

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

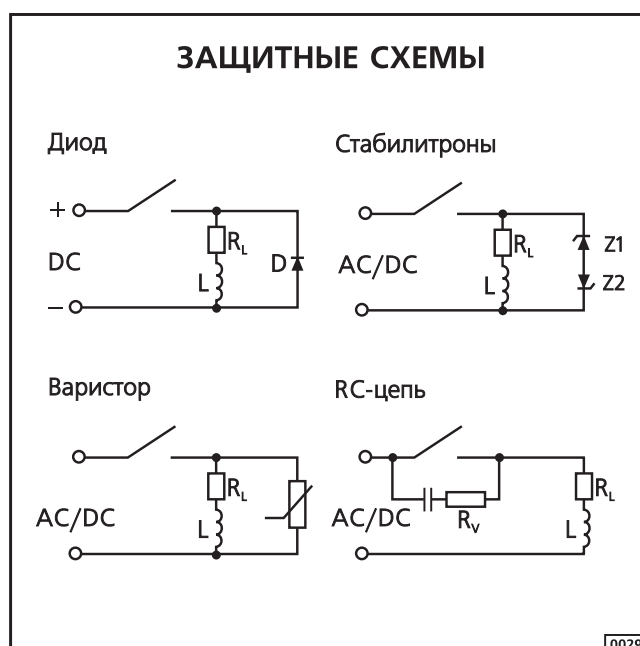
Искрогасящие цепи

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)

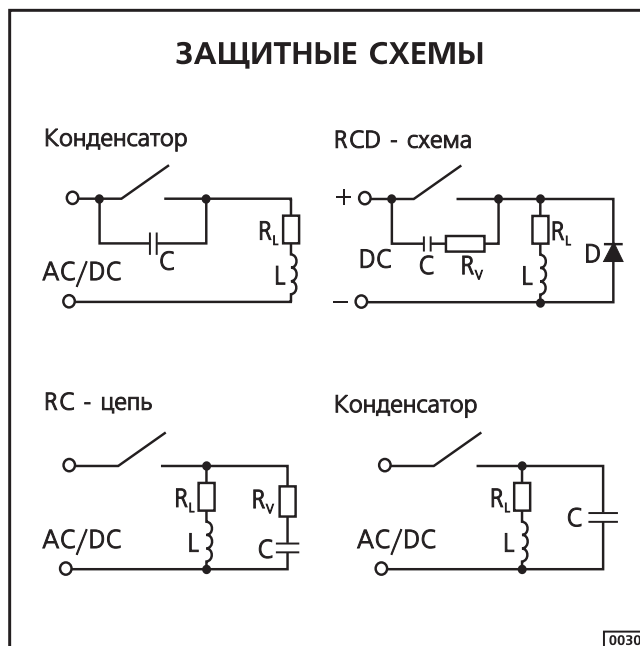
В отличие от диодных и варисторных схем RC-цепи можно устанавливать как параллельно нагрузке, так и параллельно контактам реле. В некоторых случаях нагрузка физически недоступна для монтажа на ней искрогасящих элементов, и тогда единственным способом защиты контактов остается шунтирование контактов RC-цепями.

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-



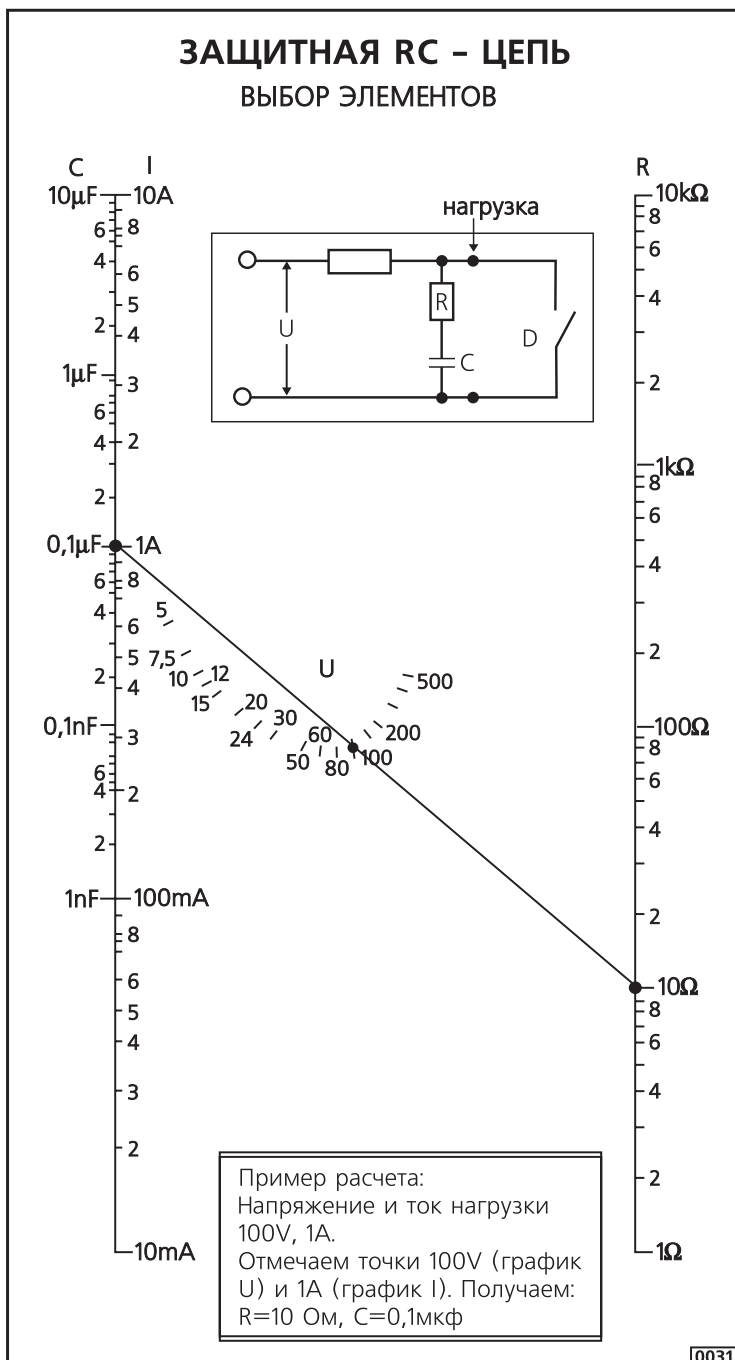
Защитные элементы можно включить как параллельно контактам, так и параллельно нагрузке
Рисунок 31

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

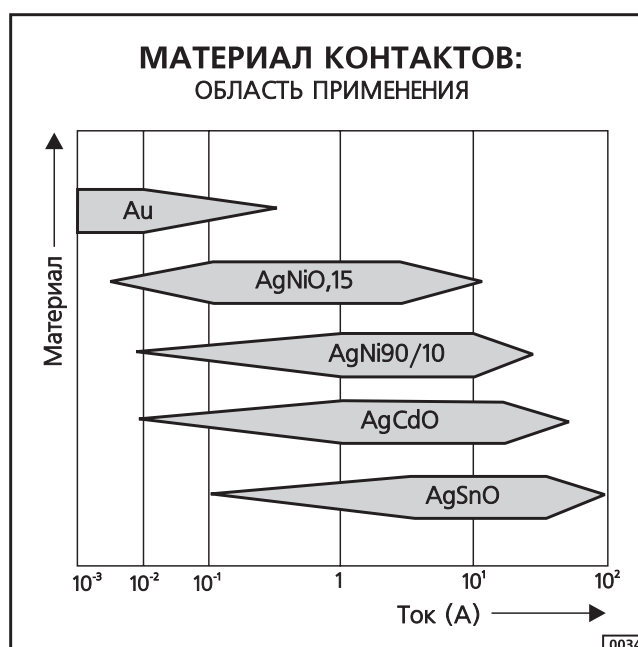
От материала контактов зависят такие параметры самих контактов и реле в целом, как:

- 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.