Если все-таки возникает необходимость в коммутации «сухих цепей» контактами мощных реле, то проще всего:

- дополнить нагрузку параллельным балластным резистором для создания «смазывающего тока» контактов;
- подобрать мощное реле с золочением контактов.

Покрытие контактов слоем золота толщиной 0,2 мкм является *сохранным*, призванным защищать контакты реле от оксидирования при длительном хранении. Такие покрытия быстро изнашиваются при работе и для коммутации микротоков следует выбирать реле с золотыми покрытиями контактов толщиной 3...5 мкм. При работе негерметичных реле в агрессивной или влажной атмосфере желательно применять сигнальные контакты с золочением толщиной 10...15 мкм, но такие реле стоят несравненно дороже обычных мощных реле.

### **О необходимости коммутации сигнальных цепей контактами мощного реле**

Если внимательно изучить каталоги по сигнальным реле, то видно, что напряжение изоляции катушка-контакты в сигнальных реле не превышает 1000...1500 В (правда, есть исключения, но они весьма редки, и такие реле стоят в 3-4 раза больше своих «низковольтных» аналогов).

Область применения сигнальных реле - телефонное и телекоммуникационное оборудование, где просто не требуется высоковольтная гальваническая развязка управляющей и исполнительной цепей. В современной промышленной автоматике неуклонно происходит переход на стандарт безопасности, предписывающий для реле напряжение изоляции 2500 В и даже 4000 В. Кроме этого, от реле требуется устойчивость к импульсному напряжению изоляции 7500 или 10000 В для стандартного импульса 8/20 мкс. Таким требованиям никакие сигнальные реле не удовлетворяют и разработчику приходится применять в сигнальных цепях мощные реле, рассчитанные как раз на указанное напряжение изоляции.

В ряде случаев инженерам удастся применять для коммутации сигналов мощные реле со стандартными контактами без золотого покрытия, но если это не получается, то разработчики могут использовать мощные реле с золотыми покрытиями контактов толщиной 3 или 5 мкм.

## Размыкание нормально замкнутых контактов

Рис. 28 иллюстрирует процессы, происходящие в контактной цепи при размыкании контактов. Все явления здесь представляют собой зеркальное отражение процессов при замыкании контактов, а в каталоге приводятся следующие численные значения:

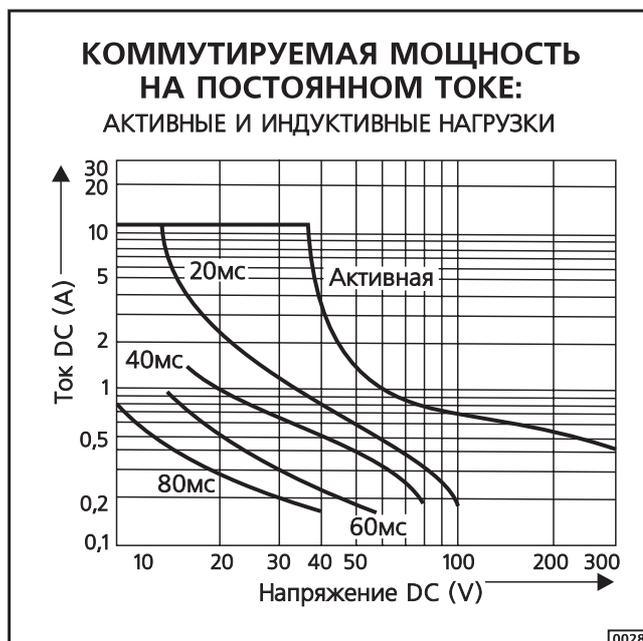
- время выключения (OFF delay, OFF time) - суммарная электрическая и механическая задержка выключения реле);
- напряжение выключения (drop-out voltage, V OFF) - напряжение, при котором реле уверенно выключается.

Процесс выключения реле связан с возникновением дуговых разрядов на контактах, особенно при работе с индуктивными нагрузками. На рис. 29 для обычного промышленного реле показаны зависимости рабочего тока от напряжения коммутации для контактов, работающих в цепи постоянного тока.

При увеличении постоянной времени индуктивной нагрузки нагрузочная способность контактов быстро падает и даже для низковольтных источников питания (10...20 VDC) рабочий ток контактов быстро падает с ростом постоянной времени нагрузки.



При размыкании контакта снова проявляются задержка и дребезг  
Рисунок 28



Индуктивная нагрузка на постоянном токе очень сложна для контактов реле  
Рисунок 29

Влияние дуговых разрядов на стабильность работы контактов реле столь велико, что для инженера знание основ расчета и применения защитных схем является просто обязательным условием.

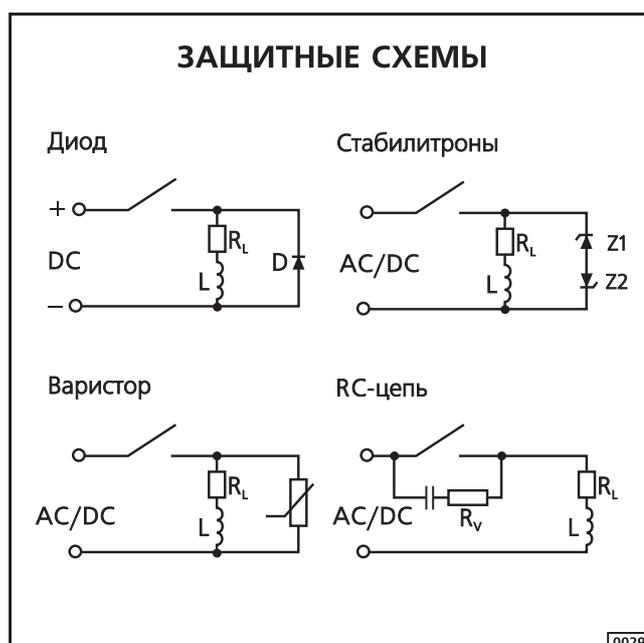
## Искрогасящие цепи

Для уменьшения повреждения контактов дуговыми разрядами применяются:

- специальные реле с большими контактными промежутками (до 10 мм и более) и высокой скоростью выключения, обеспечиваемой сильными контактными пружинами;
- магнитный обдув контактов, реализуемый установкой постоянного магнита или электромагнита в плоскости контактного промежутка. Магнитное поле препятствует появлению и развитию дуги и эффективно оберегает контакты от обгорания;
- искрогасящие цепи, устанавливаемые параллельно контактам реле или параллельно нагрузке.

Первые два способа гарантируют высокую надежность за счет конструктивных мер при разработке реле. Внешних элементов защиты контактов при этом обычно не требуется, но специальные реле и магнитный обдув контактов достаточно экзотичны, дороги и отличаются большими размерами и солидной мощностью катушки (у реле с большим расстоянием между контактами сильные контактные пружины).

Промышленная электротехника ориентируется на недорогие стандартные реле, поэтому применение искрогасящих цепей является наиболее распространенным способом гашения дуговых разрядов на контактах.



Эффективная защита существенно продлевает жизнь контактов  
Рисунок 30

Теоретически для гашения дуги можно использовать многие физические принципы, но на практике находят применение следующие эффективные и экономичные схемы:

- RC-цепи;
- обратные диоды;
- варисторы;
- комбинированные схемы, например, варистор + RC-цепь.

Защитные цепи можно включать:

- параллельно индуктивной нагрузке;
- параллельно контактам реле;
- параллельно контактам и нагрузке одновременно.

На рис. 30 показано типовое включение защитных схем при работе на постоянном токе.

### **Диодная схема (только для цепей постоянного тока)**

Самая дешевая и широко применяемая схема для подавления напряжения самоиндукции. Кремниевый диод включается параллельно индуктивной нагрузке, при замыкании контактов и в установившемся режиме не оказывает никакого воздействия на работу схемы. При отключении нагрузки возникает напряжение самоиндукции, обратное по полярности рабочему напряжению, диод открывается и шунтирует индуктивную нагрузку.

Не следует считать, что диод ограничивает обратное напряжение на уровне прямого падения напряжения, равного 0,7...1 В. Вследствие конечного внутреннего сопротивления падение напряжения на диоде зависит от тока через диод. Мощные индуктивные нагрузки способны развивать импульсные токи самоиндукции до десятков ампер, что для мощных кремниевых диодов соответствует падению напряжения около 10...20 В. Диоды исключительно эффективно устраняют дуговые разряды и предохраняют контакты реле от обгорания лучше, чем любые другие схемы искрогашения.

### Правила выбора обратного диода:

- рабочий ток и обратное напряжение диода должны быть сравнимы с номинальным напряжением и током нагрузки. Для нагрузок с рабочим напряжением до 250 VDC и рабочим током до 5 А вполне подходит распространенный кремниевый диод 1N4007 с обратным напряжением 1000 VDC и максимальным импульсным током до 20 А;
- выводы диода должны быть как можно короче;
- диод следует припаивать (привинчивать) непосредственно к индуктивной нагрузке, без длинных соединительных проводов - это улучшает ЭМС при процессах коммутации.

### Достоинства диодной схемы:

дешевизна и надежность, простой расчет, предельно достижимая эффективность.

### Недостатки диодной схемы:

диоды увеличивают время выключения индуктивных нагрузок в 5...10 раз, что очень нежелательно для нагрузок типа реле или контакторов (контакты размыкаются медленнее, что способствует их обгоранию), при этом диодная защита работает только в цепях постоянного тока.

Если последовательно с диодом включить ограничительное сопротивление, то влияние диодов на время выключения уменьшается, но дополнительные резисторы обуславливают более высокие обратные напряжения, чем только защитные диоды (на резисторе падает напряжение согласно закону Ома).

## Стабилитроны (для цепей переменного и постоянного тока)

Вместо диода параллельно нагрузке устанавливается стабилитрон, а для цепей переменного тока - два встречно-последовательно включенных стабилитрона. В такой схеме обратное напряжение ограничивается стабилитроном до напряжения стабилизации, что несколько снижает влияние искрозащитной цепи на время выключения нагрузки.

Учитывая внутреннее сопротивление стабилитрона, обратное напряжение на мощных индуктивных нагрузках будет больше напряжения стабилизации на величину падения напряжения на дифференциальном сопротивлении стабилитрона.

#### **Выбор стабилитрона для схемы защиты:**

- выбирается желаемое напряжение ограничения;
- выбирается необходимая мощность стабилитрона с учетом пикового тока, развиваемого нагрузкой при возникновении напряжения самоиндукции;
- проверяется истинное напряжение ограничения - для этого желателен эксперимент, а при измерении напряжения удобно пользоваться осциллографом.

#### **Достоинства стабилитронов:**

меньше задержка выключения, чем в диодной схеме, стабилитроны можно применять в цепях любой полярности, стабилитроны для маломощных нагрузок дешевы, схема работает на переменном и постоянном токе.

#### **Недостатки стабилитронов:**

меньше эффективность, чем в диодной схеме, для мощных нагрузок требуются дорогие стабилитроны, для очень мощных нагрузок схема со стабилитронами технически нереализуема.

### **Варисторная схема (для цепей переменного и постоянного тока)**

Металл-оксидный варистор имеет вольт-амперную характеристику, похожую на биполярный стабилитрон. До момента приложения к выводам напряжения ограничения варистор практически отключен от схемы и характеризуется только микроамперными токами утечки и внутренней емкостью на уровне 150...1000 пФ. При увеличении напряжения варистор начинает плавно открываться, шунтируя своим внутренним сопротивлением индуктивную нагрузку.

При очень небольших размерах варисторы способны отводить большие импульсные токи: для варистора диаметром 7 мм разрядный ток может быть равен 500...1000 А (длительность импульса менее 100 мкс).

#### **Расчет и монтаж варисторной защиты:**

- задаются безопасным напряжением ограничения на индуктивной нагрузке;
- рассчитывается или измеряется ток, отдаваемый индуктивной нагрузкой при самоиндукции, для определения требуемого тока варистора;
- по каталогу подбирается варистор на требуемое напряжение ограничения, при необходимости варисторы можно устанавливать последовательно для подбора нужного напряжения;
- необходимо проверить: варистор должен быть закрыт во всем диапазоне рабочих напряжений на нагрузке (ток утечки менее 10...50 мкА);
- варистор необходимо монтировать на нагрузке по правилам, указанным для диодной защиты.

#### **Достоинства варисторной защиты:**

варисторы работают в цепях переменного и постоянного тока, нормированное напряжение ограничения, незначительное влияние на задержку выключения, варисторы дешевы, варисторы идеально дополняют защитные RC-цепи при работе с высокими напряжениями на нагрузке.

#### **Недостаток варисторной защиты:**

при применении только варисторов защита контактов реле от электрической дуги существенно хуже, чем в диодных цепях.

## RC-цепи (для постоянного и переменного тока)

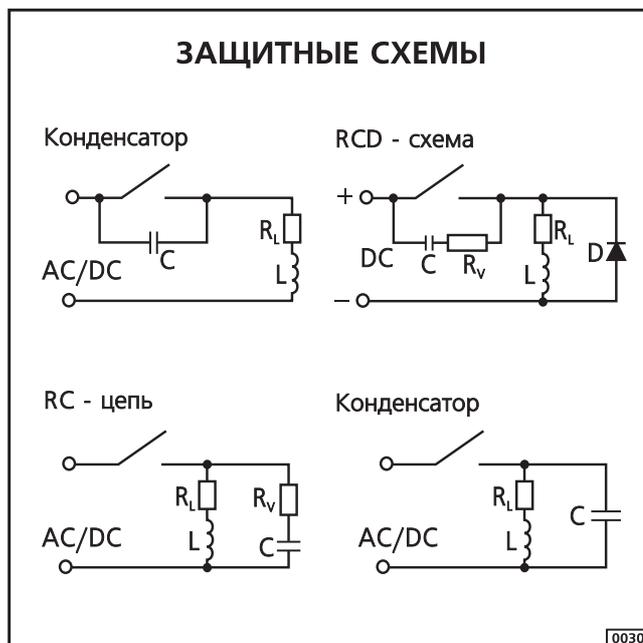
В отличие от диодных и варисторных схем RC-цепи можно устанавливать как параллельно нагрузке, так и параллельно контактам реле. В некоторых случаях нагрузка физически недоступна для монтажа на ней искрогасящих элементов, и тогда единственным способом защиты контактов остается шунтирование контактов RC-цепями.

В основе принципа действия RC-цепи лежит тот факт, что напряжение на конденсаторе не может изменяться мгновенно. Напряжение самоиндукции носит импульсный характер, причем фронт импульса для типичных электротехнических устройств имеет длительность на уровне 1 мкс. При приложении такого импульса к RC-цепи напряжение на конденсаторе начинает возрастать не мгновенно, а с постоянной времени, определяемой значениями R и C.

Если считать внутреннее сопротивление источника питания равным нулю, то подключение RC-цепи параллельно нагрузке эквивалентно включению RC-цепи параллельно контактам реле. В этом смысле принципиального различия в установке элементов искрогасящей цепочки для разных схем включения нет.

### RC-цепь параллельно контактам реле

Конденсатор (см. рис. 31) при размыкании контактов реле начинает заряжаться. Если время заряда конденсатора до напряжения зажигания дуги на контактах выбирается большим, чем время расхождения контактов на расстояние, при котором дуга не может возникнуть, то контакты полностью защищены от появления дуги. Этот случай идеален и на практике маловероятен. В реальных случаях RC-



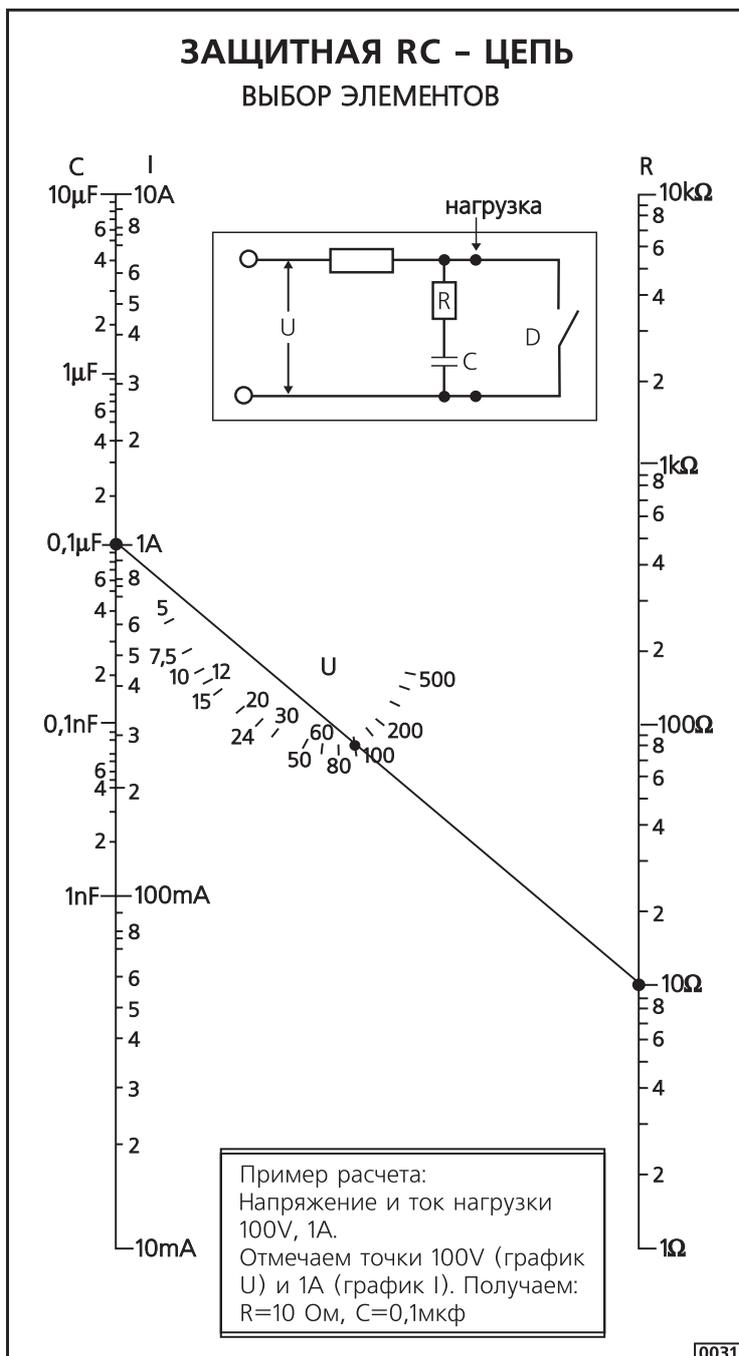
Защитные элементы можно включить как параллельно контактам, так и параллельно нагрузке  
Рисунок 31

цепь помогает при размыкании цепи поддерживать на контактах реле низкое напряжение и тем самым ослаблять влияние дуги.

При включении только одного конденсатора параллельно контактам реле схема защиты тоже в принципе работает, но разряд конденсатора через контакты реле при их замыкании приводит к броску тока через контакты, что нежелательно. RC-цепь в этом смысле оптимизирует все переходные процессы как при замыкании, так и при размыкании контактов.

## Расчет RC-цепи

Проще всего пользоваться универсальной номограммой, показанной на рис. 32. По известным напряжению источника питания  $U$  и току нагрузки  $I$  находят две точки на номограмме, после чего между точками проводится прямая линия, показывающая искомое значение сопротивления  $R$ . Значение емкости  $C$  отсчитывается по шкале рядом со шкалой тока  $I$ . Номограмма дает разработчику достаточно точные данные, при практической реализации схемы необходимо будет подобрать ближайшие стандартные значения для резистора и конденсатора RC-цепи.



Самая удобная и точная номограмма для определения параметров защитной RC цепи (а этому графику уже более 50 лет!)  
Рисунок 32

## Выбор конденсатора и резистора RC-цепи

Конденсатор следует применять только с пленочным или бумажным диэлектриком, керамические конденсаторы для высоковольтных искрозащитных цепей непригодны. При выборе резистора необходимо помнить, что на нем при переходном процессе рассеивается большая мощность. Можно рекомендовать применять для RC-цепей резисторы мощностью 1-2 Вт, причем обязательно следует проверить, рассчитан ли резистор на высокое импульсное напряжение самоиндукции. Лучше всего применять проволочные резисторы, но хорошо работают и металлопленочные или углеродные с заливкой керамическими компаундами.

### Достоинства RC-цепи:

хорошее гашение дуги и отсутствие влияния на время выключения индуктивной нагрузки.

### Особенности RC-цепи:

необходимость применения высококачественных конденсатора и резистора.

**В целом же применение RC-цепей всегда экономически оправдано.**

При установке искрогасящей цепи параллельно контактам на переменном токе при разомкнутых контактах реле через нагрузку будет протекать ток утечки, определяемый импедансом RC-цепи. Если нагрузка не допускает протекания тока утечки или это нежелательно по схемотехническим соображениям и в целях безопасности персонала, то необходимо устанавливать RC-цепь параллельно нагрузке.

## Комбинация RC-цепи и диодной схемы

Такая схема (иногда называемая DRC-цепью) предельна по своей эффективности и позволяет свести к нулю все нежелательные эффекты от воздействия электрической дуги на контакты реле.

### Достоинства DRC-цепи:

электрический ресурс реле приближается к своему теоретическому пределу.

### Недостатки DRC-цепи:

диод вызывает значительную задержку выключения индуктивной нагрузки.

### Комбинация RC-цепи и варистора

Если вместо диода установить варистор, то схема по параметрам будет идентична обычной RC-искрогасящей цепи, но ограничение варистором величины напряжения самоиндукции на нагрузке позволяет применять менее высоковольтные и более дешевые конденсатор и резистор.

### RC-цепь параллельно нагрузке

Применяется там, где нежелательна или невозможна установка RC-цепи параллельно контактам реле. Для расчета предлагаются следующие ориентировочные значения элементов:

- $C = 0,5 \dots 1$  мкФ на 1 А тока нагрузки;
- $R = 0,5 \dots 1$  Ом на 1 В напряжения на нагрузке или
- $R = 50 \dots 100\%$  от сопротивления нагрузки.

После расчета номиналов R и C необходимо проверить возникающую при этом дополнительную нагрузку контактов реле при переходном процессе (заряде конденсатора), как это было описано выше.

Приведенные значения R и C не являются оптимальными. Если требуется максимально полная защита контактов и реализация максимального ресурса реле, то необходимо провести эксперимент и опытным путем подобрать резистор и конденсатор, наблюдая переходные процессы с помощью осциллографа.

### Достоинства RC-цепи параллельно нагрузке:

хорошее подавление дуги, нет токов утечки в нагрузку через разомкнутые контакты реле.

**Недостатки:**

при токе нагрузки более 10 А большие значения емкости приводят к необходимости установки относительно дорогих и больших по габаритам конденсаторов, для оптимизации схемы желательна экспериментальная проверка и подбор элементов.

На фотографиях показаны осциллограммы напряжения на индуктивной нагрузке в момент размыкания питания без шунтирования (рис. 33) и с установленной RC-цепью (рис. 34). Обе осциллограммы имеют вертикальный масштаб 100 вольт/деление.

Специального комментария здесь не требуется, эффект от установки искрогасящей цепи виден сразу. Бросается в глаза процесс генерации высокочастотной высоковольтной помехи в момент размыкания контактов, к этому явлению мы еще вернемся при анализе ЭМС реле.

Фотографии взяты из университетского отчета по оптимизации RC-цепей, установленных параллельно контактам реле. Автор отчета провел сложный математический анализ поведения индуктивной



Отключение индуктивной нагрузки вызывает очень сложный переходный процесс  
Рисунок 33



Правильно подобранная защитная RC-цепочка полностью устраняет переходный процесс  
Рисунок 34

нагрузки с шунтом в виде RC-цепи, но в итоге рекомендации по расчету элементов были сведены к двум формулам:

$$C = I^2/10$$

где  $C$  - емкость RC-цепи, мкФ,  $I$  - рабочий ток нагрузки, А;

$$R = E_0/(10 \cdot I \cdot (1 + 50/E_0))$$

где  $E_0$  - напряжение на нагрузке, В,  $I$  - рабочий ток нагрузки, А,  $R$  - сопротивление RC-цепи, Ом.

Проверим расчет: рассчитать RC-цепь для индуктивной нагрузки с рабочим током  $I = 1$  А и напряжением источника питания  $E_0 = 220$  ВАС.

Ответ:  $C = 0,1$  мкФ,  $R = 20$  Ом. Эти параметры отлично согласуются с номограммой, приведенной ранее.

В заключение познакомимся с таблицей из этого же отчета, где приведены практически измеренные напряжение и время задержки для различных искрогасящих цепей. В качестве индуктивной нагрузки служило электромагнитное реле с напряжением катушки 28 VDC/1 W, искрогасящая цепь устанавливалась параллельно катушке реле.

ШУНТ ПАРАЛЛЕЛЬНО КАТУШКЕ РЕЛЕ	ПИКОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВЫБРОСА НА КАТУШКЕ РЕЛЕ (% ОТ РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ)	ВРЕМЯ ВЫКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ, МС (% ОТ ПАСПОРТНОГО ЗНАЧЕНИЯ)
Без шунтирования	950 (3400 %)	1,5 (100 %)
Конденсатор 0,22 мкФ	120 (428 %)	1,55 (103 %)
Стабилитрон, рабочее напряжение 60 вольт	190 (678 %)	1,7 (113 %)
Диод + последовательный резистор 470 Ом	80 (286 %)	5.4 (360 %)
Варистор, напряжение ограничения 60 вольт	64 (229 %)	2,7 (180 %)

## **Индуктивные нагрузки и электромагнитная совместимость (ЭМС)**

Требования ЭМС являются обязательным условием работы электротехнического оборудования и понимаются как:

- способность оборудования нормально работать в условиях воздействия мощных электромагнитных помех,
- свойство не создавать при работе электромагнитные помехи более предписанного стандартами уровня.

Реле малочувствительно к высокочастотным помехам, но присутствие мощных электромагнитных полей вблизи катушки реле влияет на напряжение включения и выключения реле. При установке реле рядом с трансформаторами, электромагнитами и электродвигателями обязательно требуется экспериментальная проверка правильности срабатывания и выключения реле. При установке большого количества реле вплотную на одной монтажной панели или на печатной плате также имеется взаимовлияние работы одного реле на напряжение включения и выключения остальных реле. В каталогах иногда даются указания на минимальное расстояние между однотипными реле, гарантирующие их нормальную работу. При отсутствии таких указаний можно пользоваться эмпирическим правилом, по которому расстояние между центрами катушек реле должно быть не менее 1,5 от величины их диаметра. При необходимости плотного монтажа реле на печатной плате требуется опытная проверка взаимовлияния реле.

Электромагнитное реле может создавать мощные помехи, особенно при работе с индуктивными нагрузками. Показанный на рис. 33 высокочастотный сигнал является мощной помехой, способной повлиять на нормальную работу чувствительного электронного оборудования, работающего рядом с реле. Частота помехи колеблется от 5 до 50 МГц, а мощность этой помехи составляет несколько сотен мВт, что совершенно недопустимо по современным нормам ЭМС. Искрогасящие цепи позволяют довести уровень помех от релейного оборудования до предписываемого стандартами безопасного уровня.

Применение реле в заземленных металлических корпусах положительно сказывается на ЭМС, но необходимо помнить, что при заземлении металлического корпуса у большинства реле снижается напряжение изоляции между контактами и катушкой.

## Изоляция между контактами реле

Между разомкнутыми контактами реле имеется промежуток, зависящий от конструкции реле. Воздух в промежутке (или инертный газ для газонаполненных реле) выполняет роль изолятора. Предполагается, что изолирующие материалы корпуса и контактной группы реле характеризуются более высокими пробивными напряжениями, чем воздух. При отсутствии загрязнений между контактами рассмотрение изоляционных свойств контактных групп можно ограничить свойствами только воздушного зазора.

На рис. 35 показана зависимость пробивного напряжения от величины расстояния между контактами реле. В каталогах можно найти несколько вариантов значений предельного напряжения между контактами, а именно:

- предельное значение постоянно приложенного к двум контактам напряжения;
- импульсное значение напряжения изоляции (surge voltage);
- предельное значение напряжения между контактами в течение определенного времени (обычно 1 минута, за это время ток утечки не должен превысить 1 или 5 мА при указанной величине напряжения).

Если речь идет об импульсном напряжении изоляции, то импульс представляет собой стандартный тестовый сигнал IEC-255-5 с временем нарастания до пикового значения 1,2 мкс и временем спада до 50% амплитуды 50 мкс.

Если разработчику необходимо реле с особыми требованиями к изоляции контактов, то получить информацию о соответствии этим требованиям можно либо у фирмы-производителя, либо путем проведения самостоятельного тестирования. В последнем случае необходимо помнить, что производитель реле не будет нести ответственности за полученные таким способом результаты измерений.



Чем контакты реле дальше друг от друга, тем пробивное напряжение выше: но при этом выше и надежность реле

Рисунок 35

## Материалы для контактов реле

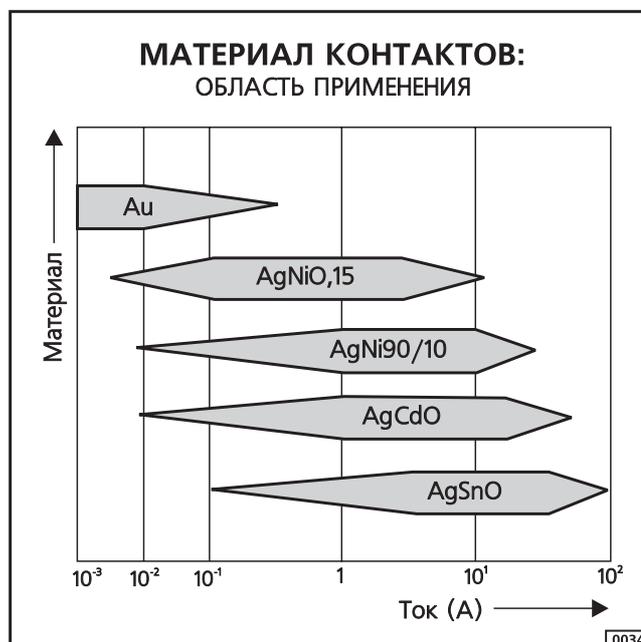
От материала контактов зависят такие параметры самих контактов и реле в целом, как:

- нагрузочная способность по току, то есть способность эффективного отвода тепла от точки контакта;
- возможность коммутации индуктивных нагрузок;
- переходное сопротивление контакта;
- предельная температура окружающей среды при эксплуатации;
- устойчивость материала контактов к миграции, особенно при коммутации индуктивных нагрузок на постоянном токе;
- устойчивость материала контактов к испарению. Испаряющийся металл поддерживает развитие электрической дуги и ухудшает изоляцию при осаждении металла на изоляторы контактов и корпус реле;
- устойчивость контактов к механическому износу;
- эластичность контактов для поглощения кинетической энергии и предотвращения чрезмерного дребезга;
- устойчивость металла контактов к воздействию корродирующих газов из окружающей среды.

Некоторые полезные качества материалов не исключают друг друга, например, хорошие проводники тока всегда обладают высокой теплопроводностью. При этом хорошие проводники с низким удельным сопротивлением обычно слишком мягкие и легко поддаются износу.

Температура плавления выше у специальных контактных сплавов (например, AgNi или AgSnO), но такие материалы совсем не подходят для коммутации микротоков.

В итоге разработчик реле останавливается на определенном компромиссе между качеством, ценой и габаритами реле. Этот компромисс



Каждый материал рассчитан на работу контактов в определенном диапазоне токов, но может с осторожностью применяться и для коммутации слабых сигналов

Рисунок 36

привел к стандартизации областей применения различных контактов реле, как показано на рис. 3б. Области применения различных материалов для контактов достаточно условны, но разработчик должен понимать, что при работе контактов на границе «выделенного» для них диапазона токов и напряжений может потребоваться экспериментальная проверка надежности такого применения. Эксперимент очень прост и заключается в измерении переходного сопротивления контактов для партии однотипных реле, причем желательно тестировать не только что сошедшие с конвейера реле, а прошедшие транспортировку и полежавшие некоторое время на складе. Оптимальным сроком «вылеживания» на складе является 3..6 месяцев, за это время нормализуются процессы старения в пластиках и соединениях металл-пластик.

Мы отметили только малую часть задачи выбора контактных материалов, для рассмотрения всей проблемы в целом не хватило бы объема и всей книги.

## **Контактные сплавы и порошковая металлургия**

В этой книге мы применяем термин «контактный сплав», но не всегда это действительно сплав. Многие типы контактов изготовлены методом порошковой металлургии, позволяющей создавать уникальные по параметрам контакты из металлов с очень разными физическими и химическими характеристиками. В американской литературе такие контакты называются «sintered», то есть спеченные из порошка нескольких металлов.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТОВ РЕЛЕ

## Серебро со слабым легированием AgNi0.15

Коэффициент 0.15 после символа никеля показывает процентное содержание никеля в сплаве серебро-никель. Добавка 0,15 % никеля делает серебро тверже без влияния на электропроводность и другие физические свойства серебра. Чистое 100 % серебро для контактов никогда не применяется вследствие подверженности механическому износу.

Серебро успешно противостоит окислению и отлично работает в контактах герметичных реле. В то же время серебро крайне неустойчиво к серным загрязнениям атмосферы вследствие образования и роста слоя сульфида серебра на поверхности контактов. Наличие серы неизбежно в любой заводской и городской атмосфере (выбросы тепловых электростанций, продукты термического разложения резиновых прокладок и уплотнителей, выхлопы двигателей внутреннего сгорания и т.д), поэтому инженер должен при выборе реле с контактами AgNi0.15 отдавать предпочтение герметичным реле.

На рис. 37 показана область применения контактов из серебра, пригодных для коммутации нагрузок



Контакты из чистого серебра: отличные параметры, но рабочий ток не должен превышать 10 А

Рисунок 37

при токах от 10 мА до 10 А при напряжении коммутации  $> 12$  В. Иногда контакты  $\text{AgNi}_{0.15}$  покрывают защитным слоем золота  $\text{Au}_{0.3}$  для предотвращения окисления при длительном хранении реле.

Итак, контакты из серебра или  $\text{AgNi}_{0.15}$ :

- универсальные и подходят для коммутации нагрузок средней и большой мощности;
- при больших токах коммутации и при индуктивных нагрузках склонны к оплавлению, миграции материала контактов и механическому износу;
- проблематичны при коммутации микротоков вследствие образования оксидных слоев на поверхности.

### **Твердое серебро $\text{AgCu}_3$**

По электрическим характеристикам твердое серебро с 3% содержанием меди аналогично  $\text{AgNi}_{0.15}$ , но при этом обладает большей износостойкостью и способностью к коммутации индуктивных нагрузок. Это обуславливает более высокие механический и электрический ресурсы, чем у  $\text{AgNi}_{0.15}$ .

Реле с контактами из  $\text{AgCu}_3$  должны проектироваться так, чтобы обеспечить уверенное проскальзывание пар контактов при замыкании и размыкании для очистки поверхности от оксидных пленок.

### **Серебро-окись кадмия $\text{AgCdO}$**

Материал серебро-окись кадмия при коммутации индуктивных нагрузок существенно более устойчив к механическому износу и оплавлению, чем чистое серебро или  $\text{AgNi}_{0.15}$ . Вследствие этого контакты из  $\text{AgCdO}$  применяются для коммутации соленоидов, электромоторов, контакторов, ламп накаливания и других нагрузок с аналогичными характеристиками.

При необходимости коммутации токов  $< 100$  мА при напряжении  $< 12$  В рекомендуется экспериментально проверять переходное сопротивление контактов  $\text{AgCdO}$ .

Устойчивость (или, скорее, неустойчивость) контактов  $AgCdO$  к образованию сульфидов аналогична чистому серебру, но переходное сопротивление контактов получается выше, чем у чистого серебра.

На рис. 38 показана область применения контактов  $AgCdO$ , которые:

- являются типичными мощными контактами реле;
- подходят для коммутации средних и больших нагрузок;
- имеют высокую износостойкость;
- способны коммутировать лампы накаливания, емкостные и индуктивные нагрузки.

### Серебро-никель $AgNi10$

Это материал сравнительно новый, он призван заменить в реле средней и большой мощности небезопасный для окружающей среды сплав  $AgCdO$ . По сравнению с  $AgNi0.15$  сплав  $AgNi10$  более износостоек и менее склонен к оплавлению и сварке контактов при коммутации индуктивных нагрузок. Переходное сопротивление выше, чем у  $AgNi0.15$ , область применения (рис. 39) мало отличается от  $AgCdO$ .



Сплав  $AgCdO$  хорошо подходит для коммутации больших токов и индуктивных нагрузок  
Рисунок 38



Сплав серебро-никель: экологически чистая замена для сплава  $AgCdO$   
Рисунок 39

В целом контакты из AgNi10:

- являются универсальными;
- обладают более высоким переходным сопротивлением, чем чисто серебряные;
- имеют высокую износостойкость;
- способны коммутировать лампы накаливания, емкостные и индуктивные нагрузки.

## Серебро-окись олова AgSnO

Электрические характеристики контактов AgSnO похожи на контакты AgCdO, но есть одно фундаментальное отличие. Сплав серебро-окись олова обладает более высокой температурой плавления, что дает особую устойчивость к повреждению и сварке контактов при коммутации сильноточных и индуктивных нагрузок.

Электроэрозия контактов AgSnO протекает медленнее, что обуславливает очень высокий электрический ресурс при коммутации электродвигателей, соленоидов, ламп накаливания и других сильноточных и индуктивных нагрузок, а также мощных нагрузок на постоянном токе

На рис.40 показана область применения контактов из сплава AgSnO, которые:

- способны коммутировать лампы накаливания, емкостные и индуктивные нагрузки;
- могут применяться для коммутации высоковольтных нагрузок на постоянном токе;
- обладают более высокой температурой плавления, чем контакты AgCdO;
- обладают высокой устойчивостью к электроэрозии и спеканию.



Самые мощные контакты реле выполняются из сплава серебро-окись олова  
Рисунок 40

## Другие материалы для контактов реле

Из всего многообразия контактов для современных реле параметры некоторых и наиболее распространенных помещены в таблицу.

МАТЕРИАЛ КОНТАКТА	ТИПИЧНЫЕ СВОЙСТВА	ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	НАПРЯЖЕНИЕ И ТОК КОММУТАЦИИ
<b>Au</b> чистое золото	+ исключительная устойчивость к коррозии, стабильное сопротивление контакта - склонность к холодной сварке контактов	в чистом виде применяется редко; основное назначение - сохранное и сигнальное золочение мощных контактов при толщине покрытия 2...3 мкм	мкВ ... 50 В 10 мкА ... 100 мА
<b>AuNi1</b> <b>AuCo1</b> твердое золото	+ исключительная устойчивость к коррозии, стабильное сопротивление контакта - очень малые нагрузки	коммутация микротоковых цепей, возможность работы в загрязненной сульфидами атмосфере	мкВ ... 50 В 10 мкА ... 100 мА
<b>AuAg10</b> серебро - золото	+ исключительно малое сопротивление контакта	коммутация микротоковых цепей, измерительная техника	мкВ ... 50 В 10 мкА ... 100 мА
<b>AuNi5</b> золото - никель	+ нет миграции материала в широком диапазоне нагрузок, малое переходное сопротивление, высокая износостойкость, слабая устойчивость к электрической дуге, невозможность коммутации микротоков, высокая стоимость	малые уровни мощности, измерительная техника, промышленная автоматика	0,1 В ... 50 В 1 мА ... 300 мА
<b>AgPd3</b> серебро - палладий	+ устойчивость к окислению выше, чем у серебра, высокая прочность и износостойкость, стабильное сопротивление контакта - высокая стоимость	сигнальные цепи и средние уровни мощности	> 1 В 1 мА ... 1 А
<b>W</b> вольфрам	+ высокая стойкость к оплавлению и сварке, износостойкость, малая миграция материала контактов - только для нагрузок на ток менее 5 А, высокое переходное сопротивление контакта	коммутация ламп накаливания, индуктивных нагрузок; упреждающий силовой контакт в двухконтактных группах реле	> 60 В 1...5 А

## **Примечание о военных реле и их контактах**

Широко распространено мнение, что в военных реле устанавливаются некие сверхнадежные и универсальные контакты, а сама конструкция реле рассчитана на исключительно длительный срок службы.

Военные изделия занимают в настоящее время менее 0,1% от общего объема рынка электромагнитных реле и по экономическим соображениям разработка каких-то специальных технологий для военных реле уже много лет фактически не проводится.

Контакты в реле специального назначения применяются точно такие же, как и в обычных «коммерческих» реле, хотя в «военных» реле шире распространены толстые золотые покрытия и даже контакты из массивного золота и палладия. Это приводит к удорожанию реле, иногда в десятки раз по сравнению с коммерческими аналогами. Для защиты военных реле применяются герметичные (IP68) металлические корпуса со стеклянными проходными изоляторами для выводов, а для обеспечения более высокой вибростойкости катушки таких реле обычно делаются в 2...5 раз мощнее коммерческих реле. Мощные катушки при работе перегреваются и в паспортах на военные реле всегда можно найти параметр «предельное время нахождения катушки под током», что обусловлено интенсивным старением реле при высокой температуре.

Коммутационный ресурс вибростойких военных реле до 10...100 раз меньше, чем у коммерческого исполнения вследствие более интенсивного износа механизма и контактов от ударов мощными электромагнитами катушек. Обычно военные реле проходят на заводе 100% тестирование и выпускаются для расширенного температурного диапазона -55...+125 °С.

В общем, военные реле приспособлены для работы в дорогостоящей аппаратуре при больших вибрациях, перепадах температуры и давления или рассчитаны на очень длительное хранение (до десятков лет) перед началом эксплуатации. Других преимуществ у военных реле перед коммерческими нет.

## КОНТАКТЫ С ПОКРЫТИЯМИ

Покрyтия применяются для комбинирования свойств различных металлов и сплавов и расширения области применения контактов.

### Золотое покрытие контактов

Применяется для обеспечения коммутации сигнальных и микротоковых цепей, а также для защиты поверхности контакта от коррозии. Золото обладает предельной химической инертностью, но мягкость и пластичность золота приводит к малой износостойкости контактов. Низкая температура плавления вызывает эффект холодной сварки контактов, золотые контакты даже склонны к свариванию при ультразвуковой очистке печатных плат после пайки. Именно поэтому чистое золото крайне редко применяется в контактах реле, но золотые покрытия распространены повсеместно. При покрытии слоем золота толщиной 3...5 мкм мощные контакты реле приобретают все свойства сигнальных контактов.

На рис. 41 представлены предельные токи и напряжения коммутации для контактов с золочением, а рис. 42 показывает, что электрический ресурс таких контактов стремительно падает при коммутации больших токов и высоких напряжений вследствие повреждения золотого покрытия.



Контакты с золочением подходят только для коммутации сигнальных цепей  
Рисунок 41

## Сохранное золочение контактов

Золотое покрытие толщиной 0,1...0,3 мкм наносят на мощные контакты реле для предохранения от оксидирования в процессе хранения. Сохранное золочение неустойчиво к механическому износу и быстро разрушается даже при коммутации сигнальных цепей.

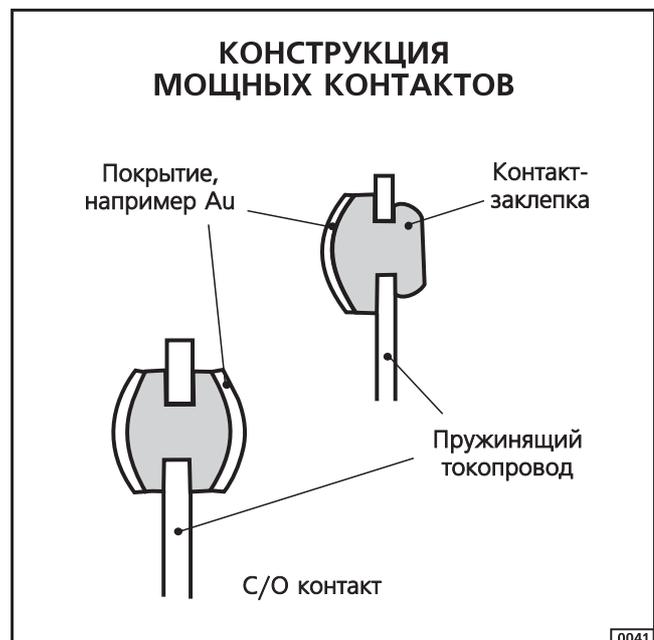
## Конструкция контактных групп

Контакты мощных реле обычно изготовлены в виде заклепок, установленных на пружинный токопровод. Заклепки выполняются из массивного материала, но встречаются и контакты с толстой подложкой меди для экономии серебра. На рис. 43 показана типовая конструкция двустороннего (переключающего) и одностороннего контактов. На поверхности контакта может быть нанесено многослойное покрытие для защиты контакта от коррозии или придания ему необходимых свойств для коммутации слабых сигналов.

При разработке контактов конструкторы реле придают поверхности контакта форму, создающую максимальную площадь контактирования. Хорошие контакты всегда отполированы и



При коммутации больших токов или высоких напряжений золочение выгорает и ресурс контактов стремительно падает  
Рисунок 42



Мощные контакты всегда выполняются в виде заклепок, иногда с многослойным покрытием для универсальности  
Рисунок 43

имеют надежное механическое сцепление с пружиной или токоподводом. Габариты (диаметр и толщина) контактов сильно зависят от рабочего тока, потому что при нагреве контакт должен эффективно отводить тепло на пружину. Пружины и токопроводы обычно выполняются из бронзовых сплавов, обладающих низким электрическим сопротивлением и относительно высокой теплопроводностью.

## Классификация контактов реле

Контакты реле характеризуются:

- контактными группами;
- функцией контактов;
- типом контакта.

**Контактная группа** - это набор из контактов, гальванически развязанный от остальных контактных групп. В мощных реле бывает от 1 до 4 (реже до 6 или 8) контактных групп.

**Функция контакта** - это его физическая конфигурация. Все контакты бывают:

- нормально разомкнутыми (NO, Normally Open), находящимися в разомкнутом состоянии при отсутствии тока в катушке реле;
- нормально замкнутыми (NC, Normally Closed), находящимися в замкнутом состоянии при отсутствии тока в катушке реле;
- переключающими (C/O, Change-Over), включающими в себя одну группу NO и одну группу NC контактов.

## Сравнительное качество NO и NC контактов реле

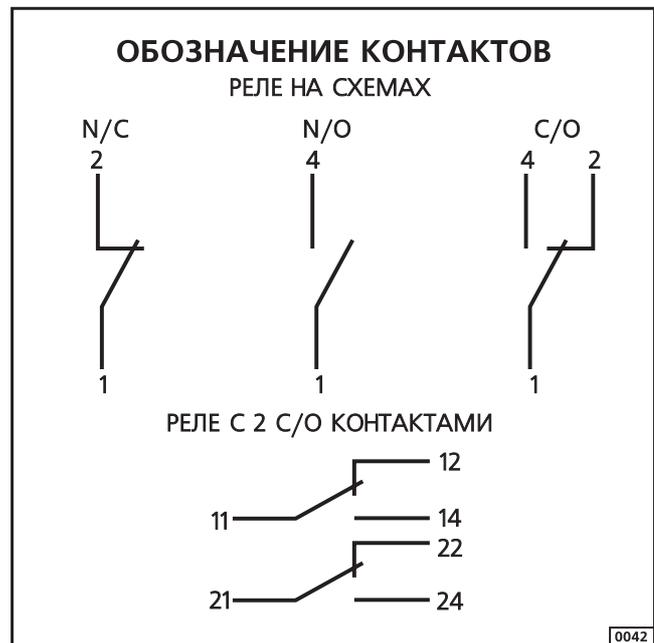
Сила прижима для NC контактов определяется усилием, создаваемым пружинами контактов. Для контакта NO прижим создается электромагнитом катушки реле и это усилие всегда больше, чем усилие пружины для NC контакта (в противном случае электромагнит не сможет переключить контакт).

Вследствие этого вибростойкость, ударостойкость, переходное сопротивление и коммутируемая мощность для NO контакта всегда лучше, чем для NC контакта. Инженеру при проектировании ответственного оборудования необходимо об этом помнить.

## Обозначение контактов реле на схемах

На схемах и на корпусах реле можно найти американские и английские обозначения для контактов следующего вида:

- SPST - single pole, single throw: нормально замкнутый (SPST-NC или A form contact) или нормально разомкнутый (SPST-NO или B form contact) контакт;
- SPDT - single pole, double throw: переключающий контакт (SPDT-C/O или C-form contact).



Стандартизованная маркировка контактов на современных схемах  
Рисунок 44

Этих обозначений также придерживаются производители реле из Японии и Юго-Восточной Азии.

По стандарту DIN EN 50005 маркировка контактов производится следующим образом:

- нормально замкнутый контакт: «2»;
- нормально разомкнутый контакт: «4»;
- переключающий контакт: «1».

В реле с несколькими контактными группами обозначения в группах производятся так:

- группа 1: 12, 14, 11;
- группа 2: 22, 24, 21 и так далее (см. рис. 44).

Традиционно выводы катушки реле обозначаются А1, А2 и так далее при количестве выводов катушки более двух. В американской литературе можно встретить обозначения выводов катушек «coil 1», «coil 2».

## Тип контакта

Контакты выпускаются одиночные или сдвоенные (TWIN), как это показывает рис. 45. Одиночные контакты типичны для мощных реле, контакты TWIN разрабатывались только для сигнальных реле. При одинаковой площади контакты TWIN коммутируют примерно в 4 раза меньшую мощность, чем одиночные контакты. Причина проста: неодновременное замыкание обоих контактов TWIN приводит к токовым перегрузкам каждого из одиночных контактов и интенсивному старению. Большим преимуществом TWIN-контактов является уменьшение времени дребезга, связанное с тем, что оба контакта TWIN «дребезжат по-своему», а в целом время включения реле с контактами TWIN намного меньше, чем у реле с одиночными контактами.



Мощные контакты всегда одиночные, а для сигнальных цепей лучше подходят контакты типа TWIN  
Рисунок 45

## Безопасные контакты и безопасные реле

Существует особый класс реле, созданных для работы в системах промышленной автоматики и сигнализации. Так как эти реле позволяют строить абсолютно отказоустойчивые узлы автоматики, их называют безопасными реле (safety relay).

В обычных электромагнитных реле каждый контакт независим от остальных, и если один из контактов залипает (сваривается), то остальные контактные группы продолжают работать. На заре автоматики в 20-е годы появилась потребность в реле, способных к определению отказов подобного рода: заказчиком была железная дорога и машиностроение с опасными станками. Тогда и были разработаны первые безопасные реле, позволяющие строить автоматические устройства, переходящие в выключенное состояние после отказа реле или датчиков положения механизмов.

В безопасных реле все контакты принудительно связаны между собой общим толкателем. При залипании одного из контактов толкатель остается в «активном» положении при отключении катушки реле. Таким образом можно определить целостность всех контактов и работоспособность реле. На основе одного-двух безопасных реле до сих пор строятся простые, но надежные автоматы, полностью обходящиеся без электроники и самостоятельно определяющие появление отказа.

Контакты в безопасных реле применяются точно такие же, как в мощных реле - одинарные, обычно из  $\text{AgCdO}$ , часто с золотым покрытием толщиной 3...5 мкм. Обычно для безопасных реле мощность катушки увеличивают на 30...50% и зазор между контактами выполняют более 0,5 мм.

## **Надежность контактов и ресурс реле**

В мощных реле контакты остаются самым ненадежным элементом.

Надежность является способностью изделия выполнять заложенные при конструировании и производстве полезные функции в течение определенного периода времени при постоянном воздействии мешающих факторов. Надежность реле полностью описывается электрическим и механическим ресурсами, отражающими качество изготовления исполнительного механизма и контактов реле.

Итак, надежность реле можно описать количеством безошибочных коммутаций при заданных токе, напряжении и характере нагрузки контактов. Под безошибочной коммутацией понимается полное соответствие операции поданной команде («включить-выключить»). Ошибка при выполнении команды

(например, не срабатывание контактов при включении или ложное замыкание/размыкание контактов между включениями) позволяет ввести показатель надежности как среднее количество циклов наработки на отказ.

Инженерная теория надежности оперирует с частичными отказами (не приводящими к полной потере функций) и полными отказами (после которых невозможно функционирование устройства без ремонта). Ошибка при коммутации является частичным отказом реле, а, например, обрыв катушки - полным отказом.

**У мощных реле надежность определяется в основном:**

- надежностью работы контактов;
- надежностью работы механизма реле при высоких температурах.

При расчете и измерении параметров надежности реле разработчики обязательно руководствуются определенными условиями окружающей среды (температура, влажность, давление) и характером нагрузки (активная, индуктивная, лампы накаливания). Основные причины отказа контактов реле сведены в таблицу.

ПРИЧИНЫ ОТКАЗА КОНТАКТОВ		
электрическая дуга	химические реакции на поверхности	механические загрязнения поверхности
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ сваривание контактов</li> <li>■ эрозия контактов</li> <li>■ перенос материала контактов</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ неорганические слои (оксиды, сульфиды)</li> <li>■ органические слои (масла, пары органических веществ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ абразивная пыль</li> <li>■ пыль от пластика корпуса и механизма реле</li> </ul>
разрушение материала контактов	повышение переходного сопротивления	нестабильность работы контактов и снижение надежности

Таблица показывает не только причины отказов контактов, но и показывает пути повышения надежности реле.

**Пример:** реле в корпусе со степенью защиты IP40 (защита от крупных частиц пыли) должно надежно работать в загрязненной сульфидными атмосфере. Помещение электронного блока в защитный корпус со степенью защиты IP54 уменьшает газообмен с

контактами реле на два порядка и примерно на порядок повышает надежность работы реле. Применение реле в корпусе IP67 снимает проблему полностью даже без применения дополнительного защитного корпуса для всего электронного блока.

## Численные параметры надежности контактов

Разработчику важно знать численные параметры, на основании которых можно прогнозировать надежность будущего изделия. На практике пользуются лямбда-характеристикой, показанной на рис. 46 (название происходит от некоторого сходства начальной части графика с греческой буквой «лямбда»). В американской литературе эту характеристику часто называют «характеристикой ванны» (bath-tub curve) из-за схожести этого графика на поперечное сечение ванны. Характеристика строится на основании статистического анализа надежности большой партии реле (обычно для наблюдения выбирается 1000 штук однотипных реле из разных партий).



Надежность реле в основном определяется надежностью контактов

Рисунок 46

На графике можно выделить три участка:

- **Фаза 1**, начальный период эксплуатации, ранние отказы: характеризует отказы из-за явного производственного брака, дефектов материалов и деталей реле. Отказы проявляются, начиная с первого включения реле, но частота и вероятность отказов падают с увеличением времени работы реле;
- **Фаза 2**, установившийся режим надежности. Здесь отказы обусловлены только случайными и непрогно-зируемыми процессами отказа различных узлов реле. Частота и вероятность отказов практически

постоянны и позволяют сделать точное прогнозирование надежности на длительный период времени (доходящий до нескольких лет);

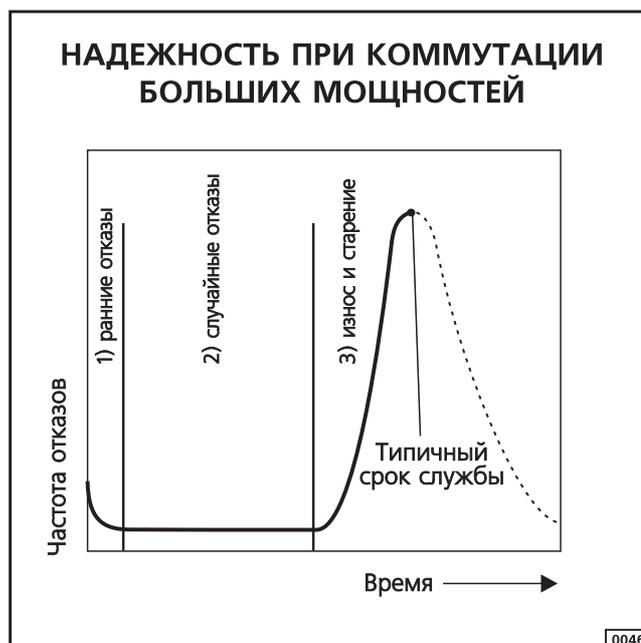
- **Фаза 3**, физическое старение и износ реле. Частота отказов непрерывно и монотонно растет со временем, прогнозирование надежности опирается только на знание процессов старения конструктивных материалов реле. На этой фазе прогнозировать надежность реле можно лишь обладая большим практическим опытом эксплуатации реле конкретного типа. Начало Фазы 3 в мощных реле характеризует окончание гарантированного электрического ресурса. Момент наступления Фазы 3 должен быть приурочен к регламентным работам, замене отработавших срок службы реле или как минимум их профилактической проверке.

Для маломощных реле с ресурсом в 50...100 миллионов коммутаций иногда пользуются графиком рис. 47, на котором отсутствует Фаза 3. При правильно выбранной нагрузке контактов реле и высоком механическом ресурсе наступление Фазы 3 может быть отодвинуто на 20-30 лет, когда оборудование устареет морально и будет заменено вместе



Если при коммутации малых мощностей исключить ранние отказы, то срок службы реле определяется только износом механических частей

Рисунок 47



Электрический и механический износ мощных контактов определяет срок службы мощных реле

Рисунок 48

с установленным в нем реле. Для мощных реле с предельным током нагрузки и частотой коммутации пользуются графиком рис. 48, потому что начального нестабильного периода работы контактов легко избежать путем проведения предварительного тестирования реле.

## Предварительное тестирование и повышение надежности реле

Повысить надежность работы готового устройства можно путем проведения несложных организационно-технических мер, называемых тестированием. В этом случае каждое реле перед установкой в оборудование проходит комплексное испытание, в процессе которого отбираются заведомо бракованные реле и реле с нестабильностью электрического контакта. Тренировка реле на протяжении примерно 100...200 циклов под номинальной нагрузкой выявляет 99% всех реле с «врожденными» производственными дефектами и позволяет при расчете надежности сразу оперировать данными, относящимися к Фазе 2.

*Простейшее тестирование дает возможность в 100 раз уменьшить вероятность отказа реле в начальный период работы.*

Расширенное дорогостоящее тестирование, например, с обработкой реле на вибростенде или с температурной тренировкой, дают возможность выявить до 99,9% дефектных и «подозрительных» реле. Успешно прошедшие курс таких испытаний реле можно применять в самых ответственных случаях.

Заметим, что тестирование не повышает надежности самих реле, но дает возможность выбрать из



Отбор и предварительное тестирование реле в сотни раз повышают отказоустойчивость оборудования  
Рисунок 49

партии наиболее надежные экземпляры. На рис. 49 показано, как тестирование позволяет при анализе надежности избежать отказов оборудования в Фазе 1.

В коммерческой электротехнике и электронике тестирование обычно сводится только к проверке функциональной работоспособности реле, что стоит совсем недорого (не более 1...2% от заводской цены реле).

## Надежность контактов реле

При необходимости повышения надежности реле и увеличения электрического ресурса мощных реле можно:

- при средних нагрузках: применить реле с контактами TWIN;
- снизить максимальную токовую нагрузку контактов до 60% от номинального значения и менее (это повышает электрический ресурс в 2 раза и более);
- правильно рассчитать и установить искрогасящие цепи (это увеличивает электрический ресурс до 10...100 раз);
- поместить узлы с негерметичными реле в защитный корпус;
- применить периодическое тестирование реле в процессе эксплуатации (регламентные работы);
- провести тестирование реле перед установкой в оборудование.

Других мер по повышению надежности контактов мощных реле просто нет, и разработчик при проектировании должен внимательно рассчитать прогнозируемую надежность. К сожалению, такие параметры надежности, как лямбда-характеристика или среднее время наработки на отказ, обычно не публикуются в открытой печати и являются для инженеров недоступными. Среднее время наработки на отказ (MTBF, middle time between failures) можно рассчитать, зная величину электрического ресурса реле и частоту срабатывания реле в разрабатываемом устройстве. Так, при электрическом ресурсе 100000 операций и при работе реле в устройстве с частотой переключений 2 коммутации в час можно предположить MTBF на уровне  $100000 / 2 = 50000$  часов, то есть около 6 лет. Это значение очень хорошо согласуется с практикой, но при получении расчетного MTBF более 100000 часов необходимо относиться

к таким данным очень осторожно: старение современных пластиков при эксплуатации более 20 лет изучено недостаточно хорошо и вносит в расчеты большую погрешность.

Приведенный выше ориентировочный расчет MTBF с праведлив только для высококачественных реле с механическим ресурсом свыше 10 миллионов операций.

На рис. 50 показана диаграмма Вейбулла, характеризующая вероятность отказа реле к общему количеству работающих реле. Обычно конечным сроком жизни реле считается вероятность отказа 10% от всех работающих реле (это соответствует  $V_{10}$ ), но для некоторых случаев пользуются параметром  $V_{50}$ . Диаграмма Вейбулла применяется для прогнозирования надежности, но найти эту диаграмму в каталогах мощных реле практически невозможно (хотя у производителей реле она всегда есть).



Срок жизни мощного реле можно определять на основе нескольких критериев надежности  
Рисунок 50

Для применения реле в дорогих проектах диаграмму Вейбулла можно построить самостоятельно, протестировав партию из сотни и более штук реле, что обычно и делают некоторые инженеры, планируя выпуск оборудования, которое должно бесперебойно и безотказно работать многие годы.

## Процесс электрического старения контактов реле

При коммутации мощных нагрузок контакты реле постепенно стареют и происходит:

- механический износ как следствие ударов и трения контактов друг о друга;

- электрическая эрозия контактов как следствие дуги и искрения;
- перенос металла с одного контакта на другой при работе на постоянном токе высокого напряжения;
- сваривание или частичное сваривание контактов;
- ухудшение пружинящих свойств контактов из-за перегрева материала пружины;
- загрязнение контактов пылью и парами из окружающей среды;
- повышение переходного сопротивления контактов;
- снижение сопротивления изоляции вследствие испарения металла контактов и осаждения на изолирующие детали механизма реле.

Все эти явления неизбежны и ведут к старению реле в целом. Полностью предотвратить любой из этих процессов невозможно, но старение можно учесть и своевременно заменять изношенные реле, не дожидаясь появления полного отказа оборудования.

### Ресурс реле и степень загрузки контактов по мощности

В каталогах для облегчения расчетов надежности приводятся специальные характеристики, например, зависимость электрического ресурса от мощности коммутации (рис. 51). Согласно этому графику, очень типичному для промышленного реле с контактами на номинальный ток 10 А, можно без труда повысить электрический ресурс со 100 тысяч коммутаций при мощности 2,2 kVA (то есть при токе 10 А) до 1 миллиона коммутаций при токе 3 А (речь идет о работе с напряжением на нагрузке 220 VAC). Для хороших мощных реле в каталоге можно найти график, подобный



При снижении мощности коммутации растет электрический ресурс реле: этим пользуются для повышения надежности работы реле  
Рисунок 51

рис. 52, показывающий зависимость коммутируемой мощности от «косинуса фи», то есть разности фаз между током и напряжением в цепи нагрузки.

Для цепей постоянного тока аналогичные характеристики сложнее, потому что влияние электрической дуги резко снижает допустимый ток контактов при повышении напряжения источника постоянного тока.

## Проблемы в мощных герметичных реле

Герметичность корпуса реле иногда может вызывать проблемы. При возникновении электрической дуги происходит разложение молекул кислорода и образование озона. Озон является намного более сильным окислителем, чем кислород, и при повышенной температуре озон начинает активно взаимодействовать с пластмассовыми деталями корпуса реле. Озон вызывает ускоренное старение пластиков и образует корродирующие соединения с газами, выделяющимися из пластиков. Эти неприятные процессы приводят к преждевременному старению и износу контактов и механизма реле. В миниатюрных мощных реле иногда имеются выступы-клапаны на корпусе, которые необходимо удалять для вентиляции реле при работе с предельными токами нагрузки при высокой частоте коммутаций. При такой вентиляции начинается, к сожалению, взаимодействие окружающей атмосферы с контактами реле со всеми рассмотренными выше последствиями.

Разработчики реле обычно не дают в каталогах определения порога мощности и частоты переключений, до которого герметичные реле можно не вентилировать и клапан не удалять. Опытные практики утверждают, что герметичное мощное реле можно не вентилировать, пока ток коммутации не превышает 80% от паспортного значения при низкой частоте коммутации.



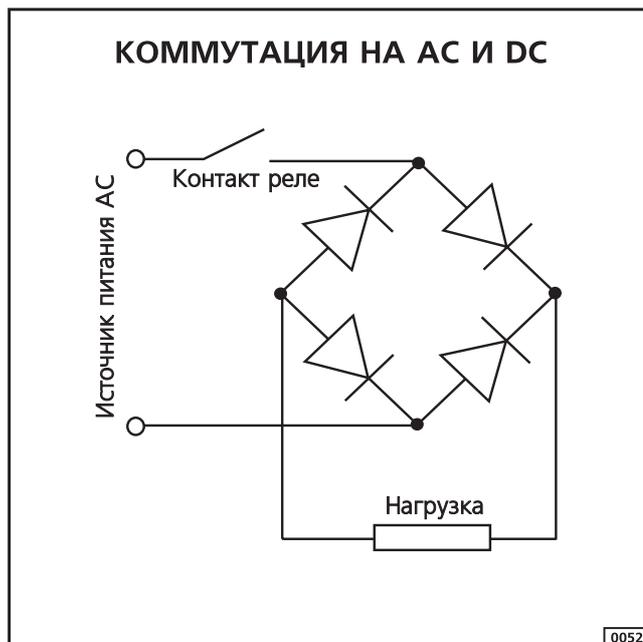
Индуктивные нагрузки сильно влияют на электрический ресурс мощных реле  
Рисунок 52

Этот совет справедлив не всегда, поэтому при эксплуатации мощного реле при предельных токах контактов и желании оставить корпус реле герметичным желательно проконсультироваться с производителем реле.

## НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МОЩНЫХ РЕЛЕ

### Коммутация AC/DC

При наличии выбора точки коммутации в выпрямительных схемах, подобных показанной на рис. 53, всегда следует останавливать выбор на коммутации переменного тока. При коммутации переменного тока высокого напряжения (более 30 В) контакты реле будут служить дольше и способны коммутировать более мощные нагрузки, чем при коммутации постоянного выпрямленного тока.



Контактами реле предпочтительнее коммутировать переменный ток, а не постоянный. Такая возможность бывает не часто, но встречается  
Рисунок 53

### Переключение полярности

Этот режим работы реле необходим для изменения направления вращения электродвигателей постоянного тока. На рис. 54 показано, как при переключении полярности дуга создает короткое замыкание между полюсами биполярного источника питания. Это явление помимо разрушения контактов реле может привести к повреждению источника питания, поэтому на практике для реверсирования электродвигателей применяют более

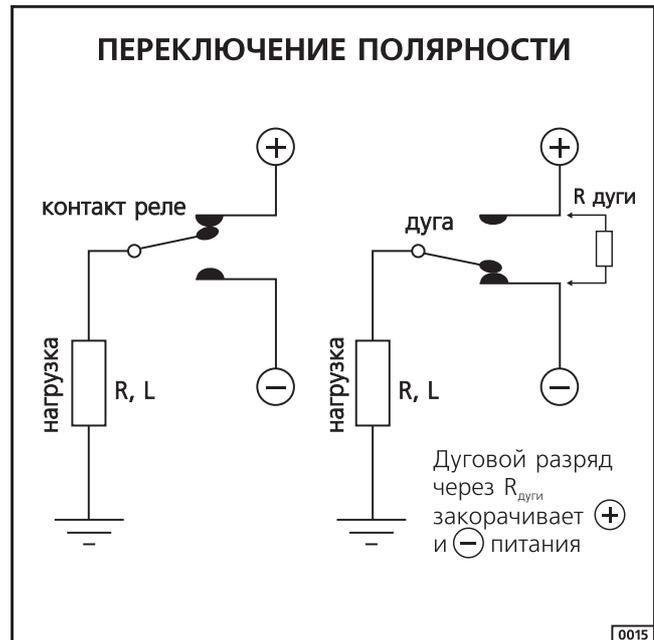
сложную конструкцию, показанную на рис. 55. Эта схема требует более дорогих реле с 4 переключающими группами контактов, но качество работы полностью окупает все затраты на реле.

При отсутствии подходящего реле на 4 С/О можно взять для схемы два реле с 2 С/О контактами или даже 4 реле с одним С/О контактом каждое (так часто делают в автомобильной электронике).

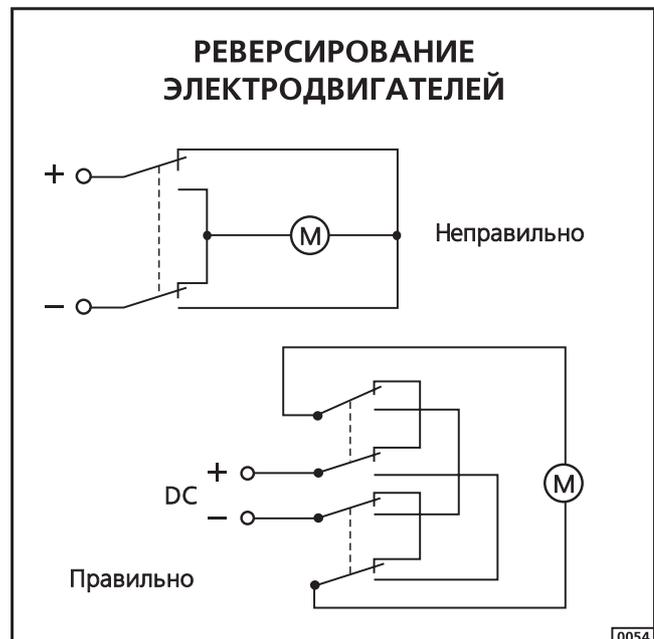
## Многополюсное реле коммутирует различные нагрузки

На рис. 56 показано правильное и неправильное построение схем, где различные контакты одного реле коммутируют различные нагрузки. «Правильность» схемы основана на необходимости сохранения высокого напряжения изоляции между соседними полюсами реле. В принципе, «неправильная схема» тоже работоспособна, но может привести к проблемам при коммутации мощных или высоковольтных нагрузок.

Другая задача: одно реле коммутирует различными контактными группами сигнальную и мощную цепи. Такое построение схемы нежелательно, потому что в реле есть паразитная конструктивная емкость между контактными группами. При



При переключении полярности следует учитывать возможность закорачивания источников питания электрической дугой  
Рисунок 54



Реверсирование электродвигателей следует выполнять по специальным схемам, устраняющим паразитные связи при переключении  
Рисунок 55

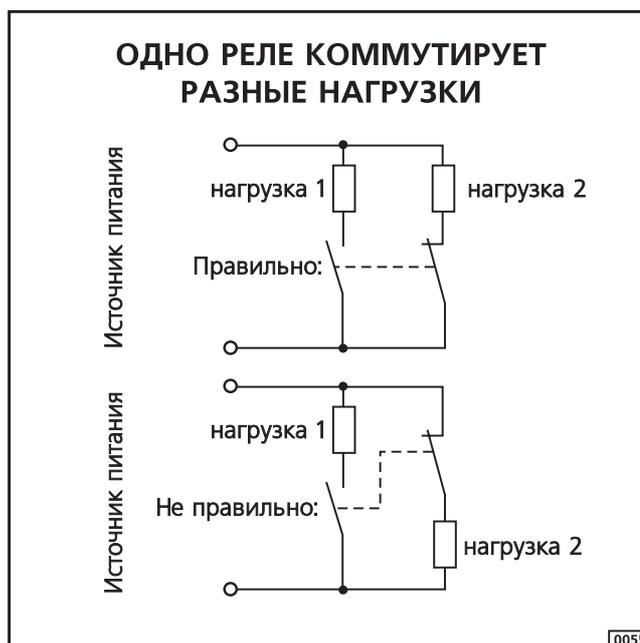
наличии импульсных всплесков напряжений на мощной нагрузке емкостная связь вызывает наводки на сигнальные цепи. По крайней мере, при необходимости работы таких схем необходимо внимательно проверить величину конструктивной емкости между контактами, шунтировать «мощные» контакты реле искрогасящими цепями и защитить входы сигнальных устройств.

### Коммутация трехфазных нагрузок и класс защиты

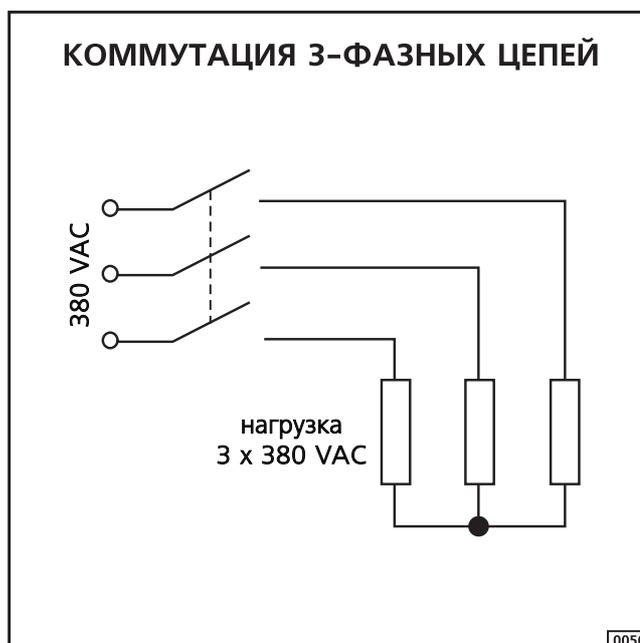
При коммутации нагрузок в схемах, подобных рис. 57, необходимо выбирать реле, способные работать с напряжением на контактах 380 VAC и иметь категорию изоляции не менее B400.

Категория изоляции приводится в каталогах и обозначает следующее:

- **В:** способность работать при небольших загрязнениях корпуса и выводов реле;
- **С:** работоспособность и сохранение всех качественных характеристик при высокой степени загрязненности корпуса и выводов реле.



Релейные схемы несложны, но требуют определенного внимания при проектировании  
Рисунок 56



Коммутация трехфазных цепей сопряжена с высокими напряжениями и требует класса защиты не менее B400  
Рисунок 57

Число при буквах В и С обозначает у конкретного реле максимальное напряжение коммутации для данной категории изоляции. Часто в каталогах можно найти такую смешанную категорию изоляции, как В400/С250 V, что означает зависимость максимального коммутируемого напряжения от степени загрязненности корпуса и выводов реле. Влияние загрязнений на максимальное напряжение коммутации не должно быть оставлено разработчиком без внимания, особенно при проектировании оборудования для «сложных» сред эксплуатации, например, железной дороги и транспортной техники.

## **Параллельное соединение контактов реле**

Такое соединение имеет практический смысл только при нагрузке контактов менее величины номинального рабочего тока - при этом за счет введения параллельной ветви коммутации действительно повышается надежность. При попытке увеличить рабочий ток реле путем параллельного включения контактов ничего, кроме снижения надежности, не происходит. Неодновременность срабатывания и индивидуальное поведение контактов при дребезге не дает возможности повышать мощность коммутации за счет распределения тока на два и более контактов.

## **Синхронизация включения выключения реле с сетью**

Переходных процессов при коммутации на переменном токе можно избежать при:

- включении контактами реле емкостной нагрузки или лампы накаливания в «нуле» напряжения источника питания;
- отключении контактами реле индуктивной нагрузки в «нуле» рабочего тока.

Современная электроника с легкостью решает такие задачи синхронизации путем применения датчиков, детекторов нуля и простых логических схем синхронизации включения/выключения реле. При проектировании интерфейсных схем между промышленными контроллерами и исполнительными устройствами это обстоятельство желательно учесть, тем более, что производительность

современных контроллеров вполне достаточна для решения такой дополнительной задачи, как учет времени включения и выключения реле при синхронизации всех процессов.

## **Электрическая очистка контактов**

Об «электрическом смазывании» контактов реле уже говорилось выше, а для более надежного усвоения этого материала скажем, что при работе негерметичных реле в агрессивных средах совершенно необходима электрическая очистка контактов путем подключения дополнительной нагрузки. Там, где только возможно, в схемах промышленной автоматики следует применять дискретные сигналы с напряжением логической «1» не менее 24 вольт. Даже при коммутируемом токе на уровне 5 мА (типично для оптронов и светодиодных индикаторов) такой сигнал уже приводит в действие электрическую очистку контактов реле.

## **Защита контактов реле**

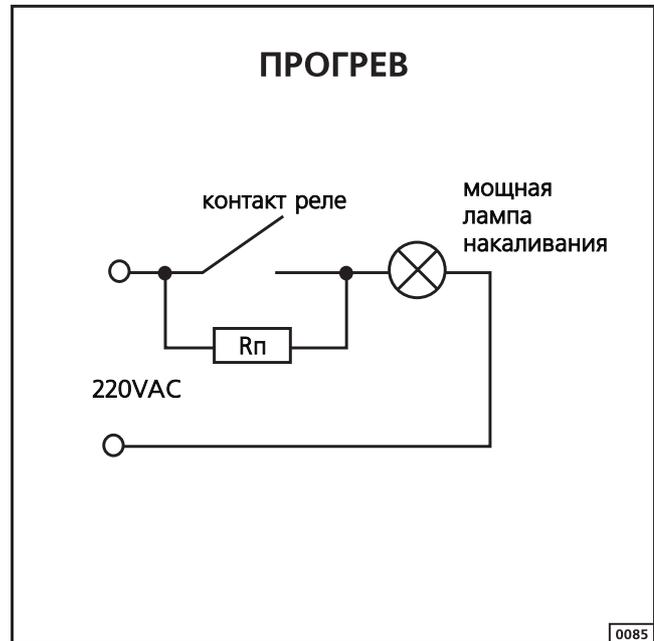
При коммутации индуктивных нагрузок всегда следует защищать контакты реле искрогасящими цепями. Расчет таких цепей несложен, цена RC-цепочки низкая, а ресурс работы контактов удастся повысить минимум в два-три раза, а иногда и на порядок.

Пренебрежение искрогасящими цепями нельзя оправдать ни экономическими факторами, ни проблемами недостатка места в оборудовании, ни даже личным недоверием инженеров к этому способу защиты контактов. Недоверие такого рода вызвано обычно недостатком опыта эксплуатации релейной техники.

## Прогрев ламп накаливания перед включением

Лампы накаливания - сложная нагрузка для контактов, особенно при частой коммутации ламп, например, в рекламных иллюминациях или шоу-светотехнике. Простейшая схема рис. 58 позволяет «подогреть» через дополнительный резистор  $R_n$  нити накаливания лампочек в промежутках между включениями. Нагрев нити накаливания примерно до 300 °С оставляет лампу «темной», но снижает при включении бросок тока через контакты реле в три раза.

Коммутация с подогревом нити удлиняет срок жизни не только реле, но и лампы накаливания, так что дополнительным расходом электроэнергии на подогрев можно пренебречь. Резистор  $R_n$  должен быть подобран так, чтобы напряжение на лампе накаливания в выключенном состоянии было равно примерно 10% от номинального (сильно зависит от конкретной конструкции лампы).



Прогрев нити лампы накаливания в десятки раз повышает ресурс контактов реле  
Рисунок 58

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДБОРУ РЕЛЕ С ТРЕБУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ КОНТАКТОВ

При выборе реле разработчик ориентируется на требуемые напряжение, ток и мощность коммутации, характер нагрузки, возможность кратковременной перегрузки и другие параметры, необходимые для надежной работы как реле,

так и всего разрабатываемого устройства. Сократить время проектирования и упростить подбор контактов поможет таблица, позволяющая оценить возможности конкретного реле на соответствие требованиям разработчика.

ТРЕБУЕМЫЙ ПАРАМЕТР КОНТАКТОВ РЕЛЕ	РАБОЧАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	ВЫБОР	ПРОВЕРКА
КОНФИГУРАЦИЯ КОНТАКТОВ	количество независимых контактных групп	✓	
	функция контактов: NO, NC, C/O		
	тип контактов: одинарный или TWIN		
НАГРУЗКА КОНТАКТОВ	переменный или постоянный ток?		✓
	напряжение на нагрузке		
	ток нагрузки		
	характер нагрузки (активная, индуктивная, емкостная)		
	возможность кратковременной перегрузки по току		
	различная нагрузка для контактных групп в одном реле		
КОММУТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ	рабочий ток контактов	✓	✓
	материал контактов		✓
	сопротивление контактов		✓
	максимальное напряжение на контактах		✓
	мощность коммутации		✓
	ток при замыкании нормально разомкнутого контакта	✓	✓
	ток при размыкании нормально замкнутого контакта		✓
	максимальный ток коммутации индуктивных нагрузок		✓
	электрический ресурс для планируемой нагрузки и мощности	✓	✓
напряжение изоляции между контактными группами		✓	

# МАГНИТНАЯ СИСТЕМА РЕЛЕ

## НАЗНАЧЕНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Все операции, производимые магнитной системой, сводятся к следующему:

- электромагнит, являющийся «сердцем» магнитной системы реле, приводит в действие толкатель.
- толкатель передает усилие, развиваемое электромагнитом, на контактную систему реле, что и вызывает замыкание или размыкание контактов.

По сути, магнитная система реле преобразовывает электрическую энергию в механическое усилие.

## Какие узлы и детали входят в магнитную систему

Магнитная система содержит неподвижные узлы:

- катушку;
- сердечник катушки;
- ярмо;

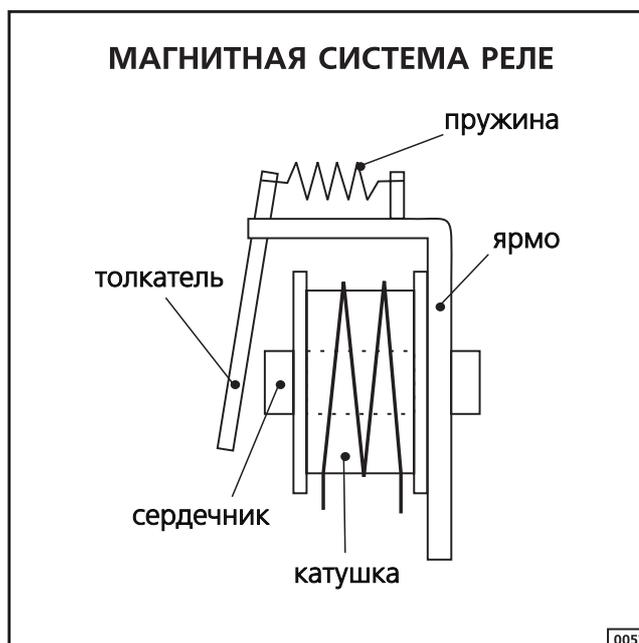
и подвижные узлы:

- толкатель;
- пружину или
- применяется пружинный контакт, совмещающий в себе пружину и контактную систему реле.

Упрощенный вариант магнитной системы и механизма реле представлен на рис.59. Конечно, этот чертеж не претендует на полноту, но дает инженеру-практику все основы для правильного понимания работы магнитной системы реле.

**Работает реле так:**

1. Реле было выключено, через катушку реле не протекал ток, пружина поддерживала якорь и толкатель в исходном состоянии.
2. К катушке подключили источник напряжения. При протекании тока через катушку магнитное поле соленоида катушки притягивает металлический толкатель (его еще называют якорем). Пружина растягивается и испытывает усилие упругой деформации.
3. Толкатель снабжен приводом, передающим механическое усилие на контакты реле. Привод давит на контакты и реле включается.
4. Источник питания отключают, реле выключается: при прекращении протекания тока через катушку реле якорь под воздействием пружины возвращается в исходное состояние.
5. Реле выключено и готово к следующему циклу работы.



Магнитная система реле одновременно содержит электрические и механические компоненты  
Рисунок 59

Конструкция магнитной системы определяется назначением реле, количеством контактных групп, рабочим током контактов. В целом все магнитные системы можно разделить всего на несколько классов, давших название также и реле:

- нейтральные реле;
- поляризованные моностабильные реле;
- бистабильные реле;
- бистабильные поляризованные реле.

## Нейтральные реле

Необходимый для включения реле магнитный поток генерируется только путем протекания тока по обмотке катушки реле. Такая магнитная система называется нейтральной, а реле носят название нейтральных или моностабильных (одностабильных).

## Поляризованные реле

Сердечник катушки или якорь обладают свойствами постоянного магнита, как и показано на рис. 60. Поле этого магнита воздействует на якорь совместно с магнитным полем, создаваемым вследствие протекания тока по катушке реле. Таким образом, поле от магнита позволяет ослабить требуемое для включения реле поле, создаваемое током в катушке. Это дает возможность:

- уменьшить габариты катушки реле, или
- повысить чувствительность реле без изменения габаритов катушки, или
- одновременно уменьшить габариты катушки и сделать катушку более чувствительной.

Подмагничивание сердечника нейтрального реле позволяет на практике повысить чувствительность реле более чем в два раза, что очень хорошо в отношении температурного режима катушки и всего реле. Обратная сторона медали: недостатком подмагничивания сердечника является более высокая стоимость и повышенная чувствительность реле к внешним магнитным полям.

К особенностям моностабильных поляризованных реле относится необходимость соблюдения правильной полярности управляющего



Добавление к магнитной системе постоянного магнита повышает чувствительность реле  
Рисунок 60

напряжения на катушке. В каталогах полярность указывается знаками «+» и «-» при выводах катушки. Если подать управляющее напряжение неправильной полярности, то реле просто не включится.

## Бистабильные реле

Как следует из названия, эти реле имеют два стабильных положения якоря. Такое поведение реле достигается:

- подмагничиванием сердечника до уровня, обеспечивающего удержание якоря при отключенном питании катушки реле;
- наличием в механизме реле деталей, обладающих свойствами механических защелок, например, храповиков или «качалок» с двумя устойчивыми положениями.

Вначале о *реле с механическими защелками*. Такие реле выпускаются и сегодня и имеют множество эксплуатационных преимуществ, среди которых следует отметить высокую устойчивость к вибрациям и внешним магнитным полям. В этих реле обычно одна или две катушки, каждая со своим якорем и приводом на общий механизм. Катушки выпускаются на переменный и постоянный ток, что дает возможность использовать эти реле в любых узлах автоматики и сигнализации. Иногда внутри прозрачных корпусов таких реле устанавливаются механические элементы индикации положения контактов (так называемые *блинкеры*) и переключатели, позволяющие вручную управлять переключением реле. Удивительно, но развитие микроэлектроники почти не повлияло на традиционные области применения механических бистабильных реле, которые можно и в XXI веке встретить в самой современной аппаратуре управления энергетическими объектами и на железнодорожном транспорте.

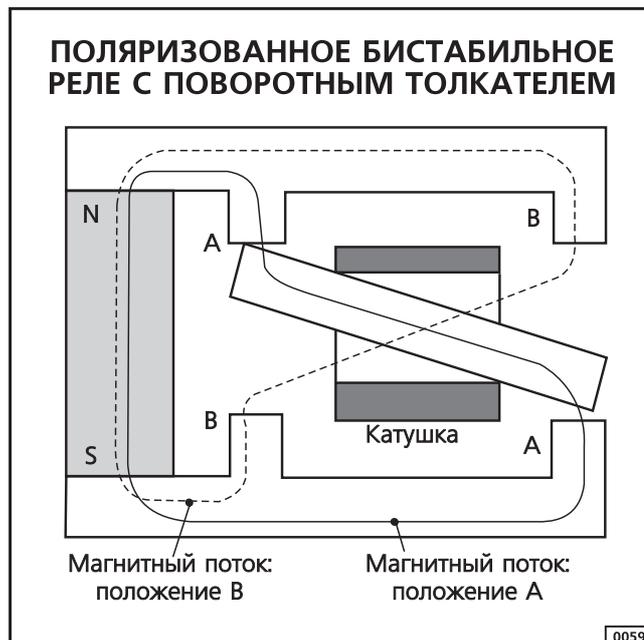
Механика все-таки постепенно сдает позиции и гораздо чаще можно встретить поляризованные бистабильные реле (рис. 61), где намагниченный сердечник катушки дает возможность якорю находиться в двух стабильных положениях.

Учитывая важность поляризованных реле для систем промышленной автоматики и электроники, познакомимся с этими реле подробнее. У поляризованных моностабильных и бистабильных реле встречается несколько типов магнитных систем, показанных на рис. 62. Основное различие состоит в том, какой элемент является подвижным: сердечник катушки или толкатель. Для инженера, применяющего поляризованное реле, это практически безразлично,

но следует помнить, что в обоих случаях подмагничивание позволяет радикально повысить чувствительность катушки реле. С другой стороны, бистабильные поляризованные реле при сильных ударах способны переключаться в противоположное устойчивое положение, что очень ограничивает применение бистабильных поляризованных реле там, где они всего нужнее - на транспорте, железной дороге, автоэлектронике, то есть всюду, где требуется надежность при экономии энергии.

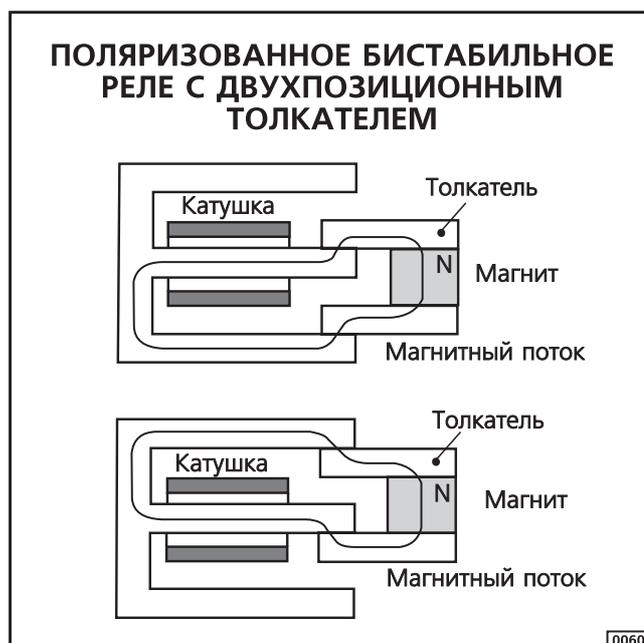
## Бистабильные реле и вопросы экономии энергии

При работе реле через катушку протекает ток, катушка греется и повышает температуру реле и окружающего реле оборудования. Чем выше температура окружающей среды, тем тяжелее температурный режим реле и тем короче его срок службы. В бистабильных реле реализована возможность импульсного управления катушкой (или катушками), что позволяет включать и выключать реле кратковременными импульсами управляющего напряжения или тока. Длительность импульсов управления зависит от инерционности механизма реле и для мощных реле



Бистабильное реле может фиксировать контактную группу в двух положениях даже после отключения катушки от источника тока

Рисунок 61



Принцип работы бистабильного реле очень прост и нагляден

Рисунок 62

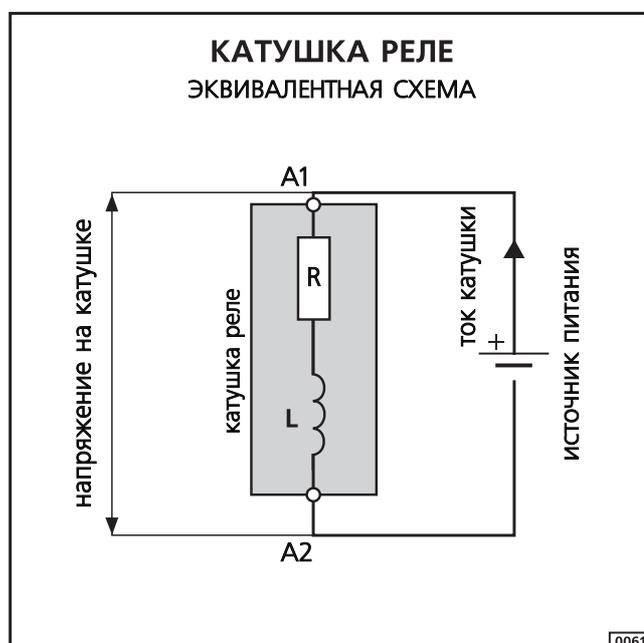
составляет 5...20 мс. В промежутке между подачей импульсов управления тока через катушку нет, катушка не греется, поэтому бистабильное реле может надежно работать при более высокой температуре окружающей среды, чем для нейтрального реле. Здесь к месту напомнить приведенное в главе о контактной системе правило десяти градусов, однозначно связывающее надежность с перегревом реле.

Реле по своей идее является дистанционным выключателем и именно бистабильное реле наиболее полно реализует эту идею. С помощью бистабильных реле можно создавать коммутаторы сигналов и силовых цепей, не зависящие от цепей управления при пропадании питания или аварийном отключении управляющих сигналов.

## Катушка реле

При конструировании реле катушке уделяется самое пристальное внимание, поэтому разработчик должен знать об особенностях конструкции и работы катушки не меньше, чем о контактах.

Катушка реле - это элемент для преобразования электрической энергии в механическую. Инженеры обычно интересуют электрические параметры катушек реле. На рис. 63 показана эквивалентная схема катушки, включающая в себя индуктивность  $L$  и сопротивление обмотки  $R$  (возникающее вследствие конечной проводимости материала обмоточного провода). Коэффициент  $L \cdot R$  определяет постоянную времени катушки, или электрическую задержку.



Катушка реле из-за наличия омического сопротивления рассеивает тепловую мощность

Рисунок 63

Катушку реле полностью характеризуют номинальное напряжение на катушке, ток катушки, сопротивление катушки, индуктивность катушки и количество витков (или ампер-витки).

## **Номинальное напряжение на катушке**

Соответствует напряжению, при приложении которого в катушке возникает магнитный поток, достаточный для включения реле с требуемым временем включения и длительностью дребезга контактов. Обычно номинальное напряжение выбирается в соответствии с рядом стандартных значений, из которых можно отметить наиболее часто применяемые в промышленности: 12 V, 24 V, 110 V, 220 V, 380 V. С номинальным напряжением (coil voltage) неразрывно связано значение минимального напряжения включения (pick-up voltage) и максимальное значение допустимого напряжения на катушке (max coil voltage).

## **Ток и сопротивление катушки**

Ток через обмотку реле рассчитывается по закону Ома, исходя из величины номинального напряжения и сопротивления катушки. При работе катушки на переменном токе к активному сопротивлению катушки добавляется индуктивная составляющая импеданса.

Важно отметить, что в отличие от контактов, изготавливаемых из различных металлов, провод катушки реле всегда выполняется только из меди, обладающей положительным температурным коэффициентом сопротивления. При росте температуры растет сопротивление провода катушки, что ведет к уменьшению тока в катушке. При повышении температуры катушки на 10 °C сопротивление провода обмотки возрастает на 4%, что будет рассмотрено ниже при расчете предельных параметров релейных схем.

В каталогах сопротивление и ток катушки даны обычно при окружающей температуре +20 °C.

## Индуктивность катушки

Обычно индуктивность не имеет значения при применении реле, но следует помнить, что индуктивность катушки с непритянутым якорем ниже, чем когда реле включится и якорь будет притянут к сердечнику реле. Ток через катушку реле переменного тока при непритянутом якоре будет больше примерно на 15...30%, чем во *включенном состоянии*, что имеет очень важное значение при расчете и проектировании схем, устойчиво работающих на верхней границе температурного диапазона.

## Катушки постоянного и переменного тока

Катушки реле постоянного тока представляют собой обычный соленоид. Количество витков определяется расчетным током катушки и величиной требуемого магнитного поля. Исходя из расчетного тока подбирается обмоточный провод с диаметром, позволяющим намотать требуемое количество витков. У катушек для работы на переменном токе расчет сложнее, потому что рабочий ток определяет не только омическое сопротивление катушки, но и ее индуктивная составляющая. Вследствие этого катушки одного и того же типа реле на 220 VDC и 220 VAC обладают разным омическим сопротивлением и количеством витков. Это не позволяет применять на постоянном токе реле, рассчитанные на переменный ток (сопротивление обмотки переменного тока меньше, что вызовет перегрев катушки).

Катушки на переменный ток снабжены специальным короткозамкнутым дросселем для устранения дребезга с частотой источника питания, у катушек постоянного тока такого дросселя нет и поэтому реле на постоянный ток принципиально не могут применяться на переменном токе без дополнительных внешних элементов, о которых будет идти речь позднее.

Рассмотрим пример промышленного реле с 4 переключающими контактами. Реле имеет следующие данные катушки на переменном и постоянном токе:

Пример доказывает существенное различие в обмотках катушек реле для работы на переменном и постоянном токе.

Номинальное напряжение катушки	Сопротивление катушки
220 VAC	14100 Ом
220 VDC	54000 Ом

## Мощность, потребляемая катушкой реле

Катушка реле потребляет электрическую мощность, определяемую КПД преобразования электрической энергии в механическую, потерями в толкателе и пружинной системе контактов и требуемым усилием прижима контактов реле.

Для промышленных малогабаритных реле типичны катушки с мощностями 1..1,5 Вт или VA, в зависимости от вида рабочего тока. Катушки миниатюрных мощных реле потребляют от 0,2 до 0,6 Вт, а у сигнальных реле есть особо чувствительные конструкции мощностью до 0,08 Вт.

В каталогах приводятся мощность и сопротивление катушек реле. Необходимо отметить, что для подавляющего большинства нейтральных и моностабильных реле разрешается нахождение катушки под током в течение любого длительного промежутка времени. Исключение составляют вибростойкие реле с мощными катушками, рассчитанные в основном на применение в военной авиакосмической технике, где редко требуется непрерывная работа в течение более 2...3 часов.

У бистабильных реле встречаются ограничения на длительность сигнала управления, вызванные малыми габаритами катушки и применением катушек с меньшим омическим сопротивлением, чем у нейтральных реле. Это приводит к возможности перегрева катушек бистабильных реле при длительной подаче на них напряжения.

При наличии в каталоге рекомендаций по ограничению времени нахождения катушки под током следует очень внимательно отнестись к этим советам. Длительный перегрев катушки приводит к появлению короткозамкнутых витков и даже расплавлению соседних с катушкой пластиковых деталей реле.

При подборе конкретного реле для проекта инженеру далеко не всегда следует выбирать реле с катушкой минимальной мощности. Некоторые типы реле выпускаются с двумя исполнениями катушки: так называемым стандартным (standard) и экономичным (low-power). В таком случае у реле с экономичными катушками всегда хуже вибростойкость, чем у реле со стандартной мощностью. Кроме того, иногда реле с маломощными исполнениями катушки имеют большее время включения и дребезга контактов, что нежелательно при включении, например, ламп накаливания. Если в реле с экономичной катушкой наравне с увеличением количества витков обмотки дополнительно ослаблена пружина (или слабее пружинный контакт), то время выключения также будет больше, а это негативно скажется при коммутации индуктивных нагрузок.

Если реле переключает активные или маломощные индуктивные нагрузки, то выбор маломощной катушки благоприятно скажется на более длительном сроке службы реле.

## **Специальные и особо экономичные реле**

Сказанное выше о стандартных и маломощных катушках верно только в том случае, если для реле типовой конструкции просто понижают электрическую мощность катушки, например, увеличением количества витков в обмотке. Рассмотрим теперь реле, у которых вся механика оптимизирована для применения маломощных катушек. У таких реле конструктивная (механическая) мощность катушки остается неизменной при снижении потребления катушкой электрической энергии - это аналогично повышению КПД преобразования электрической энергии в механическую.

Предпосылками для создания экономичных катушек в силовых реле являются новые конструктивные материалы и средства точной механики:

- магнитопроводы (сердечники) с уменьшенными потерями - новые ферросплавы и компьютерная оптимизация формы сердечника;
- толкатели с меньшим коэффициентом трения - новые пластики с эффектами «смазки» трущихся поверхностей;
- контакты с большей поверхностью контактирования (со специальной обработкой поверхности и просто больше по габаритам, чем в обычных реле).

Специальные конструктивные меры привели к возможности снижения мощности катушек мощных реле в 1,5...2 раза. Типичное значение мощности катушки серийно производимого реле с контактной группой 1 С/О, 16А/250 ВАС или 2 С/О, 8А/250 ВАС составляет 0,4 Вт. Стоимость реле с пониженной мощностью катушки обычно выше, чем у стандартных реле на 15...20%, что обусловлено затратами на новую технологию и исходные материалы.

Наряду с промышленными реле с пониженной мощностью катушки имеются очень удачные конструкции реле с катушками мощностью всего 0,2 Вт при рабочем токе контактов 8...10А/250 ВАС. Конструкция этих реле представляет собой уникальное сочетание электротехники и механики, потому что эти реле по времени включения/выключения, вибростойкости и возможности коммутирования индуктивных нагрузок ничем не уступают «обычным»

промышленным реле с катушками мощностью 0,5..0,75 Вт. Такие реле распространены в промышленной автоматике и электронике, реле времени, промышленных контроллерах, бортовой аппаратуре.

## Мощность катушки и температура окружающей среды

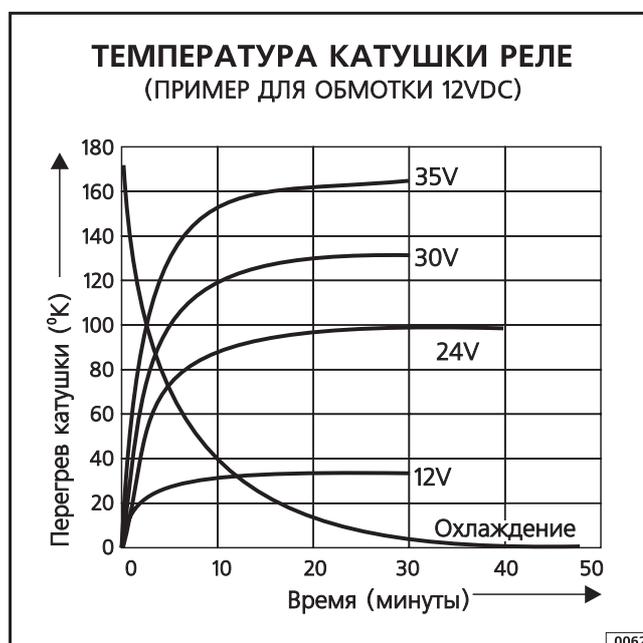
При работе реле магнитная система нагревается и это - совершенно нормальное явление. Рассеиваемая на катушке мощность составляет

$$P = U^2/R$$

где  $U$  - напряжение на катушке,  $R$  - сопротивление катушки,

откуда видно, что каждому 10% возрастанию напряжения на катушке соответствует 20% увеличение рассеиваемой мощности. После включения температура катушки и механизма реле начинают возрастать и через некоторое время температура реле (измеряемая обычно на поверхности катушки) стабилизируется. Если в каталоге указана предельно допустимая температура окружающей среды, то температура катушки будет выше окружающей на определенную величину перегрева, но все равно не превысит значения, при котором начинается разрушение деталей реле.

На рис. 64 показана зависимость температуры катушки типового миниатюрного реле мощностью 0,6 Вт/12 VDC от времени в зависимости от напряжения на катушке. Графики позволяют сделать вывод о том, что катушку реле можно кратковременно питать напряжением, до 100...200% превышающим рабочее значение. Понятно, что такой режим работы нельзя считать правильным, но знать о такой возможности



Реле может работать с повышенным напряжением на катушке, но не следует превышать максимальную температуру катушки  
Рисунок 64

эксплуатации реле полезно. При импульсном режиме работы реле температура катушки растет не скачком, а плавно, как показано на рис. 65.

При расчете схем с высоковольтными ( $> 100$  В) катушками ограничение напряжения на выводах катушки может быть обусловлено напряжением пробоя изоляции обмоточного провода. Производители реле с хорошей репутацией всегда применяют обмоточный провод с запасом по напряжению изоляции не менее 200...300%.

Кстати: некоторые фирмы-производители дешевых реле пользуются обмоточными проводами с низкокачественной изоляцией и во избежание рекламаций вообще не выпускают реле с напряжением катушки более 48 В.

## Нагруженные контакты нагревают катушку реле

Это крайне неприятный эффект зависимости температуры катушки реле от тока, протекающего через контактную группу. На контактах реле вследствие наличия переходного сопротивления контактов выделяется тепло. При сопротивлении контакта 0,01 Ом и рабочем токе 15 А тепловыделение на контактах составляет 2,25 Вт, и это - *нормальный рабочий режим мощного реле*. Токосподвод контакта играет роль радиатора, отводящего тепло от контактов на корпус реле и магнитную систему. При этом катушка реле дополнительно нагревается и для миниатюрных промышленных реле такой перегрев (относительно температуры окружающей среды) составляет 15...20 °С, а для относительно «крупных» реле прошлых лет разработки перегрев может быть и меньше (корпус больше, контактные пружины толще и шире, охлаждение лучше).



При периодическом отключении катушки температура реле снижается плавно, что следует учитывать при разработке оборудования

Рисунок 65

## **Дополнительные тепловые потери в магнитных системах реле переменного тока**

В катушках реле переменного тока возникают тепловые потери, вызванные потерями при перемагничивании сердечника переменным током. Обычно эти потери увеличивают потери в катушке примерно на 10...15% и зависят от частоты переменного тока, питающего реле. Об этом следует помнить при возможности питания реле от сетей с частотой 50 и 60 Гц. Ряд производителей реле выпускает универсальные исполнения катушек на 50/60 Гц, оптимизируя для катушек количество ампер-витков и материал сердечника.

## **Влияние температуры на пороги включения и выключения реле**

Все известные до настоящего времени реле имеют катушку, намотанную медным проводом. Независимо от сечения провода, медная обмотка реле имеет положительный температурный коэффициент сопротивления, равный 4,3% на 10 °С, что приводит к увеличению сопротивления катушки на 10 % при возрастании температуры катушки на 25 °С. При стабильном напряжении с ростом сопротивления обмотки падает ток катушки, а реле управляется именно током.

### **Для всех типов реле справедлива следующая зависимость:**

- при возрастании температуры катушки возрастает сопротивление обмотки;
- рост сопротивления обмотки приводит к уменьшению величины тока через катушку реле;
- снижение рабочего тока вызывает рост порогов напряжения включения и выключения реле.

Часто в техническом задании ставится требование работы реле от источника питания с заданной стабильностью, например, 10%. Если при этом планируется эксплуатация оборудования при максимально допустимой для этого реле температуре, то необходимо проведение эксперимента по определению смещения порогов включения и выключения «горячего» реле и стабильности его работы при пониженном (например, на 10%) напряжении источника питания.

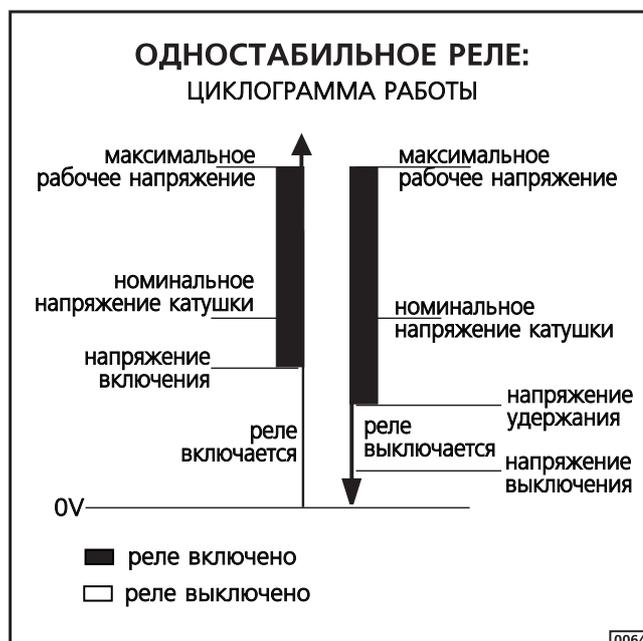
При работе над «высокотемпературным» проектом рекомендуется для питания катушек реле применять стабилизированные источники.

## Пороги включения и выключения реле

На рис 6б показана так называемая циклограмма, то есть пороги включения и выключения реле при подаче на катушку реле плавно изменяющегося напряжения.

### На циклограмме отмечены:

- номинальное напряжение (rated coil voltage, nominal voltage), при котором все тестируемые реле включаются с паспортным значением времени включения;
- нерабочее напряжение, при котором ток через катушку еще недостаточен для приведения в движение якоря реле. Это напряжение обычно не указывается в каталогах и составляет для типичного промышленного реле около 20% от номинального напряжения;
- напряжение включения (operate voltage, pick-up voltage), соответствующее включению всех тестируемых реле с негарантируемыми временем включения и дребезга контактов;
- максимальное рабочее напряжение (max. operating voltage), при котором еще не происходит опасного перегрева катушки реле;
- напряжение удержания (holding / non release voltage), при котором включенное реле еще остается во включенном состоянии при снижении напряжения на катушке ниже уровня напряжения включения;
- напряжение отпускания или выключения (drop-out / release voltage), при котором все реле выключаются.



Все отмеченные на циклограмме пороги напряжения зависят от температуры.

Циклограмма показывает, что реле обладает гистерезисом, повышающим помехоустойчивость реле

Рисунок 6б

На рис. 67 показана область допустимых напряжений на катушке реле в зависимости от температуры окружающей среды. Эта область ограничена безопасными значениями рабочих напряжений на катушке реле и часто приводится в каталогах.

На рис. 68 представлены зависимости напряжения включения и выключения от температуры для холодной и нагретой катушек реле:

- 1) напряжение включения для холодной катушки;
- 2) напряжение включения для нагретой катушки;
- 3) напряжение удержания для нагретой катушки;
- 4) напряжение выключения для холодной катушки;
- 5) нерабочее напряжение для холодной катушки.

Все значения напряжений синхронно повышаются на 0,4% при повышении температуры на 1 °С.

Каждый разработчик должен проверить, будет ли его реле работать в разрешенной области. При приближении напряжения и температуры катушки к допустимым границам следует принимать меры предосторожности, а именно:

- ограничивать максимальное напряжение на катушке реле (например, стабилитроном);



Максимальное напряжение на катушке реле зависит от температуры окружающей среды  
Рисунок 67



При разогреве катушки «уходят» пороги включения и выключения реле  
Рисунок 68

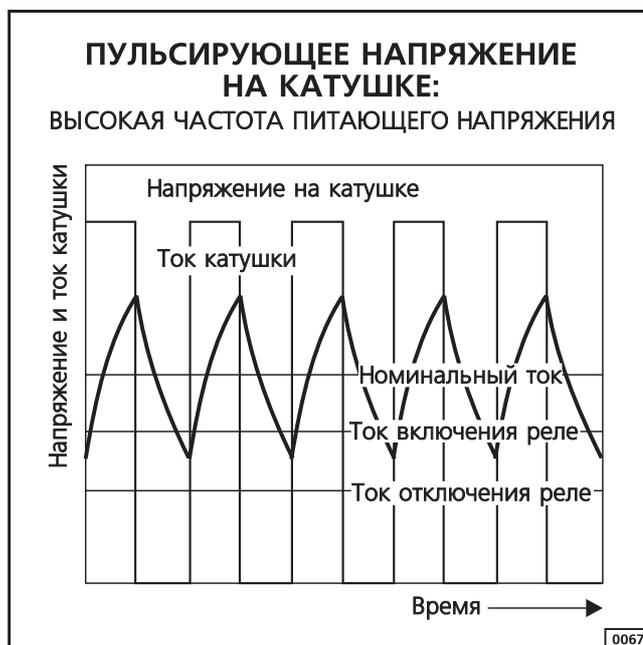
- устанавливать реле на безопасном расстоянии от других «горячих» элементов устройства (например, радиаторов мощных транзисторов) - это улучшает вентиляцию;
- устанавливать монтажные панели или печатные платы вертикально для лучшего охлаждения реле;
- применять чувствительные реле с минимальной мощностью катушки;
- применять специальные реле с более высокой допустимой рабочей температурой.

Несмотря на новые технологии и конструктивные материалы, проектирование надежного высокотемпературного оборудования по-прежнему остается сложным видом инженерной деятельности.

### Переменный ток вместо постоянного

Основное отличие катушек реле на постоянный и переменный ток состоит в разном количестве витков. У катушек постоянного тока количество витков больше, что особенно проявляется у реле с напряжением катушки более 100 В. Вместе с тем катушки постоянного тока проще по технологии, чем катушки переменного тока, причем многие типы миниатюрных мощных реле вообще не выпускаются с катушками на переменный ток. Это обстоятельство побуждает инженеров к разработке схем для адаптации реле постоянного тока для работы на переменном токе.

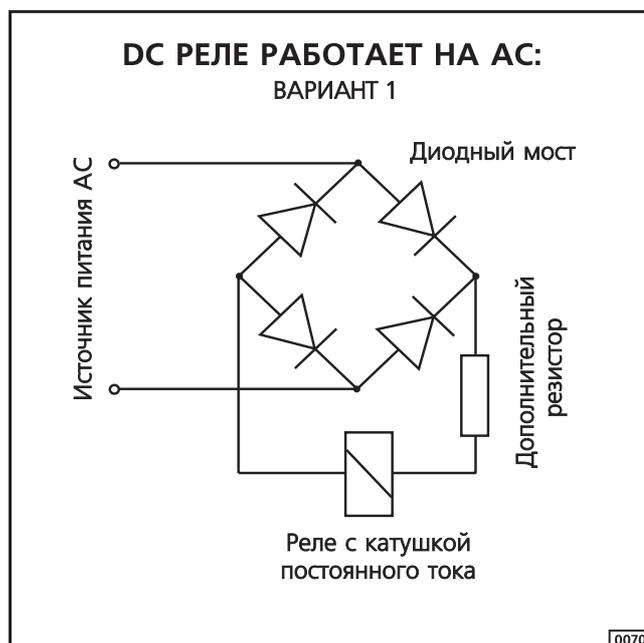
Одним из широко распространенных способов является питание катушки реле постоянного тока импульсным напряжением (что было очень популярно в автоэлектронике 80-х и 90-х годов). Такой режим позволяет снизить тепловыделение на катушке без заметного снижения



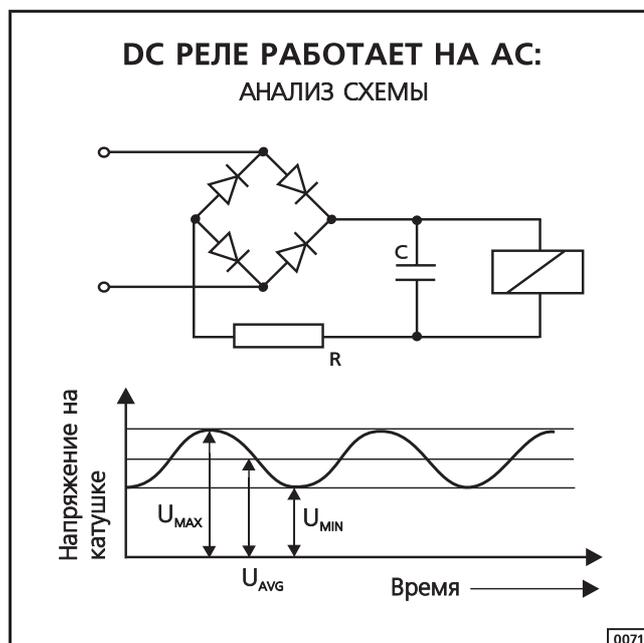
Импульсное питание катушки реле экономит энергию и снижает температуру реле  
Рисунок 69

всех остальных параметров реле. На рис. 69 показаны осциллограммы напряжения и катушки при питании тока прямоугольными импульсами напряжения. Для такого режима работы требуется экспериментальная проверка и подбор оптимальной частоты импульсов. Импульсное питание дает возможность сократить тепловыделение на катушке примерно на 30%, но всегда следует помнить о требованиях электромагнитной совместимости: при питании катушки прямоугольными импульсами уровень излучаемых помех очень высок.

На рис. 70 и 71 показаны две схемы питания реле постоянного тока от источника переменного напряжения. Эти схемы часто применяются в интерфейсной схемотехнике для построения релейных устройств с расширенными функциями, например, со смещенными относительно паспортного значения порогами включения и выключения реле. Питание DC реле от AC источников очень часто применяется при работе со сверхминиатюрными DC реле, не имеющими AC катушек, или при адаптации реле к нестандартным значениям входного напряжения. Диодный мостик преобразует переменный ток в импульсный, а последовательно включенный с катушкой резистор позволяет (в определенных пределах, конечно) регулировать



Катушку постоянного тока можно включать на переменном токе по специальной схеме  
Рисунок 70



Основная схема включения катушки постоянного тока в цепь переменного тока  
Рисунок 71

напряжение включения и выключения реле. Конденсатор параллельно катушке реле сглаживает пульсации и светодиод индицирует подачу напряжения на вход схемы.

Такие конструкции, несмотря на всю их схемную простоту, сложны в расчете, и успехов при проектировании можно достичь только путем экспериментальной проверки и подбора номиналов всех компонентов. Полученный результат дает возможность создать уникальные и недорогие релейные устройства, выполнить которые на основе серийно выпускаемых реле технически невозможно или экономически невыгодно.

При проектировании релейных схем с дополнительными элементами в цепи катушки требуется статистическая проверка стабильности уровней включения и выключения. Встречаются хорошие по качеству реле, не позволяющие добиться стабильных результатов в схеме рис. 71 и требующие для каждого реле подбора номиналов резистора и конденсатора. После эксперимента с одним реле и подбора для схемы оптимальных значений компонентов желательна проверка как минимум 50 реле из разных партий выпуска на предмет повторяемости параметров в данной конкретной схеме.

### Некоторые правила составления релейных схем

Несмотря на простоту реле как элемента коммутации и логики, начинающие конструкторы при проектировании релейных схем часто допускают ошибки. При объединении в общую схему нескольких реле следует ознакомиться с простейшими правилами, гарантирующими безошибочную работу устройства. На рис. 72 представлены два варианта одной и той же релейной схемы, одна из которых будет работать согласно замыслу



Некоторые основы построения схем релейной автоматики  
Рисунок 72

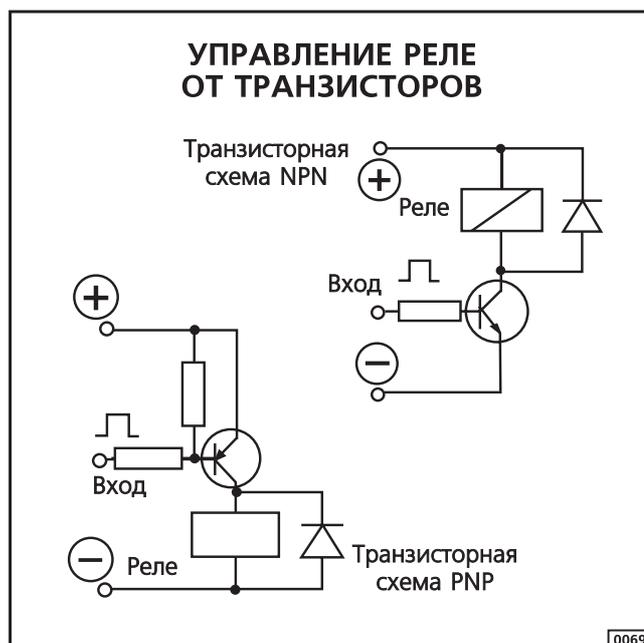
(то есть правильно), а во второй есть паразитные связи между катушками реле через контактные группы. Работать такая схема в статическом режиме принципиально будет, но возникающие при отключении катушек импульсные напряжения самоиндукции способны кратковременно включать другие катушки реле. Это создает помехи в релейной схеме, и этих помех следует избегать. При невозможности оптимального построения схемы необходимо шунтировать катушки диодами или варисторами.

## Управление катушками реле от транзисторов

На выходах интерфейсных плат промышленных контроллеров (рис. 73) установлены транзисторы по схеме PNP (подключают заземленную нагрузку к «плюсу» источника питания) или NPN (замыкают нагрузку на общий провод). На печатной плате рядом с транзисторами установлены защитные диоды, но опыт эксплуатации интерфейсного оборудования показывает, что при включении этими транзисторами мощных реле или контакторов диоды на печатной плате склонны к повреждению высоким напряжением самоиндукции катушки реле.

При проектировании схем управления реле от транзисторов желательно шунтирование реле защитными диодами, установленными прямо на панельке реле.

Установка защитных диодов увеличивает время выключения реле, и если диоды нежелательны, то следует *правильно* рассчитать и установить RC-цепочку параллельно катушке. Пренебрежение этими правилами приводит к сбоям и аварийным ситуациям в оборудовании.



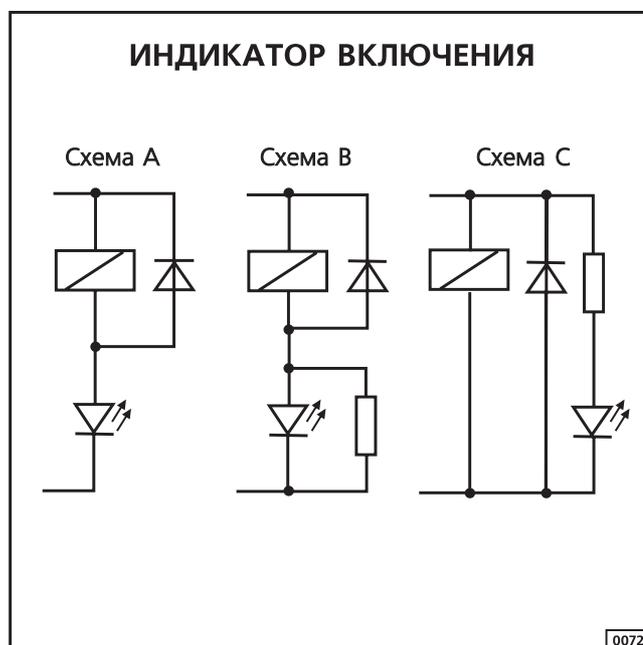
В современной автоматике реле чаще всего управляются от транзисторов  
Рисунок 73

## Механические и световые индикаторы в реле

Промышленные реле в миниатюрных корпусах обычно снабжаются прозрачными корпусами из поликарбоната, позволяющими видеть состояние контактов - это очень удобно при профилактических работах. Прозрачные корпуса позволяют установить внутри реле механический индикатор срабатывания, представляющий собой пластиковый флажок, закрепленный тем или иным способом на приводе контактов или на толкателе. Несмотря на простоту, механический индикатор позволяет с первого взгляда определить, в каком состоянии находится реле. В некоторых конструкциях реле механический индикатор совмещен с защелкой или кнопкой, позволяющей вручную включить реле - это необходимо при настроечных работах и для сервисного обслуживания.

Для удобства пользования в реле устанавливают световые индикаторы, обычно на светодиодах и (достаточно редко) на неоновых лампочках. На рис. 74 показаны основные схемы подключения светодиодов к катушке реле. Схема с последовательным включением светодиода и катушки реле применяется при рабочем токе катушки 3...15 мА, при более высоких токах необходимо включать светодиод параллельно катушке.

В обоих случаях светодиодные индикаторы не оказывают влияния на пороги включения и выключения реле.



Светодиодный индикатор включения реле очень полезен на практике  
Рисунок 74

## Конструктивные особенности катушек переменного тока

Если подключить катушку реле постоянного тока к источнику переменного тока, то реле будет «дребезжать» подобно электрическому звонку или зуммеру. Для работы на переменном токе катушка реле снабжается короткозамкнутым дросселем, конструктивно выполняемым в форме одновитковой катушки, перекрывающей по площади примерно половину сердечника катушки (см. рис. 75). Форма короткозамкнутого дросселя напоминает обычно латинскую букву D.

Дроссель, надетый на сердечник катушки, можно рассматривать как вторичную обмотку трансформатора, в котором первичной обмоткой служит сама катушка. При протекании через катушку переменного тока в дросселе индуцируется ток, сдвинутый по фазе относительно тока в катушке, а магнитное поле в сердечнике будет суммой двух полей: от катушки и от дросселя. На рис. 76 показано, как выглядят осциллограммы этих магнитных полей. При сдвиге фаз между двумя полями магнитный поток в сердечнике никогда не



Короткозамкнутый дроссель необходим для устранения дребезга контактов при питании катушки переменным током  
Рисунок 75



Дроссель препятствует снижению магнитного потока в катушке до нуля  
Рисунок 76

становится равным нулю, и реле не выключается при прохождении питающего напряжения через ноль - дребезг устраняется.

Теоретически все выглядит просто, но на практике расчет дросселя на удивление сложен. Для нормальной работы реле сечение дросселя должно быть не менее 20 % от сечения обмотки катушки, что приводит к необходимости установки на сердечник массивных дросселей. Дроссель традиционно выполняется из меди или алюминия (требуется хорошая электропроводность при минимальных габаритах) и его монтируют на сердечнике реле запрессовкой.

Обычно в промышленной электротехнике сеть или источник переменного тока выдает синусоидальное напряжение с малым коэффициентом гармоник. При применении источников бесперебойного питания следует помнить, что у дешевых моделей таких устройств выходное напряжение сильно отличается от синусоидального и обогащено гармониками частоты 50 Гц. При питании реле таким током катушка реле начинает сильнее греться вследствие высоких потерь в сердечнике на высоких частотах. На высоких частотах фазовый сдвиг в короткозамкнутом дросселе непредсказуем, что влияет на пороги переключения реле.

Если разработчик планирует применять систему бесперебойного питания и питать реле переменного тока от этой системы, рекомендуется проверить уровень гармоник в выходном сигнале источника (достаточно посмотреть техническое описание). При уровне гармоник в выходном сигнале более 20% следует уже принимать меры для фильтрации. Иногда установка дешевого однозвенного LC-фильтра на выходе «несинусоидального» источника питания позволяет разрешить все проблемы с гармониками и странно, что этого не делают все производители систем бесперебойного питания.

## Управление бистабильными реле

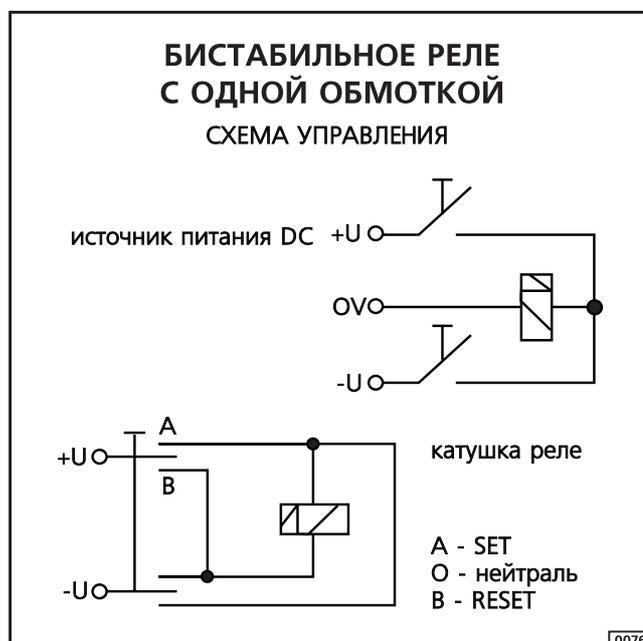
Управление бистабильным реле не представляет сложности. На рис. 77 показаны управляющие импульсы для бистабильного реле с одной катушкой. Импульс установки реле (SET) подается на катушку реле с полярностью и длительностью, указанной в каталоге. Длительность импульса указывается обычно в некоторых пределах, верхний предел длительности (если он есть) обусловлен тепловыми процессами в катушке. Для выключения реле необходимо подать импульс RESET в полярности, противоположной импульсу SET и обычно той же длительности.

Управление бистабильным реле мало отличается от управления нейтральным реле, но следует помнить, что подача управляющих импульсов с большой длительностью фронта может вызвать ошибочное переключение реле. На рис. 78 даны две простые схемы для импульсного управления бистабильным реле. Если в распоряжении конструктора нет биполярного источника питания, то можно управлять реле трехпозиционным ключом. В центральном положении ключа катушка реле обесточена.

В настоящее время не выпускаются бистабильные реле с поляризованной магнитной системой, рассчитанные на управление переменным



Бистабильное реле с одной обмоткой требует биполярного сигнала управления  
Рисунок 77

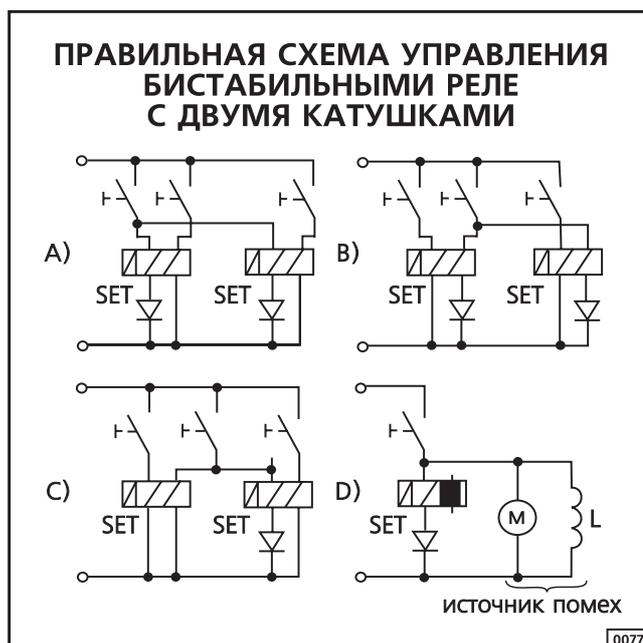


Управлять бистабильным реле с одной обмоткой можно от двух кнопок или двухпозиционного переключателя  
Рисунок 78

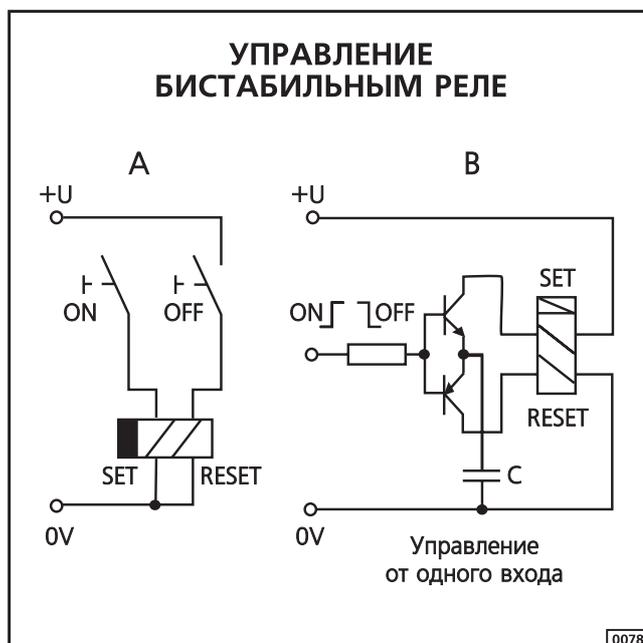
током. Для управления бистабильными поляризованными реле от источников переменного тока можно использовать схемы, подобные рис. 71, и содержащие выпрямительный мостик, токоограничительный резистор и сглаживающий конденсатор.

В бистабильных реле с двумя катушками управление даже проще, чем в реле с одной катушкой. Такое бистабильное реле подобно триггеру с двумя независимыми входами установки и сброса. Полярность управляющих сигналов на катушках должна соответствовать указанной в каталоге, в противном случае реле будет функционировать неправильно или вообще не работать. Бистабильные реле с двумя катушками имеют четыре вывода (раздельно от двух обмоток) или три вывода (один общий для двух обмоток). Управление двухобмоточным бистабильным реле показано на рис. 79 и 80, где даны специальные схемотехнические приемы для параллельной работы катушек реле при построении коммутаторов (рис. 79 А, В и С).

Отдельно рассмотрен случай параллельного включения мощной индуктивной нагрузки и катушки бистабильного реле (рис. 79 D). При отключении индуктивной нагрузки бистабильное реле может быть переключено в произвольное положение



Основы правильного построения схем на бистабильных реле  
Рисунок 79



Два распространенных способа управления бистабильными реле  
Рисунок 80

высоковольтным импульсом самоиндукции, поэтому для нормальной работы реле обязательно следует устанавливать последовательно с катушкой реле защитный диод.

## **Особенности применения бистабильных реле**

При конструировании схем на основе бистабильных реле инженеру следует придерживаться следующих правил:

- строго следовать указанным в каталогах минимальной и максимальной длительности импульсов SET и RESET: это гарантирует стабильную работу реле и не допускает перегрева катушки;
- перед началом работы оборудования необходима подача импульса установки реле в исходное состояние;
- бистабильные реле поставляются с завода с неопределенным положением магнитной системы;
- бистабильное реле намного хуже переносит удары и вибрации, чем моностабильное (нейтральное) и имеется опасность переключения бистабильной магнитной системы от сильного удара - нейтральное реле после удара всегда возвращает контакты в исходное положение;
- бистабильные реле чувствительны к внешним магнитным полям, что следует учитывать и экспериментально проверять при размещении оборудования вблизи трансформаторов, электромоторов и силовых дросселей;
- одновременная подача управления на входы SET и RESET может привести к механическим повреждениям бистабильных реле;
- бистабильные реле нельзя устанавливать рядом с источниками ударов и вибраций, например, мощными электромагнитными пускателями, двигателями, механическим и пневматическим оборудованием.

## Рекомендации по выбору параметров катушки реле

Для упрощения подбора подходящего реле предлагается таблица, содержащая два раздела: выбор и проверка. Параметр, относящийся к разделу «выбор», должен быть выбран самим разработчиком в зависимости от назначения реле в его проекте. Остальные параметры необходимо проверить для на соответствие выбранного реле необходимым требованиям.

ПАРАМЕТР МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ РЕЛЕ	РАБОЧАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	ВЫБОР	ПРОВЕРКА
ТИП КАТУШКИ РЕЛЕ	переменный или постоянный ток	✓	
	нейтральная, поляризованная, бистабильная, 1 или 2 катушки в магнитной системе		
ПАРАМЕТРЫ КАТУШКИ	номинальное напряжение		✓
	сопротивление катушки		
	ток катушки		
	потребляемая мощность		
РАБОЧЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ	возможность работы в требуемом температурном диапазоне		✓
	напряжение включения		
	напряжение выключения		
	напряжение удержания (обеспечение возможности экономии энергии во включенном состоянии или управления импульсами постоянного тока)		
	напряжение нечувствительности (учет токов утечки в схеме управления катушкой)		
ТЕМПЕРАТУРА	перегрев катушки по отношению к окружающей температуре		✓
	возможность работы реле с неограниченным временем нахождения катушки под током		
	напряжение включения и выключения реле при предельной температуре эксплуатации		
	допустимая температура реле при хранении		
	возможность конденсации водяного пара (резкие перепады температуры)		
ДРУГИЕ ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ	вибростойкость катушки		
	устойчивость к внешним магнитным полям и их влияние на рабочие уровни напряжений включения, выключения и удержания		

В частности, при выборе реле конкретного типа на требуемое напряжение катушки разработчик может только проверить, подходит ли ему катушка выбранного реле по потребляемой мощности. Если мощность катушки велика и такое реле для данного применения не подходит, следует выбрать другое, более чувствительное реле.

Напряжение катушки также можно только выбрать из ряда стандартных значений. В некоторых случаях инженер может заказать для своего проекта реле с нестандартным напряжением катушки, такую услугу некоторые производители реле предоставляют даже для относительно небольших партий реле.

# МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ

## РЕЛЕ КАК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

Своеобразие работы реле состоит в том, что электромеханическое устройство испытывает одновременно электрические (нагрев контактов электрическим током, высокие напряжения, электрическая дуга) и механические нагрузки (трение в движущихся частях, удары и механическая деформация контактов, коррозия металлических частей, старение пластиков). Действие всех этих факторов неизбежно, но при правильной эксплуатации реле могут быть приняты меры по обеспечению требуемой надежности.

### Механические детали реле

К механическим деталям реле относятся:

- защитный корпус (кожух);
- основание с выводами контактов;
- толкатель и все связанные с ним механические элементы;
- оси подвижных элементов и подшипники скольжения;
- контакты и контактные пружины;
- внутренние соединительные провода;
- катушка с обмоткой;
- дополнительные элементы, например, механический индикатор или защелка для ручного включения реле.

## МЕХАНИЧЕСКИЙ ИЗНОС КОМПОНЕНТОВ

Все элементы, испытывающие трение и удары, подвержены механическому износу со следующими характерными эффектами:

- стачивание друг о друга материалов трущихся деталей;
- корродирование металлических узлов под воздействием водяных паров;
- абразивное действие частиц пыли из окружающей среды;
- накопление между контактами абразивной и токопроводящей пыли, состоящей из частиц окислов железа, атмосферной пыли и частиц пластиковых элементов реле;
- потеря эластичности пружинных элементов от усталости металла и перегрева;
- испарение пластификаторов из пластиков;
- воздействие на металлы и пластики озона и высокомолекулярных соединений, возникающих вследствие электрической дуги;
- утрата защитных покрытий в трущихся металлических элементах и связанная с этим коррозия.

Многообразие видов механического износа приводит к обычному для всех механических устройств старению - дребезгу и расшатыванию подвижных элементов, заклиниванию, истончению и поломкам отдельных деталей механизма реле.

**Условия внешней среды и эксплуатации добавляют свой вклад в старение:**

- разрушающее воздействие для пластиков солнечного и техногенного ультрафиолетового излучения;
- вибрации, дополнительно изнашивающие механические компоненты даже при выключенном реле;
- удары, приводящие к избыточным механическим напряжениям в узлах и способствующие потере прочности хрупких пластиков и разгерметизации реле;
- высокая влажность воздуха и конденсация влаги на внутренних элементах реле, способствующие коррозии и понижению напряжения изоляции;

- агрессивные газы в окружающей атмосфере, создающие вместе с водяными парами агрессивные растворы, поражающие металлические детали и особенно контакты.

## **Механический износ перед началом эксплуатации реле**

Как ни парадоксально звучит, но часть реле подвергается механическому износу еще до начала эксплуатации. Современные миниатюрные реле являются прецизионными механизмами, чувствительными к ударам и вибрациям. Необходимо помнить, что падение реле весом 20 граммов с высоты 50 см на деревянный пол приводит к перегрузкам в реле на уровне 50 G, а при аналогичном падении на каменный пол - до 100 G. Обычно в каталогах указывается предельная ударная нагрузка в 100 G, после которой 50% реле получают необратимые механические повреждения. При анализе ударостойкости пользуются статистическими результатами, не исключаяющими того, что часть реле без повреждений перенесет удары в 200 G и более. При импульсных воздействиях на прецизионные механизмы очень важно направление удара и в некоторых каталогах даются диаграммы допустимых ударных нагрузок по осям X, Y и Z.

Реле в металлических корпусах меньше боятся ударных воздействий на корпус, но стеклянные изоляторы выводов очень чувствительны к изгибам и ударам. Небольшие трещины в стекле приводят к потере герметизации и прочности вывода со всеми вытекающими последствиями.

При проверочных и сборочных работах следует избегать механических нагрузок на реле и доставать реле из заводской упаковки только перед установкой в оборудование или на печатную плату.

Для тех, кто полагается на высокую надежность военных реле, приведем взятый из солидного американского справочника отрывок инструкции по монтажу реле в металлических корпусах:

*«Персонал должен пройти аттестацию и ежегодную квалификационную комиссию. Все монтажные работы должны вестись на столах с подложенными мягкими резиновыми матами и бортиками, препятствующими падению компонентов со стола на пол... Запрещается вынимать реле из транспортной упаковки путем высыпания на стол.*

*При вынимании реле из транспортной упаковки запрещается держать реле над полом или окружающими стол предметами. При случайном падении реле на пол такие экземпляры реле следует отбраковывать и оставлять для дополнительного тестирования. Если после падения у реле наблюдается видимый изгиб или иная деформация выводов, такие реле следует отбраковать, как непригодные для эксплуатации. Пайка должна вестись калиброванным инструментом, гарантирующим отклонение от требуемой температуры пайки не более чем на 10 °С... время пайки не должно превышать 5 секунд, при пайке допускается только очищенный (99%) канифольный флюс.... Пайка контактов должна производиться в шахматном порядке, не желателен одновременный нагрев двух соседних выводов. После пайки перед промывкой печатные платы должны охлаждаться при температуре окружающей среды не менее 2 часов. Промывка флюса может производиться только 96% раствором этанола при температуре не выше +70 °С и при отсутствии в промывочном растворе любых активаторов.... При ошибках монтажа допускается не более чем 3 перепайки реле, после чего реле следует отбраковывать. Реле, выпаянные из печатной платы, непригодны к эксплуатации. При установке реле в монтажный цоколь следует пользоваться специальными экстракторами и избегать наклона корпуса реле при установке и вынимании из цоколя. Цоколи с вынутыми реле следует защищать от пыли с помощью заглушек».*

Заметим, что речь идет о реле для военного и космического оборудования, которые, оказывается, могут плохо переносить падение на пол. Тщательность написания инструкции позволяет предположить, что нарушение этих простых указаний ведет к снижению надежности оборудования и рекламациям от клиентов, что также нежелательно и для обычной коммерческой техники.

Большинство требований приведенной инструкции распространяется и на «коммерческие» мощные реле. В любом случае до начала монтажа реле необходимо внимательно прочитать все требования по вибростойкости и температуре пайки, изложенные в каталоге.

## **Механический ресурс реле: численные определения**

Механический ресурс реле определяется как максимальное количество циклов включения и выключения реле при максимальной указанной в каталоге частоте переключения. Электрическая нагрузка контактов отсутствует, окружающая температура соответствует нормальным условиям (+20 °С, относительная влажность воздуха около 50%).

### **Количественными признаками для окончания тестирования реле являются:**

- повышение напряжения включения более чем на 20%;
- снижение напряжения отключения до уровня менее 10% от номинального напряжения включения;
- снижение прочности электрической изоляции на 25% от номинального значения;
- снижение прочности изоляции катушка-контакты на 10% от значения для нового реле.

Указанное в каталогах значение механического ресурса является гарантированным минимумом и обычно просто не проверяется фирмой-производителем для количества циклов более 30 миллионов. Дорогостоящее тестирование мощного реле на более длительный механический ресурс бессмысленно, потому что мощные реле предназначены для коммутации не сигнальных цепей, а значительных мощностей, и электрический ресурс мощных реле обычно не превышает 10% от механического. Производители реле при указании в каталоге значения электрического ресурса реле ориентируются на требования стандартов, предписывающих для промышленных реле минимальный электрический ресурс, равный 100 тысяч коммутаций при полном токе контактов. Постепенно входит в обращение также новое значение стандартного электрического ресурса, равное 200 тысячам коммутаций.

Многолетние практические исследования механического ресурса реле 60-х и 70-х годов выпуска показывают, что для типичного промышленного реле с 4 переключающими контактами и микромощными нагрузками механический ресурс в среднем составляет 50..100 миллионов коммутаций (речь идет о высококачественном промышленном реле). По-видимому, это значение следует считать предельным, хотя до настоящего времени

выпускаются промышленные реле, рассчитанные на механический ресурс в 1 миллиард коммутаций (эти реле разрабатывались в конце 50-х для схем релейной автоматики станков с ЧПУ).

## Корпус электромагнитного реле

Корпус необходим для защиты реле от пыли, влаги и корродирующих газов, а также для электрической изоляции контактов и катушки от окружающих предметов. Корпуса изготавливаются из пластиков (полимеров), позволяющих совместить конструктивные элементы реле с электрическими изоляторами.

Каждый пластик, применяемый в электротехнике, имеет специфические параметры изоляции. Для инженеров имеют значение три параметра:

- поверхностное сопротивление и поверхностные токи утечки;
- поглощение (накопление) влаги материалом пластика;
- объемное сопротивление материала пластика.

При производстве реле применяется более десятка полимеров, каждый из которых имеет множество модификаций, например, наполнение хлопьями стекловолокна для повышения пожароустойчивости. Кроме полимеров, до сих пор широко применяются фенольные пластики, незаменимые в очень мощных реле и контакторах.

При изготовлении из пластиков деталей для мощных реле параметры изоляции определяются не только материалом пластика, но и окружением этих деталей - воздушными зазорами между контактами, накоплением токопроводящей пыли в механизме реле, конденсацией влаги на поверхности изолирующих деталей. Добавочные факторы, ухудшающие изоляцию, учитываются при конструировании реле и проверяются экспериментально. Эксперимент здесь исключительно важен, потому что точность любого математического моделирования электромеханических устройств невелика и только практическая проверка дает настоящие, точные результаты. Этим, например, и обусловлен тот факт, что удачные конструкции промышленных реле и их модификации выпускаются на протяжении многих десятков лет. Конструкция таких реле совершенствуется годами, поэтому эксплуатационники доверяют проверенным реле больше, чем самым современным конструкциям.

Для упрощения классификации все мощные реле выпускаются в соответствии с определенной категорией изоляции.

## Категория изоляции

Стандарт определяет такие минимальные требования к изоляции, как защита персонала и оборудования от поражения электрическим током. В соответствии с этим определением электротехническое оборудование подразделяется на 5 основных классов согласно:

- учету снижения качества изоляции при наличии воздействий окружающей среды - пыли, грязи, высокой влажности воздуха, конденсации водяных паров, корродирующих газов и старения материалов;
- процессам старения и деформации в пластиках, снижающим прочность изоляции;
- расстоянию между токоведущими частями по воздуху и по поверхности изоляторов (расстояние должно соответствовать применяемым в оборудовании рабочим напряжениям).

Расстояние между токоведущими частями - исключительно важный показатель, характеризующий способность электрического оборудования противостоять накоплению загрязнений на поверхности и сохранять при этом требуемое напряжение изоляции.

В таблице представлены характеристики различных категорий изоляции.

<b>КАТЕГОРИЯ ИЗОЛЯЦИИ</b>			
<b>ГРУППА ИЗОЛЯЦИИ</b>	<b>СНИЖЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>	<b>ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИЗОЛЯЦИЮ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕН.</b>	<b>ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ ДАННОЙ КАТЕГОРИИ ИЗОЛЯЦИИ</b>
<b>Ао</b>	малое	очень малая	радиоприемное оборудование, переносное оборудование, карманные радиостанции
<b>А</b>	малое	малая	измерительная техника
<b>В</b>	среднее	время от времени	бытовые электротехнические приборы, устройства освещения, механизм реле
<b>С</b>	высокое	высокая	промышленное оборудование, заводская автоматика и электротехника, реле и контакторы, КИПиА
<b>Д</b>	очень высокое	высокая	железная дорога, метро, краны, установленное на открытом воздухе промышленное оборудование

Промышленные мощные реле выпускаются с категорией изоляции В или С. Цифра при букве категории означает рабочее напряжение, например, В250, причем одно и то же реле может соответствовать нескольким категориям изоляции при различных напряжениях эксплуатации. Чаще всего встречаются реле с категорией В400/С250 - практически это означает, что при среднем уровне загрязнений реле допустимо применять в цепях с напряжением 400 В, а в условиях больших загрязнений - только с напряжением 250 В.

Категория изоляции реле - это заводской параметр на момент поставки реле потребителю. Понижение категории изоляции может произойти, например, при перегреве корпуса реле соседними тепловыделяющими узлами оборудования, поэтому инженеры должны прикладывать все усилия для сохранения категории изоляции как самого реле, так и проектируемого оборудования.

При наличии выбора всегда следует отдавать предпочтение реле в герметичном корпусе.

Лучшим средством для повышения напряжения изоляции электротехнического оборудования в «грязных» условиях является размещение отдельных узлов оборудования в герметичных корпусах со степенью защиты не менее IP65 (полная пыле- и брызгозащита), с вводом кабелей в корпус с помощью герметичных кабельных вводов.

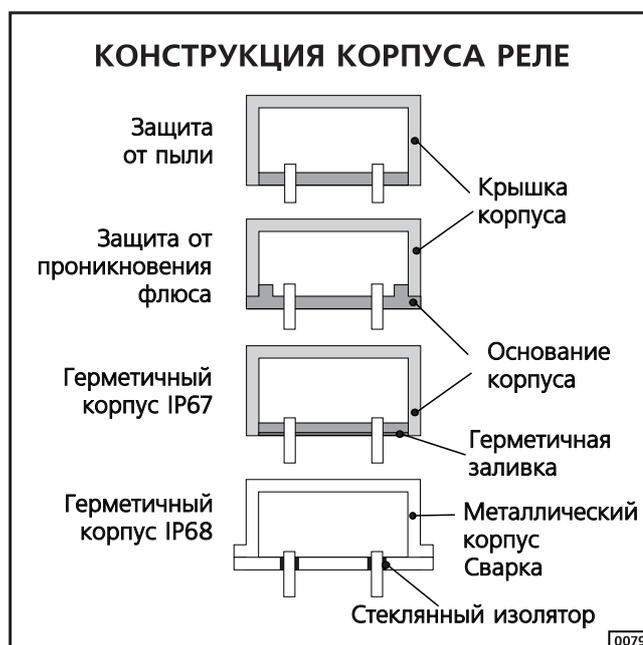
<b>КАТЕГОРИЯ (СТЕПЕНЬ) ЗАЩИТЫ СОГЛАСНО DIN 40050</b>			
	<b>ПЕРВАЯ ЦИФРА</b>		<b>ВТОРАЯ ЦИФРА</b>
<b>КЛАСС ЗАЩИТЫ</b>	<b>Защита персонала от прикосновения</b>	<b>Защита корпуса от проникновения пыли</b>	<b>Защита корпуса от брызг воды</b>
<b>IP00</b>	нет защиты от прикосновения ладонью к токоведущим элементам	никакой защиты от проникновения и накопления пыли	никакой защиты от проникновения брызг воды
<b>IP40</b>	защита от попадания внутрь реле предметов с диаметром > 1 мм (щупы измерительных приборов)	частицы пыли с размерами > 1 мм не могут проникать внутрь реле	защита от вертикально падающих капель небольшого количества воды
<b>IP54</b>	полная изоляция внутренних токоведущих элементов реле от прикосновения или щупов измерительных приборов	защита от накопления опасного для функционирования количества пыли внутри корпуса реле	реле защищено от брызг воды с любой стороны
<b>IP67</b>		полная защита реле от проникновения пыли внутрь корпуса	допускается промывка реле после монтажа окунанием печатных плат в моющий раствор
<b>IP68</b>			реле выдерживает сильные перепады давления и может эксплуатироваться в безвоздушной среде

## Степень защиты реле от воздействий среды

Реле выпускаются в различных исполнениях, причем степень защиты классифицирована по возможности проникновения внутрь реле частиц пыли и брызг воды.

В таблице пояснены индексы при международном значении категории защиты IP для наиболее распространенных типов корпусов реле. Первая цифра при индексе IP означает защиту персонала от прикосновения к токоведущим элементам или защиту от проникновения и накопления пыли в механизме реле. Вторая цифра индекса характеризует защищенность реле от брызг воды и влаги.

На рис. 81 показаны различные типы исполнения корпусов реле.



Корпус реле может иметь различные степени защиты: все определяется ценой и условиями эксплуатации

Рисунок 81

## Негерметичные реле Корпус без защиты - IP00

Реле с защитой IP00 представляет собой открытое реле, которое никогда не должно применяться без установки всего электронного блока в защитный корпус.

Преимуществом открытой конструкции реле является дешевизна и хорошее охлаждение контактов и катушки, поэтому такие реле нашли широкое применение в узлах автомобильной техники, где все реле выпускаются с очень мощными вибростойкими катушками.

## Защита IP40 и IP54

Реле в корпусах IP40 снабжаются пылезащитным изолирующим кожухом, предупреждающим механическое повреждение реле при установке или замене. При эксплуатации реле в запыленной атмосфере необходимо принимать меры по защите блоков, содержащих реле IP40, от проникновения пыли. При размещении релейных узлов в защитных корпусах со степенью защиты IP54 и более специальных мер по защите реле от пыли применять не требуется.

Реле в корпусах с защитой от проникновения флюса выполнены так, чтобы при пайке жидкий флюс под действием капиллярного эффекта не проникал по выводам внутрь реле. После окончания пайки реле такого типа желательно вообще не промывать печатный монтаж и пользоваться в качестве флюса только чистой канифолью. Такая пайка вполне соответствует требованиям стандартов на чистоту монтажа и повсеместно встречается в промышленной автоматике. Иногда реле впаиваются в плату после завершения общего монтажа и промывки платы окунанием, в этом случае остатки флюса на выводах реле также смывать не обязательно.

## Тропическое исполнение для негерметичных реле

Мощные негерметичные реле иногда выпускаются в тропическом, морском и «транспортном» исполнениях. Все отличия «тропических» и «морских» реле состоят в следующем:

- контакты реле покрываются слоем золота 10...15 мкм;
- катушки реле пропитываются водостойкими лаками;
- внутри реле используются соединительные провода с особо стойкой изоляцией;
- применяются специальные защитные покрытия черных металлов.

В инструкции по тропическому исполнению есть специальный пункт об обязательной устойчивости изделий к термитам и плесневым грибкам. Этим правилам удовлетворяют все современные пластики, применяемые в реле.

Реле для железнодорожного или автотранспорта для вибростойкости снабжены более мощной катушкой.

## Герметичные реле в корпусах IP67

Степень защиты IP67 допускает возможность окунания реле в раствор при промывке печатных плат после монтажа. При промывке реле в пластиковых корпусах обязательно выполнение следующих правил:

- температура моющего раствора не должна превышать 70 °С;
- промывка окунанием или струей раствора должна проводиться после охлаждения смонтированной платы до температуры окружающей среды (особенно важно при пайке волной или горячим воздухом с применением паяльных паст);
- длительность окунания не должна превышать 1 минуты (сильно зависит от температуры раствора, длительность промывки желательно согласовать с производителем реле);
- состав моющего раствора должен быть согласован с производителем реле (для исключения возможности воздействия растворителей и моющих растворов на герметичную заливку и пластмассу корпуса).

При эксплуатации герметичные реле в корпусах IP67 по сравнению с реле IP40/54 практически нечувствительны к агрессивным газам и менее подвержены окислению контактов. Не следует подвергать герметичные реле частой заливке водой или промывочными растворами, так как даже при соблюдении осторожности не исключена вероятность механического повреждения корпусов реле и нарушения герметичности.

## Защитные покрытия печатных плат лаком

Иногда требования тропического и морского исполнения электронного оборудования требуют покрытия печатных плат лаком или гидрофобными составами. Если требуется защита платы только со стороны пайки, то проблем с реле не возникает, основные трудности вызывает операция двустороннего покрытия плат, когда лаком покрывается корпус реле. Такую операцию можно производить только для герметичных реле в корпусах IP67, но необходимо осторожно подбирать изоляционный лак на предмет взаимодействия с корпусом и материалом герметика реле.

В каталогах коммерческих реле эта тема никак не отражена и для разработки правильной технологии герметизации плат желательна консультация с производителем реле.

## **Пожароустойчивость реле**

Для изготовления реле применяются электротехнические пластики с классом пожароустойчивости от V0 до V2, что означает:

- V0 - материал не поддерживает горения, при воспламенении и удалении из пламени при горении не капает и полностью затухает в течение максимум 40 секунд;
- V1, V2 или HB - материал не поддерживает горения, но допускает при принудительном горении образование капель, при удалении из пламени затухает не более чем за одну минуту.

При изготовлении качественных реле технологи выбирают лучшие сорта пластиков, одновременно удовлетворяющие:

- требованиям пожаробезопасности (все детали реле);
- требованиям электрической изоляции (все детали реле);
- требованиям механической прочности (все детали реле);
- требованиям оптической прозрачности (корпуса реле);
- устойчивостью к ультрафиолету (корпус реле).

Кроме этого, при старении или воздействии высокой температуры электрической дуги пластики не должны выделять корродирующих газов.

Удовлетворить одновременно всем этим требованиям трудно, поэтому в хороших реле применяются хорошие и дорогие пластики. Экономия на материалах понижает как цену, так и качество реле и разработчик должен об этом регулярно напоминать своему экономисту и заказчику.

## Выводы реле

На рис. 82 приведены эскизы самых распространенных выводов реле. Формально выводы реле подразделяются на:

- выводы для печатного монтажа;
- выводы для припаивания монтажных проводов;
- выводы для подключения ножевых разъемов FASTON;
- выводы для монтажа реле в панельку (цоколь).

У миниатюрных мощных реле для печатного монтажа универсальные выводы сделаны так, чтобы разрешить установку этих реле в монтажные панельки. Панельки бывают трех видов: для пайки в печатную плату, для установки на монтажной панели и для монтажа на рейку DIN. На рис. 83 показана установка миниатюрного реле в панельку, которая устанавливается на рейку DIN. На такой панельке имеются винтовые соединительные клеммы для подключения проводов, а также рычажок, упрощающий извлечение реле из панельки. Когда реле установлено в панельку, рычажок служит прижимом, надежно фиксирующим реле в панельке.

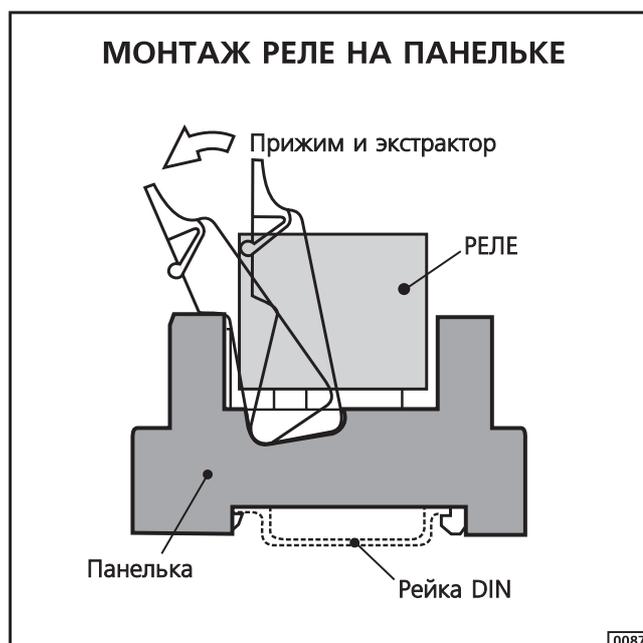
Применение панелек для мощных реле повышает скорость технического обслуживания оборудования, но



Выводы реле рассчитаны на установку в панельку или для пайки в печатные платы.

Контакты FASTON встречаются только у очень мощных реле

Рисунок 82



При установке реле в панельку прижим одновременно выполняет роль экстрактора для упрощения демонтажа реле

Рисунок 83

оказывает влияние на надежность. Для миниатюрного реле с одним переключающим контактом панелька создает в устройстве 5 контактов «реле-панелька» (два контакта для катушки и три - для переключающего контакта). Эти промежуточные контакты при использовании хороших панелек вносят невысокие переходные сопротивления порядка 1...3 мОм/контакт, такое низкое переходное сопротивление достигается сильным прижимом и хорошим покрытием контактов. Даже при таком малом переходном сопротивлении при рабочем токе 10 А на панельке рассеивается дополнительно 0,2 ... 0,6 Вт мощности тепловых потерь, что сравнимо с мощностью потерь на катушке реле. При частой смене реле в панельке качество контакта с выводом реле ухудшается и стандартные панельки рассчитаны на 5...10 установок реле.

Сказанное относится только к случаю установки в панельке реле с большим током контактов, при токе контактов менее 5 А потери на переходных сопротивлениях пренебрежимо малы.

Вторая часть вопроса надежности панелек - вибрации и тряска. По сравнению с пайкой проводов к выводам реле или впаиванием реле в печатные платы панельки сильно проигрывают по устойчивости к вибрациям, поэтому конструктор должен внимательно обдумать вопросы сервисного обслуживания в подвергающемся вибрациям оборудовании. Чаще всего проблема решается путем установки мощных реле на печатные платы с винтовыми клеммами или разъемами для подключения, а сами релейные платы монтируются в электротехническом шкафу или в корпусе оборудования. Элементом замены при профилактических работах является вся релейная плата, что дороже, чем замена только реле в панельках, но существенно более надежно.

В ответственных случаях разработчику желательно вообще отказаться от панелек в пользу разработки специальных релейных плат со впаянными мощными реле. Многие производители промышленных реле выпускают унифицированные релейные платы (обычно по 8 или 16 реле на плате) или предлагают изготовление таких плат на заказ, по спецификации пользователя. Подробности заказа можно обсудить с фирмой-производителем.

В защиту панелек можно сказать, что ставшие теперь промышленным стандартом реле с «ламповыми» цоколями и миниатюрные реле устанавливаются хотя и в несколько старомодные панельки, но надежность контакта в которых по вибростойкости не уступает пайке.

Контакты FASTON обычны для многих типов мощных и автомобильных реле. Для подключения выводов реле применяются ножевые разъемы (розетки) FASTON. Качество контакта здесь полностью определяется качеством разъема и его обжимом на соединительном проводе. При выборе разъемов FASTON разработчик всегда должен покупать разъемы так называемого «промышленного качества» (industry grade), в противном случае переходное сопротивление будет недостаточно низким для коммутации токов более 10 А. Контакты FASTON разработаны для крепления на проводе методом обжима и для создания хорошего контакта необходимо применение калиброванного инструмента. Нарушение технологии обжима неизбежно ведет к потере всех преимуществ контактов FASTON.

Хороший разъем FASTON при соблюдении технологии монтажа достаточно вибростоек, но не имеет никаких преимуществ перед качественной панелькой для реле.

В заключение отметим тот факт, что многие панельки для реле сертифицируются на токи меньшие, чем устанавливаемые в них реле. Это означает, что панелька на рабочий ток 10 А при установке в нее реле с рабочим током 16 А будет способна работать надежно только при токах до 10 А, что иногда ограничивает область применения реле на панельках.

Вторым важным обстоятельством, на которое должен обратить внимание разработчик, является напряжение изоляции панелек и расстояние между контактами катушки и контактов. Так называемые «обычные» панельки для промышленных реле на 2 или 4 переключающих контакта имеют винтовые клеммы с двух сторон панельки, что нарушает некоторые требования стандарта безопасности. В этом стандарте предусматривается минимальное расстояние между выводами катушки и контактов, равное 8 мм, что соответствует напряжению изоляции 4 кВ. Для удовлетворения стандарту выпускаются специальные «безопасные» панельки, где со стороны выводов катушки нет выводов контактов и полностью выполняются требования стандарта по безопасным расстояниям между входом и выходом.

При выборе панелек для проекта разработчик должен оценить необходимое напряжение изоляции и подобрать реле и панельку согласно требованиям электробезопасности.

## Монтаж реле на печатных платах

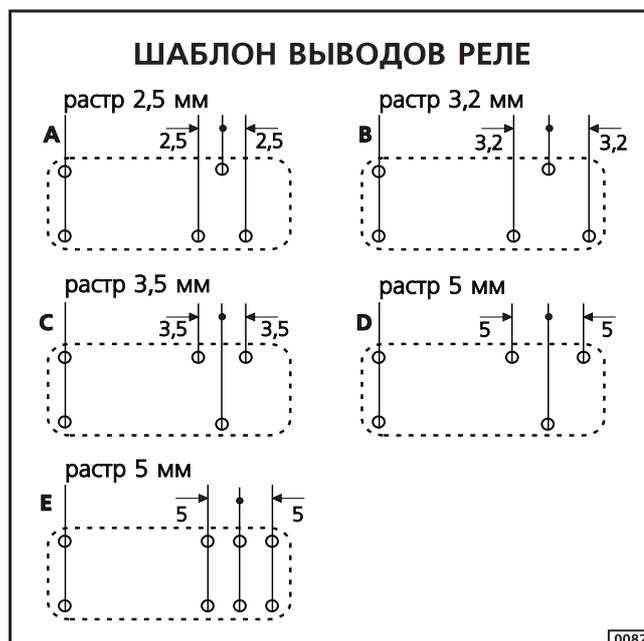
Подобно тому, как для микросхем были созданы стандартные корпуса со стандартными выводами, для миниатюрных промышленных реле разработаны унифицированные габариты и расположение выводов. В настоящее время наиболее распространены шаблоны выводов реле, показанные на рис. 84.

При монтаже реле на печатных платах необходимо руководствоваться обычными правилами монтажа, но есть и отличия от остальных электронных компонентов. Учитывая, что реле при работе греется, желательно устанавливать реле как можно дальше от других тепловыделяющих компонентов - силовых транзисторов, диодов, балластных резисторов. При компоновке реле рядом с трансформаторами и дросселями необходимо экспериментально проверить, нет ли влияния сильных магнитных полей на нормальную работу реле. Если силовые реле управляют мощными внешними нагрузками, желательно размещать реле рядом с выходным разъемом или клеммами для устранения потерь в соединительных печатных проводниках.

При проектировании платы с несколькими установленными рядом реле следует избегать установки корпусов реле вплотную - это может вызвать взаимовлияние реле их магнитными полями.

К конструктивным особенностям монтажа мощных реле на печатных платах следует отнести:

- отверстия в плате должны быть выбраны так, чтобы обеспечивать установку реле без усилий. В противном случае неизбежна деформация выводов, нарушение герметичности корпуса и прочие неустраняемые дефекты;



Стандартные шаблоны выводов мощных реле, рассчитанных для пайки в печатные платы  
Рисунок 84

- печатные проводники от контактов реле должны иметь как можно большее сечение (ширину): это способствует не только меньшим потерям при протекании тока, но и отводу тепла от контактов реле;
- при необходимости иметь большое (то есть паспортное) напряжение изоляции между катушкой и контактами необходима тщательная разводка печатной платы. Между выводами катушки и контактов нежелательна проводка никаких проводников, контактные площадки контактов должны обеспечивать зазор между контактами не менее 2,5 мм для обеспечения высокой электрической прочности при коммутации напряжения 220 В;
- обязательно применение на плате защитной маски - маска помимо упрощения пайки повышает напряжение изоляции между соседними печатными проводниками.

Конструктор при выборе ширины печатного проводника должен руководствоваться не соображениями экономии места на плате, а данными рис. 85, показывающего перегрев печатных проводников при протекании тока. Графики составлены для толщины медного покрытия 35 мкм, по возможности следует применять фольгированные материалы с толщиной слоя меди 70 или даже 90 мкм. Хорошие результаты дает использование сдвоенных проводников с двух сторон платы. В таблице приведены предельные токи печатных проводников для разной толщины покрытия и разного исполнения проводников.



При протекании тока в проводнике выделяется тепло, что следует учитывать при разработке печатных плат  
Рисунок 85

Отметим, что часто применяемое на практике увеличение сечения печатного проводника путем нанесения на проводник слоя припоя не имеет смысла. Удельное сопротивление припоя Pb60-Sn40 примерно в 8-10 раз выше, чем у меди, поэтому слой припоя толщиной 100 мкм имеет в 2-3 раза более высокое сопротивление, что слой меди 35 мкм. В таком «слоеном»

проводнике через припой течет менее 25% общего тока и выигрыша почти нет. При этом теплопроводность припоя меньше, и тепло от медного проводника отводится плохо.

ПЕЧАТНЫЙ МЕДНЫЙ ПРОВОДНИК				
Максимальный ток, А	Толщина меди 70 мкм, ширина, мм		Толщина меди 35 мкм, ширина, мм	
	односторонний проводник	двусторонний проводник	односторонний проводник	двусторонний проводник
16	8	5	не допускается	не допускается
14	6.5	4	не допускается	не допускается
12	5	3	7.5	5
10	3.5	2	6	4
8	2.5	1	4	2.5
6	1.5	не применяется	2.5	1.5
4	1	не применяется	1.5	1
2	0.7	не применяется	1	не применяется

Хорошим способом увеличения рабочего тока печатного проводника является припаивание параллельно проводнику изолированного монтажного провода. Такой способ не очень технологичен, но дает возможность при недостатке места на плате соблюсти все правила работы с сильноточными цепями.

При разводке печатной платы необходимо устанавливать защитные диоды или RC-цепи непосредственно рядом с катушкой реле, в противном случае возможна наводка коммутационных помех на сигнальные цепи разрабатываемого устройства.

Последнее правило: при изготовлении печатной платы больших габаритов неизбежна деформация платы (прогиб) под действием собственного веса. Деформация платы ведет к появлению механических напряжений и повреждению корпуса реле, поэтому большая печатная плата должна быть снабжена необходимым количеством точек крепления.

## Рекомендации по подбору реле с требуемыми механическими параметрами

При работе над проектом инженеру приходится непрерывно согласовывать требующиеся для проекта параметры с техническими характеристиками конкретного реле. Именно поэтому в таблице большая часть параметров требует от инженера одновременно выбора (для соблюдения качественных показателей проекта) и проверки на соответствие с параметрами выбранного реле.

В любом случае подбор требуемого реле - это итерационный процесс, при котором качественным показателям и экономическим факторам уделяется примерно равное внимание.

МЕХАНИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР РЕЛЕ	РАБОЧАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА	ВЫБОР	ПРОВЕРКА
КОРПУС	габариты	✓	✓
	степень защиты от пыли и воды		
	тип выводов реле		
СПОСОБ МОНТАЖА	возможность пайки выводов реле		✓
	наличие и тип монтажных панелек		
	возможность монтажа в любом положении		
ИЗОЛЯЦИЯ	напряжение изоляции катушка-контакты		✓
	напряжение изоляции контакт-контакт		
	напряжение изоляции катушка (контакты)-корпус (для реле в металлическом корпусе)		
	категория изоляции и возможность работы в загрязненных средах		
УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	окружающая температура	✓	✓
	влажность воздуха		
	корродирующие газы		
	вибрации и удары		
	образование конденсата (требуется герметичный корпус реле)		
ПРОЧИЕ ТРЕБОВАНИЯ	соответствие требуемым стандартам	✓	✓
	специальные требования по механической прочности		
	требуемый механический ресурс		
	требуемый электрический ресурс		

## **ХРАНЕНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА РЕЛЕ**

На заводе после окончания тестирования реле упаковывают, помещают на склад и затем подготавливают к отгрузке потребителю. На заводе знают, как хранить и перевозить реле, но после транспортировки реле хранятся на складе заказчика или коммерческой фирмы. В связи с тем, что реле - хрупкое электромеханическое устройство, инженерам и технологам необходимо изучить основные правила хранения и транспортировки реле.

### **Упаковка и транспортировка реле**

Собственными транспортными средствами и обученными экспедиторами обладают лишь немногие производители и продавцы реле, поэтому упаковка реле заранее должна быть продумана и рассчитана на (к сожалению, традиционное) неаккуратное обращение при перевозке обычными транспортными компаниями.

В дополнение к заводской упаковке реле при транспортировке должны быть максимально защищены от ударов. Заводская упаковка реле не всегда рассчитана на защиту от сильных ударов, поэтому минимум, что следует делать при перевозке реле - это помещать заводские упаковки в прочные многослойные гофрокартонные коробки. Лучшие результаты по прочности и защищенности от ударов получаются, когда гофрокартонные коробки проложены внутри вспененным полиуретаном (пенопластом). Гофрокартон очень хорошо демпфирует все внешние воздействия, но легко размокает от дождя и даже тумана, теряя при этом прочность. Об этом следует помнить, планируя упаковку при доставке реле на большие расстояния.

На транспортной таре для реле необходимо помещать международные знаки и надписи, предупреждающие о хрупком грузе: опыт показывает, что с такими грузами всегда обращаются аккуратнее, чем с немаркированными.

При хранении реле на складе у заказчика не следует вынимать реле из заводской упаковки.

## **Хранение реле**

Условия хранения реле ничем не отличаются от правил хранения электронных компонентов. Как правило, для реле температура при хранении допускается в более широких пределах, чем при эксплуатации. Следует избегать хранения реле при высоких температурах, вблизи радиаторов отопления, с засветкой солнечными лучами и т.д.

При хранении реле необходимо убедиться в отсутствии в воздухе склада корродирующих газов (например, вблизи котельных, гаражей и автостоянок в воздухе всегда много сульфидов). Совершенно недопустимо хранить реле в сырых складских помещениях или в одной комнате с изделиями бытовой и производственной химии (моющими средствами, аэрозолями и т.д.). Желательно уложить заводские упаковки реле в герметичные пакеты из полиэтилена, поместив в каждый пакет влагопоглотитель (силикагель). Такая упаковка стоит дороже, но гарантирует высокую сохранность всех рабочих параметров реле.

Особенно внимательно необходимо отнестись к упаковке и хранению реле, поставляемых вместе с оборудованием и предназначенных для использования в качестве запасных частей. Эти реле перед началом эксплуатации могут находиться на складе до 10...15 лет, в течение которых они должны сохранить все рабочие характеристики.

Следует помнить, что при хранении мощных реле контакты покрываются пленками оксидов и сульфидов. Избежать появления оксидов удастся в герметичных реле, но в любом случае после хранения на складе более одного года перед установкой реле в оборудование рекомендуются следующие очень простые профилактические работы:

- внешний осмотр реле на предмет наличия повреждений корпуса, изгибов и коррозии выводов;

- для реле в прозрачных корпусах - внешняя проверка состояния контактов;
- выборочное тестирование реле (только функциональное, на предмет состояния контактов и целости катушки, ток контактов при тестировании не более 100 мА/24 VDC). Обычно достаточно проверки одного реле из заводской упаковки, но не менее 10% всех хранившихся на складе реле.

После хранения реле на складе более трех лет рекомендуется тестирование всех реле.

## **Установка реле в оборудование**

При установке в оборудование с реле следует обращаться, как с прецизионным устройством точной механики. Основные правила работы с реле уже были перечислены выше, но можно добавить некоторые рекомендации, данные опытными практиками:

- при монтаже реле на панельках (цоколях) в электротехнических шкафах или другом оборудовании рекомендуется устанавливать реле в панельки только после окончания сборочных работ и проверки монтажа - это дает возможность избежать случайных и неизбежных при монтаже ударов и вибраций;
- каждое реле перед установкой в оборудование желательно 5...10 раз включить и выключить, нагрузив контакты током 100...200 мА: это позволит провести эффективную электрическую и механическую очистку контактов перед началом испытаний оборудования;
- каждое реле для ответственных проектов должно пройти тренировку с нахождением катушки под током более 24 часов для проверки на случайные отказы, выявляющиеся только при нагреве катушки. Альтернативным вариантом является заказ такого тестирования на заводе-производителе;
- при пайке реле в печатные платы желательно согласовать весь процесс с технологами завода-производителя, начиная от температуры пайки и состава припоя до допустимых флюсов и промывочных составов. Это особенно важно для массового производства, где только отлаженная технология может обеспечить массовую надежность.

Более полное тестирование реле могут себе позволить далеко не все производственники. Указанные выше операции позволяют устранить ранние отказы реле (остроумно называемые в американской литературе «детской смертностью») и гарантировать безотказную работу оборудования, начиная с первого же включения.

Для проведения тестирования лучше всего применять специальные релейные тестеры, часто работающие совместно с компьютером и позволяющие максимально автоматизировать тестирование. Распространенной практикой является разработка и применение потребителем реле собственных тестовых приборов на базе промышленных источников питания и измерительных приборов.

Некоторые производители реле изготавливают и предлагают клиентам упрощенные модели релейных тестеров для проверки параметров реле каких-то определенных типов - в этом случае потребителю при более или менее массовом применении реле проще всего купить именно такой тестер.

## Выводы

Таблица показывает детали производственного процесса, на которые следует обратить внимание конструктору и технологу при хранении, перевозке и монтаже реле.

	НА ЧТО НЕОБХОДИМО ОБРАТИТЬ ВНИМАНИЕ	ПРОВЕРКА
<b>УПАКОВКА РЕЛЕ</b>	сохранность заводской упаковки	✓
	соответствие маркировки на упаковке и на реле	
	дата выпуска реле	
<b>ТРАНСПОРТИРОВКА РЕЛЕ В ОТДЕЛЬНОЙ УПАКОВКЕ</b>	наличие дополнительной упаковки для перевозки	✓
	дополнительная защита от влаги и ударов	
	групповая тара - надежность и влагостойкость	
<b>ТРАНСПОРТИРОВКА РЕЛЕ В СОСТАВЕ ОБОРУДОВАНИЯ</b>	соответствие предельным условиям по каталогу реле (температура, влажность, вибрации)	✓
	реле на панельках: допустимость по транспортным вибрациям и ударам	
	общая защита оборудования: не хуже, чем для отдельно транспортируемых реле	
<b>МОНТАЖ РЕЛЕ</b>	организация рабочего места	✓
	подготовка персонала	

## ПРОИЗВОДСТВО НАДЕЖНЫХ РЕЛЕ

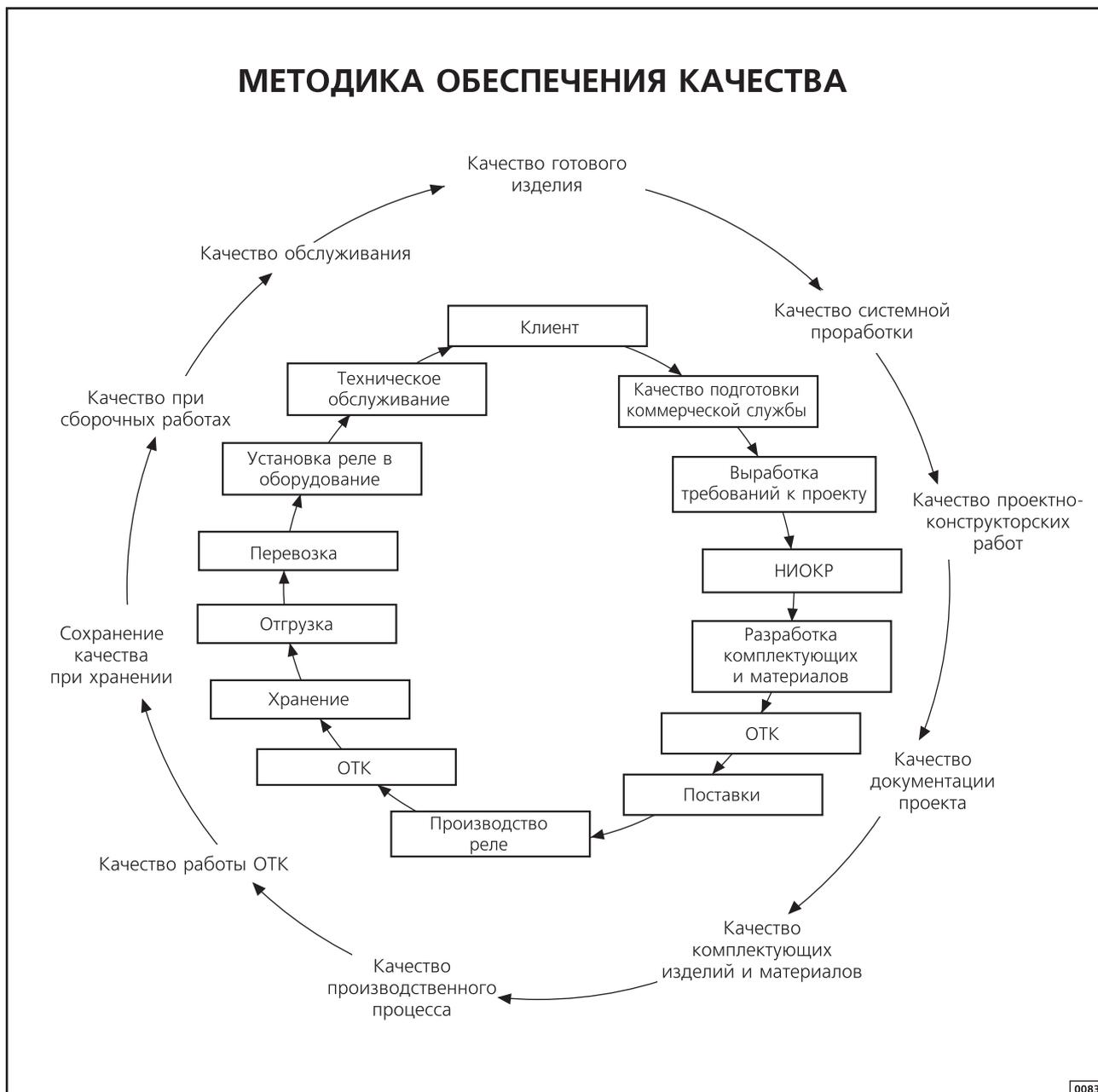
### Что такое надежность

Для инженеров-разработчиков полезно знать основы производства надежных реле. Как и при любом экономическом процессе, разработка, изготовление, сбыт и эксплуатация реле должны быть включены в систему с обратными связями, позволяющими выпускать изделия с требуемым и прогнозируемым качеством.

Такой производственный цикл показан на рис. 86, представляющем собой иллюстрацию системы обеспечения качества по стандарту ISO9000. Система ISO9000 упорядочивает цикл мероприятий, направленных на исключение возможности производства некачественной продукции на всех циклах разработки и производства. Поскольку выявить недостатки и найти их причину можно только при наличии правильно ведущейся технической документации, главное внимание системы ISO9000 направлено на ведение текущей отчетности на всех этапах производства. Только наличие документации позволяет проводить статистические исследования надежности и устранять возможные недостатки до момента их появления.

Фактически сертификация по системе ISO9000 означает введение квалифицированного технического и организационного контроля на всех участках производства. Отметим, что система ISO9000 допускает появление брака на любых этапах производства, но не позволяет некачественной продукции перейти на следующий этап.

Иными словами, внедрение системы ISO9000 при производстве реле делает невозможной отгрузку потребителю бракованной продукции: весь выявленный брак не покидает территории предприятия.



«Колесо жизни» реле:  
от проектирования до эксплуатации  
Рисунок 86

## Аспекты качества реле

Качество реле включает в себя такие критерии, как:

- надежность готового изделия - способность сохранять рабочие параметры на протяжении всего периода эксплуатации и при

- воздействии мешающих факторов;
- разработка изделия - комплекс научных исследований и проектно-конструкторских разработок (НИОКР), направленных на разработку конструкции и технологии производства реле;
  - надежность производства - соответствие условий производства требованиям НИОКР;
  - надежность хранения - для избежания потери качественных параметров при хранении реле на складе и при транспортировке;
  - правильность эксплуатации - соответствие эксплуатационных параметров паспортным характеристикам реле.

Вопреки расхожему мнению о надежности как чисто производственном показателе, многие показатели надежности реле определяются потребителем. При неправильной эксплуатации реле может полностью потерять заложенную конструкторами заводскую надежность, поэтому разработка и эксплуатация реле включены в цикл надежности наравне с производством реле.

## **Надежность и качество при проектировании реле**

- своевременную техническую учебу и повышение квалификации разработчиков и конструкторов, что служит оперативному внедрению новых технологий;
- применение новых научных разработок в данной области;
- ведение проектно-конструкторских работ по продуманному плану с организацией стандартного оформления конструкторской и технологической документации;
- проверку и согласование работы между отдельными группами конструкторов;
- проведение математического и технического моделирования для выявления слабых мест проекта;
- изготовление и тестирование опытных образцов;
- коррекцию документации по результатам испытаний опытных образцов и анализ полученной статистической информации по надежности.

## Надежность и качество при производстве реле

На рис. 87 показаны основные операции обеспечения контроля качества на производстве. При производстве система ISO9000 ставит следующие условия выпуска надежной продукции:

- соответствие квалификации персонала требованиям технологического процесса;
- применение материалов и компонентов согласно требованиям конструкторской и технологической документации;
- регулярные сервисные и регламентные работы на производственном оборудовании;
- регулярная метрологическая поверка измерительного оборудования;
- правильная организация отделов технического контроля и т.д.



Качество контролировать необходимо: введение системы ISO9000 упрощает и производство надежных реле

Рисунок 87

Поскольку производство реле является массовым, то на основании статистического анализа отказов вырабатываются требования к тестированию деталей и узлов реле на разных этапах производства. Как правило, полное тестирование (по всем техническим показателям) проходят не все «коммерческие» реле, но проверке на соответствие основным характеристикам подвергаются все выпускаемые реле.

Инженерам необходимо помнить, что завод-производитель не может нести ответственности за несоблюдение потребителем правил хранения и транспортировки реле. На предприятиях, применяющих реле, необходимо проведение технической учебы для складского персонала, монтажников, настройщиков и всех лиц, связанных с применением и монтажом реле.

## Соответствие стандартам

Производитель реле может предлагать свои реле только на внутреннем рынке и сертифицировать реле только по своему национальному стандарту. Такое бывает редко и заводы-производители обычно сертифицируют реле по нескольким (так называемым «основным») международным стандартам:

**VDE, Германия**

**UL (Underwriters Laboratory), США**

**CSA (Canadian Standards Association), Канада**

**OVE, Австрия**

**Semko, Швеция**

**Demko, Дания**

**Nemko, Норвегия**

**SETI, Финляндия**

Соответствие стандарту обозначается значками на корпусе реле.

Во многих странах нет системы собственной сертификации реле и там признаются (одобряются) стандарты других (но не обязательно всех) стран. В России действует система стандартов ГОСТ, причем мощные реле для применения в промышленной и бытовой электротехнике являются предметом обязательной сертификации. Система ГОСТ признает другие национальные стандарты, но требует проведения испытаний на подтверждение требованиям ГОСТ.

Сертификация является обязательной составной частью системы ISO9000 и инженерам при подборе реле рекомендуется внимательно ознакомиться с предлагаемыми для выбранного реле сертификатами качества и соответствия стандартам.

В целом все национальные стандарты на реле похожи, но есть одно существенное различие. При получении сертификации из другого стандарта не обязательно соответствие *всем* пунктам этого стандарта. На практике это означает, что реле (как правило, производства стран третьего мира) с *частичным* сертификатом VDE или UL может пройти эту сложную сертификацию только, например, в плане соответствия механическому ресурсу.

В некоторых каталогах не указывается, что эта сертификация именно частичная, что приводит к недоразумениям при эксплуатации реле, которое по другим показателям может не соответствовать всем требованиям указанного стандарта. При разработках ответственного оборудования инженерам

необходимо получить у фирмы-производителя подтверждение о сертификации и объеме этой сертификации, в противном случае возможен выбор реле с непрогнозируемыми качественными показателями.

Разработчики должны помнить, что при производстве оборудования для экспорта все реле, установленные в оборудовании, должны иметь сертификацию или одобрение страны-покупателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### 1. **Electromagnetic Relay Handbook, NARM 1978**

Превосходный американский справочник, написанный профессионалами и для профессионалов. Последний раз издан частями в нескольких интернет-публикациях. Можно рекомендовать этот справочник всем, кто всерьез заинтересовался теорией и практикой электромагнитных реле.

### 2. **Moderne Relaischnik, Verlag Moderne Industrie, 1988**

Основы конструкции сигнальных и мощных реле. Книга написана в сухом академическом стиле и будет полезна тем, кто применяет сигнальные реле. Книга содержит интересные (причем сбывшиеся!) прогнозы быстрого роста производства мощных реле к началу XXI века.

### 3. **Power Relays, Vien, 1997**

Хорошее пособие для пользователей мощных реле. Подборка материалов и графиков для практического применения, основы теории и практики электромагнитных устройств.

### 4. **Справочник по электромагнитным реле, Москва, «Энергия», 1993**

Конструкции и параметры электромагнитных реле, производившихся в СССР с 1960-х до начала 1990-х годов. Обращает на себя внимание множество типов реле в военном исполнении и почти полное отсутствие коммерческих реле. Справочник может быть полезен для сравнения устаревших моделей «советских» реле с современными отечественными и импортными аналогами.

### 5. **Elektromechanische Bauteile: Kontakte. Industrie, Berlin, 1991**

Теория электрических контактов: материалы, технология, параметры. Анализируется надежность контактов в условиях перегрузки по току на примере реле и контакторов. Полезная книга для всех, кого интересуют мощные математические выкладки и стройные практические выводы, сделанные из математического анализа.