

Продолжение. Начало в № 3'2010

Электронная компонентная база силовых устройств

Часть 4.2

Продолжено рассмотрение применяемых в настоящее время пассивных компонентов для силовых устройств, в том числе трансформаторов, предохранителей, силовых электромеханических реле. Обзор дается для компонентов и отечественного, и зарубежного производства.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян, к. т. н.

sergera840@mail.ru

В работах [1–3] дан обзор и приведены характеристики активных силовых полупроводниковых компонентов для широко распространенных классов современных силовых устройств (СУ). При обзоре подчеркивается, что номенклатура пассивных компонентов для СУ очень велика [4], что обусловлено широким диапазоном рядообразующих параметров. Для иллюстрации этой тематики авторы ограничиваются обзором особенностей и основных параметров только некоторых из пассивных компонентов.

Продолжая обзор, рассмотрим:

- трансформаторы — низкочастотные и высокочастотные;
- предохранители — плавкие и восстанавливаемые;
- электромеханические реле.

Трансформаторы

Трансформаторы — более сложные моточные изделия, чем дроссели. Они бывают: однофазные и трехфазные, низковольтные и высоковольтные, низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ). НЧ-трансформаторы выполняются на броневых или П-образных витых сердечниках из электротехнической тонкой (0,35 мм и менее) стали. Ранее НЧ-трансформаторы широко использовались в трансформаторных источниках питания, работавших на низкой частоте (50, 60, 400, 500, 1000 Гц) [5]. Однофазные трансформаторы выпускаются на мощность до 1–2 кВА, реже до 3–5 кВА. С развитием импульсных источников питания с преобразованием на высокой частоте область применения НЧ-трансформаторов резко сузилась. Мощные НЧ-трансформаторы еще применяются в силовых установках (например, в устройствах для катодной защиты строительных и других объектов), в том числе в условиях с ограниченным доступом для обслуживания. Из серийных отечественных трансформаторов, поставки которых продолжаются, можно указать на трансформаторы серии ТПП, разработанные еще в 1970-х годах, а также на трансформаторы предприятия ООО «Транслед» (Великий Новгород), ре-

ализующего продукцию, например, через ЗАО «НПФ» ТИРС» [6].

Среди номенклатуры силовых однофазных трансформаторов ООО «Транслед» укажем для примера следующие:

- типа ТП с мощностью до 340 Вт, открытого исполнения, с напряжением изоляции 4000 Вэф;
- типа ТПП с мощностью до 240 Вт, герметизированные эпоксидным компаундом;
- типа ПКФЛ (ОСМ) с мощностью 10 Вт – 5 кВт, тороидальные, на заказ;
- типа RSTN с мощностью 50 Вт – 3 кВт (первичные напряжения 220, 230, 240, 380...525 В; вторичные напряжения — 24 В, 230 В).

Гораздо чаще фирмы — производители аппаратуры, для своих, часто нестандартных применений вынуждены заказывать изготовление таких трансформаторов: например, у того же ОАО «Транслед», у польской фирмы Elhand [7] или у других предприятий. Часто все же приходится самим производить мощные трансформаторы на стандартных покупных сердечниках. Так, в работе [8] описан высоковольтный импульсный источник питания большой мощности, в котором использован специально спроектированный высоковольтный трансформатор, работающий в импульсном режиме на частоте 250 Гц. Параметры импульса: период $T = 4$ мс, длительность $t_n = 0,5$ мс, скважность $q = 8$. Выходная мощность трансформатора: в импульсе — 12 кВт, средняя — 1,5 кВт. Другие характеристики трансформатора: вход — амплитуда напряжения 40–200 В, амплитуда тока — до 75 А; выход — амплитуда напряжения 10–35 кВ, амплитуда тока 20–370 мА. Нагрузкой трансформатора являются рентгеновские трубки БХВ-6 или БХВ-18.

Развитие преобразовательной техники, в частности импульсных источников питания, работающих на высокой частоте преобразования (десятки – сотни килогерц), привело к разработке и применению ВЧ-трансформаторов. Как правило, они выполняются на ферритовых сердечниках: кольцевых, П- и Ш-образных с прямоугольным, круглым или овальным керном. Используются также магнитопроводы специальных форм, английский вари-

ант обозначения которых — RM, EP, PQ, U и др. — с $\mu = 1000, 1500, 2000, 2500$. Крупным поставщиком ферритовых материалов в России является холдинг «Северо-Западная Лаборатория» ЗАО «ЛЭПКОС», который также является региональным представителем фирмы Magnetics. Параметры и номенклатуру ферритовых сердечников можно узнать на сайтах [9, 10]. Также могут применяться сердечники из аморфных металлических материалов фирмы «Гаммамет» [11].

Основные параметры трансформаторов:

- Общие (интегральные):
 - Габаритная мощность $P_{\text{габ}}$.
 - Рабочая частота f .
 - КПД, или η . Для двухобмоточного трансформатора [12] КПД определяется как $\eta = \frac{U_{2\text{эф}} \times I_{2\text{эф}}}{(U_{1\text{эф}} \times I_{1\text{эф}} + P_{\Sigma})}$, где $U_{2\text{эф}}$, $I_{2\text{эф}}$ и $U_{1\text{эф}}$, $I_{1\text{эф}}$ — эффективные значения напряжений и токов вторичной и первичной обмоток соответственно, а $P_{\Sigma} = P_{\text{м}} + P_{\text{ст}}$ — это суммарные потери мощности: $P_{\text{м}}$ — потери в меди обмоток, $P_{\text{ст}}$ — потери в стали (магнитопроводе).
 - Коэффициент трансформации $K_{\text{тр}} = \frac{U_{2\text{хх}}}{U_{1\text{хх}}}$, где $U_{1\text{хх}}$, $U_{2\text{хх}}$ — напряжения на первичной и вторичной обмотках на холостом ходу (хх).
- На первичной стороне (на входе):
 - Питающее напряжение U_1 (однофазное или трехфазное).
 - Входной (потребляемый) ток I_1 .
 - Ток холостого хода $I_{\text{хх}}$ (I_0) (контролируется при проверке изготовленных трансформаторов).
 - Активное (омическое) сопротивление первичной обмотки R_1 (контролируется при проверке изготовленных трансформаторов).
 - Индуктивность первичной обмотки $L_{\text{с1}}$ (контролируется при проверке изготовленных ВЧ-трансформаторов).
- На вторичной стороне (на выходах):
 - Выходные напряжения U_{2j} .
 - Выходные токи I_{2j} .
 - Активные (омические) сопротивления вторичных обмоток R_{2j} (контролируются при проверке изготовленных трансформаторов).

Дополнительно для ВЧ-трансформаторов могут контролироваться: индуктивность рассеяния $L_{\text{с1}}$ первичной обмотки, а также приведенные значения паразитных емкостей — $C_{\text{с1}}$ и проходной емкости C_{1-2} (между первичной и вторичной обмотками).

Несколько слов о проблеме унификации силовых трансформаторов. Известно, что серийное производство технологически сложных изделий на специально построенных и хорошо оснащенных заводах позволяет выпускать большими партиями новые изделия, в нашем случае трансформаторы, высокого качества и по приемлемой цене. Это объясняется тем, что эти унифицированные изделия были разработаны на высоком техническом уровне, с учетом использования новейшей технологии изготовления, улучшенных систем контроля параметров и автоматизированных стендов технологической тренировки

и других испытаний, в том числе и системы контроля качества и надежности выпускаемых изделий.

В советское время проблемам унификации различных приборов и изделий уделялось большое внимание. Дело в том, что выпуск унифицированных узлов и компонентов позволял значительно уменьшить номенклатуру производимых товаров, что приводило к экономии как материальных ресурсов, так и трудовых затрат. Например, для устройств с питанием от промышленной сети переменного тока были разработаны серии унифицированных трансформаторов и дросселей фильтров (указано выше). При этом были проведены научные исследования по оптимизации параметров и сочетаний вторичных обмоток. В результате исследований был получен оптимальный набор номинальных напряжений вторичных обмоток трансформаторов с помощью комбинаций соединений. Благодаря им можно было реализовывать стандартные постоянные напряжения для использования в аппаратуре систем электропитания РЭА, применяя различные схемы выпрямления.

Серийные однофазные трансформаторы типов ТА, ТН, ТАН, ТПП, первичные обмотки которых могли питаться от напряжения 127; 220 В частоты 50 Гц, начали выпускаться с середины 1960-х годов. Эти унифицированные ряды трансформаторов были рассчитаны на диапазоны по мощности: от 15 до 450 ВА (ТА); от 8,8 до 190 ВА (ТН); от 36 до 440 ВА (ТАН); от 1,65 до 200 ВА (ТПП). Например, трансформаторы серии ТПП имели 4 основные силовые обмотки напряжением из ряда 1,25; 2,5; 4; 5; 10; 20 В в зависимости от типоминимала. Кроме того, в каждом трансформаторе были две компенсационные обмотки напряжением из ряда 0,35; 0,65; 1,3; 2,6; 4; 5 В. Это позволяло разработчику источника вторичного электропитания оптимально рассчитывать напряжение на входе выпрямителя для получения более высокого КПД источников питания.

Когда появились ИВЭ на основе высокочастотных преобразователей, то делались попытки создания унифицированных высокочастотных силовых трансформаторов. Однако ведомственная разобщенность различных предприятий, которые входили в разные министерства, не позволила успешно решить эту проблему. Максимум, что удавалось сделать разработчикам, это проводить унификацию внутри одного направления техники или на уровне групп предприятий в рамках одного министерства. Например, в 1990 году под руководством одного из авторов (С. А. Эраносьяна) в НПО «Дальняя связь» был разработан ряд универсальных источников вторичного электропитания с питанием от сети постоянного напряжения 24, 27 и 60 В на мощность от 7,5 до 35 Вт, предназначенных для аппаратуры средств связи. В этих ИВЭ применялись унифицированные ВЧ-трансформаторы. Трансформаторы имели три габаритные модификации, которые устанавливались на унифицированные планарные основания, предусматривающие возможность автоматизированной установки трансформа-

торной сборки на печатную плату. Рабочая частота трансформаторов была 100 кГц, в качестве магнитопровода использовались сердечники марки М2000НМ1: К16×10×4,5 — для базовой мощности 7,5 Вт; К20×12×6 — для мощности 15 Вт; 2×К20×12×6 — для мощности 30 Вт.

В настоящее время как в России, так и за рубежом проблема унификации мощных силовых ВЧ-трансформаторов, работающих на частотах от 100 до 300 кГц, фактически не решается. Отдельные крупные фирмы, разрабатывающие мощные ИВЭ, по мере сил внедряют у себя на производстве элементы унификации, которые в основном касаются технологии изготовления трансформаторов и вопросов его монтажа на печатную плату; иногда в сферу унификации попадает и система обеспечения эффективного отвода тепла. В качестве примеров разработки ВЧ-трансформаторов приведем их основные параметры для некоторых разработок мощных ИВЭ. Отметим, что приведенные данные на силовые трансформаторы были рассчитаны и реализованы для одноконтных мощных преобразователей, частота которых была оптимизирована в результате проведения предварительных многократных расчетов силовых компонентов преобразователей, выполненных на основе методики сквозного расчета ИВЭ [12].

При этом первый пример касается силового трансформатора, рассчитанного для преобразователя квазирезонансного типа [13], частота которого была оптимизирована на основе методики сквозного расчета ИВЭ электрических параметров квазирезонансных преобразователей (КвРП), разработанной одним из авторов (С. А. Эраносьяном).

Второй пример относится к ВЧ-трансформатору для прямоходового ШИМ-преобразователя для ИВЭ, частота которого была оптимизирована по методике, приведенной в [12, 14].

Пример 1. Параметры силового ВЧ-трансформатора:

- Габаритная мощность — 1100 ВА.
- Максимальная частота работы — 125 кГц.
- Магнитопровод ПК20×16, феррит 2500НМС1 (производилась отбраковка сердечников на строгое соответствие параметрам по ТУ).
- Обмоточные данные: $W1 = 44$, намотка в 4 провода $\varnothing 0,63\text{мм}$; $W2 = 33$, намотка в 2 провода типа лицендрат ЛЭШО 500×0,05 мм.
- Активные сопротивления обмоток: $R_{W1} = 0,067 \text{ Ом}$ с учетом скин-эффекта; $R_{W2} = 0,024 \text{ Ом}$.
- Потери в трансформаторе: $P_{\Sigma} = 12 \text{ Вт}$, в том числе $P_{\text{м}} = 5 \text{ Вт}$, $P_{\text{ст}} = 7 \text{ Вт}$ при $\Delta B = 0,12 \text{ Тл}$.
- Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\text{с1}} = 16 \text{ мкГн}$, обеспечивается специальной топологией намотки обмоток.

Пример 2. Параметры силового ВЧ-трансформатора:

- Габаритная мощность — 1400 ВА.
- Рабочая частота — 200 кГц.
- Магнитопровод ПК30×16, феррит 2500НМС1.
- Обмоточные данные: $W1 = 68$, намотка в 2 провода типа лицендрат ЛЭШО 49×0,2мм;

$W_2 = 22$, намотка в 2 провода типа лицен-
драт ЛЭШО 175×0,1 мм.

- Активные сопротивления обмоток: $R_{W1} = 0,077$ Ом; $R_{W2} = 0,009$ Ом.
- Потери в трансформаторе: $P_{\Sigma} = 11$ Вт, в том числе $P_M = 7$ Вт, $P_{ct} = 4$ Вт при $\Delta B = 0,06$ Тл.

Предохранители

Несмотря на наличие встроенной защиты по току в пусковых автоматах (по максимальному току), а также различных узлов электронной и тепловой защиты в СУ, плавкие предохранители всегда должны использоваться. Это связано с тем, что автоматы и контакторы до момента отключения цепи пропускают импульсы тока большой величины, которые способны вывести из строя полупроводниковые ключи (диоды, транзисторы) или связанные с ними цепи. В то же время плавкие предохранители ограничивают импульс тока КЗ цепи, и поэтому выделяющаяся при этом энергия меньше [15].

Дополнительно укажем, что всегда существует вероятность пробоев и КЗ в различных частях схемы СУ вне традиционных мест установки узлов и компонентов электронной защиты. Также важно, что при сгорании плавкого предохранителя физически разрывается силовая цепь (особенно по сети переменного тока). Тем самым одновременно обеспечиваются условия как по пожаробезопасности, так и по электробезопасности.

Предохранители классифицируются по назначению, быстродействию, степени восстановления (невосстанавливаемые и восстанавливаемые — polyfuse, polyswitch), по конструктивному исполнению (силовые цилиндрические, миниатюрные, субминиатюрные, SMD-типа) и т. д. В настоящее время для промышленных предохранителей используется система классификации, включающая в себя 7 основных групп (типов) предохранителей: gG, aM, aR, gR, gT, gB, gRL [15]:

- aM — предохранители для защиты электродвигателей и кабелей;
- aR — предохранители для защиты полупроводниковых приборов от коротких замыканий;
- gB — быстродействующие приборы общего применения, пригодные для эксплуатации в шахтном оборудовании;
- gG — универсальные предохранители широкого применения для защиты трансформаторов, конденсаторов и т. д. (применяются взамен устаревших типа gL);
- gR — предохранители для защиты полупроводниковых приборов, в основном на токи менее 100 А;
- gRL — предохранители для защиты одновременно полупроводниковых приборов и кабелей;
- gT — предохранители для защиты силовых трансформаторов.

По быстродействию стандартизированные (IEC 60127) предохранители делятся на следующие классы (группы):

- ультрабыстродействующие предохранители — FF (very quick action);

- быстродействующие предохранители — F (quick action);
- предохранители с малой задержкой срабатывания — M (medium time lag);
- предохранители со средней задержкой срабатывания — T (time lag);
- предохранители с большой задержкой срабатывания — TT (long time lag).

Предохранители групп FF и F используются для защиты устройств от кратковременных скачков с большой амплитудой в цепях, где отсутствуют скачки при включении или пульсирующие токи. Предохранители групп time lag используются в цепях с емкостной и индуктивной нагрузкой, где присутствуют переходные процессы при включении и выключении, броски и импульсы тока.

Основные параметры предохранителей [15, 16]:

- номинальный ток срабатывания;
- номинальное напряжение;
- мощность рассеивания;
- быстродействие, точнее — характеристика время/ток;
- падение напряжения.

Номинальный ток срабатывания — это ток, при котором плавкий элемент перегорает и размыкает цепь. Однако, рассматривая различные стандарты предохранителей, можно выделить две группы: стандарты UL (Underwriters Laboratory, США), разработанные совместно с CSA (Canadian Standards Association, Канада), и стандарты IEC (International Electrotechnical Commission, Европа). Наиболее применяемыми стандартами этих организаций являются: UL 248-14, CSA 248.14 и IEC60127. Несмотря на то, что обе группы документов имеют много общего при описании физических размеров и материалов, используемых при производстве предохранителей, вместе с тем имеются существенные отличия при определении зависимости времени срабатывания плавкого элемента от протекающего тока. Для первой группы номинальный ток рассчитывается как ток, при котором предохранитель должен в итоге перегореть, в то время как предохранители, выполненные по стандарту IEC60127, будут работать продолжительное время. Именно это несоответствие и не позволяет выпускать предохранители, полностью соответствующие обеим группам стандартов.

Номинальное напряжение предохранителя — максимальное напряжение, при котором предохранитель будет гарантированно прерывать аварийный ток в соответствии с выбранным номиналом. Номинальное напряжение предохранителя и его держателя нормируется для режима среднеквадратичного (эффективного) значения переменного синусоидального напряжения на частоте 50 Гц. Номинальные рабочие напряжения предохранителей: 32/65, 125, 250, 440/450, 500, 700 В и более. Мощность рассеивания — мера тепловой энергии, которая рассеивается под воздействием протекающего номинального тока. Мощность рассеивания (по стандарту IEC) определяется за период времени работы предохранителя в течение 1 часа под током в 1,5 раза боль-

шим, чем номинальный (условный, не расплавляющий перемычку). Если предохранитель используется совместно с держателем, то мощность рассеивания держателя должна соответствовать мощности рассеивания предохранителя. Типовые значения мощности держателей — 1,6; 2,5; 3,2 и 4 Вт.

Быстродействие предохранителя можно определить по характеристике время/ток, то есть по зависимости интервала времени, через которое произойдет разрыв цепи, от тока, протекающего через предохранитель (отношения аварийного тока к номинальному). Время перегорания предохранителя включает период нагрева и плавки рабочего элемента под воздействием конкретного значения тока. Известно, что энергия, которая выделяется в резистивном элементе при протекании тока и вызывает его нагрев (с последующее перегоранием), определяется выражением $E = I^2 R t$. Отсюда следует, что $t = (E/R)/I^2$, то есть время перегорания предохранителя, обратно пропорционально квадрату протекающего тока. Обычно зависимость время/ток выражается графиком (в логарифмическом масштабе), на котором по оси абсцисс откладывается отношение токов, по оси ординат — время. Так, для миниатюрных предохранителей с номинальным током 40 мА – 5 А времятоковая характеристика $t = f(kI_{\text{пр ном}})$ выглядит следующим образом: $t_{1\text{min}} = 1\text{ч} \leftarrow 1,5I_{\text{пр ном}}$; $t_{2\text{max}} = 2\text{мин} \leftarrow 2,5I_{\text{пр ном}}$; $t_3 = 150\text{ мс (min)} \dots 2\text{ с (max)} \leftarrow 4I_{\text{пр ном}}$; $t_4 = 20\text{ мс (min)} \dots 150\text{ мс (max)} \leftarrow 10I_{\text{пр ном}}$.

Допустимое падение напряжения на элементе должно соответствовать стандарту и приводиться в числе характеристик как максимальное падение напряжения при номинальном токе. При использовании схем с малым током и малым напряжением питания необходимо учитывать этот параметр: рекомендуемое падение напряжения на предохранителе должно быть по крайней мере в пять раз меньше номинального напряжения питания цепи. Очень важно учитывать температуру окружающей среды непосредственно около предохранителя (1 см). Для предотвращения преждевременного перегорания предохранителя окружающая температура не должна превышать +70 °С.

Рассмотрим для примера предохранители компании Wickmann [17]. Компания выпускает предохранители: fast-acting и time lag, миниатюрные (miniature fuses) и субминиатюрные (SM). Миниатюрные предохранители широко применяются с 30-х годов XX века. Они представляют собой стеклянную или керамическую трубку с контактами на торцах, размером 5×20 и 6,3×32 мм. Группа субминиатюрных предохранителей включает семейства TR5, TR3, TE5 и pico fuse. Эти предохранители имеют очень малые размеры и наилучшим образом подходят для устройств управления силовой аппаратуры, устройств обработки данных и других применений модулей с малыми печатными платами. SM-предохранители построены на технологии, основанной на тонких металлических пленках, и широко применяются в мобильных устройствах. Blade-type-предохранители с начала 1970-х

годов широко используются в автомобилестроении. Использование для выводов специального медного сплава позволяет добиться самого низкого сопротивления и самой низкой рабочей температуры для данного типа предохранителей. Благодаря малой стоимости и удобству в эксплуатации, они получили популярность во многих приложениях, использующих малое напряжение питания и токи от единиц до сотни ампер.

Использование самовосстанавливающихся предохранителей polyfuse позволяет снизить время на восстановление и облегчить разработку и обслуживание устройств. Эти предохранители выполнены на материалах (полимерах) с положительным температурным коэффициентом. Благодаря этому при возникновении аварийной ситуации полимер, имеющий кристаллическую решетку с токопроводящими цепочками, переходит в аморфное состояние, при этом увеличивается сопротивление предохранителя, что препятствует прохождению большого тока. Предохранитель остается в таком состоянии до тех пор, пока находится под воздействием факторов, вызвавших срабатывание. После остывания полимера он восстанавливает свои свойства и снова готов к работе. Предохранители polyfuse оптимально подходят для защиты низковольтных цепей до 60 В.

Можно также указать, например, на быстродействующие предохранители фирм Teco Electronics [18] и самовосстанавливающиеся предохранители серий 1812L и 60R фирмы Littlefuse [19]. Предохранитель типа 1812 L050 при токе 8 А за время срабатывания 0,15 с изменяет свое сопротивление с 0,1 до 1 Ом. Приведем и другие параметры этого предохранителя: номинальный ток — 1 А, номинальное напряжение — 15 В, максимальный ток — до 40 А, рассеиваемая мощность — 0,8 Вт.

Немецкая компания SIBA выпускает широкую номенклатуру предохранителей, как миниатюрных, SMD-типа, так и силовых: цилиндрических и других [20]. Ультравысокоскоростные предохранители (FF) компании SIBA срабатывают очень быстро: при 10-кратном превышении номинального тока перегорание плавкой вставки осуществляется в течение нескольких миллисекунд [16]. Отметим, что предохранители производства различных компаний могут иметь разные разрывные свойства. В частности, компания SIBA производит предохранители класса FF с разрывной способностью до 300 кА. Быстродействующие предохранители (F) способны защитить оборудование и от сверхтоков, и от КЗ. Время срабатывания таких предохранителей при 10-кратной перегрузке — порядка 10 мс, то есть в несколько раз больше, чем у предохранителей класса FF. Время срабатывания предохранителей со средней задержкой (класс T) при 10-кратной перегрузке — порядка 100 мс, что на порядок больше, чем у предохранителей класса F.

Цилиндрические предохранители SIBA выпускаются 6 различных габаритов. Они могут оснащаться индикатором состояния (работа или перегорание) или микропереключателем. Дополнительно поставляются держатели и ак-

сессуары. Предохранители выпускаются по европейским стандартам IEC 60269-1 (-4), DIN VDE 0636-23 класса gR/aR/gRL. Номинальный ток — 125 мА – 200 А, разрывной ток — до 300 кА. Размеры в зависимости от рабочего напряжения: 5×20 мм — 250 В переменного тока (AC); 6,35×32 мм — 500–1000 В AC; 10×38 мм — 600–1000 В AC; 14×51 мм — 500/600–690/700 В AC; 22×58 мм — 500/600 – 690/700 В AC; 27×60 мм — 660–1000 В AC.

Предохранители этой компании для защиты цепей постоянного тока выпускаются в вариантах зажимного и винтового крепления. Эти приборы предназначены в первую очередь, для работы на транспортных средствах, в цепях аккумуляторных батарей и на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог. Широко используются для защиты преобразователей частоты. Предохранители этого типа разработаны для эксплуатации в тяжелых условиях, устойчивы к ударам и вибрации, могут производиться по спецификациям заказчика, проходят индивидуальное тестирование постоянных времени. Другие данные: класс — gR/aR; рабочее напряжение — от 660 до 5000 В постоянного тока (DC); номинальный ток — от 6 до 800 А. Стандарты: UIC 550, IEC 60269-4, DIN VDE 0636-40.

Предохранители SIBA для защиты электродвигателей выпускаются по немецкому (DIN) и британскому стандартам. Разнообразные сочетания габаритов, типов крепления и электрических параметров позволяют создавать защитные системы практически для любых двигателей. Приборы обладают высокой устойчивостью к циклическим и пиковым нагрузкам и практически свободны от эффекта старения. Малые потери в рабочем режиме определяют малый нагрев предохранителей при монтаже в корпусах небольших объемов. Рабочие перегрузочные токи могут достигать 3,5-кратных значений номинального тока. Для этих приборов выпускаются ограничители температуры. Другие сведения: стандарты: DIN 43625, BS 2692 (габаритные), IEC 60644, IEC 60470, IEC 60282-1 (электрические); класс Back up; рабочее напряжение — 3,6–7,2 кВ AC; номинальный ток — 50–315 А. Защита двигателей — согласно IEC 60644.

Высоковольтные предохранители (SIBA HV) предназначены для распределительных станций открытого типа, с газовой и/или воздушной изоляцией. Эти предохранители выполнены на основе параллельно соединенных плавких элементов из серебра. Они намотаны на керамический держатель и присоединены к серебряным пластинам выводов посредством точечной сварки. В свою очередь пластины размещены в посеребренных медных чашках выводов и также присоединены к ним точечной сваркой. Чашки выводов запрессованы на концах керамической трубы с глазурованной внутренней и наружной поверхностью, а стыки металл-керамика дополнительно защищены герметиком. Такая конструкция обеспечивает малый разброс характеристик срабатывания, хорошую влагозащищенность и высокую надежность. Другие данные: рабо-

чее напряжение — 7,2–36 кВ; номинальный ток — 6,3–500 А; разрывной ток — до 63 кА.

Термопредохранители

Особое место занимают термопредохранители, представляющие собой компактные и надежные элементы, созданные специально для защиты от воспламенения бытовой техники и промышленного электрического оборудования. Когда температура в месте размещения такого предохранителя увеличивается до недопустимого значения, происходит разрыв электрической цепи. В термопредохранителях на основе нитевидного легкоплавкого проводника (Alloy type Thermal Cutoff) последний при превышении окружающей температуры перегревается и плавится, в результате чего происходит разрыв электрической цепи. В термопредохранителях на основе термотаблетки (Pellet type Thermal Cutoff) она плавится, переставая сдерживать пружину сжатия. Расплавление пружины сжатия вызывает распрямление размыкающей пружины, что и приводит к размыканию контакта цепи. В [21] представлены термопредохранители фирм AUPO Electronics и NEC (Япония) / SHOTI (Таиланд). Приборы различных серий рассчитаны на температурный диапазон «срабатывания» 73...240 °C и токи размыкания (разрыва) защищаемой цепи 1–16 А. Конструктивно они имеют радиальные или аксиальные выводы. Приведем для примера основные характеристики термопредохранителей SF/E серии производства фирмы NEC:

- Температурный диапазон срабатывания (дискретно 14 типономеров) — 73...240 °C, точность срабатывания — 2–3 °C.
- Номинальное напряжение — 250 В (AC), номинальный ток 10 А (AC); аксиальные выводы.

Электромеханические реле

Силовые электромеханические (в некоторых источниках электромагнитные — ЭМ) реле и другие автоматические коммутирующие устройства (ЭМ-контакты, пускатели/автоматы включения) применяются для штатного включения/выключения (пуска/отключения) СУ. Также при их посредстве происходит аварийное отключение в нештатных ситуациях и последующее включение после устранения причин аварий: перегрузки по току и мощности, перегрев, недопустимые изменения питающего напряжения, механическое заклинивание вала в электроприводах и др. ЭМ коммутирующие устройства не потеряли своего значения в наши дни и не потеряют его в будущем. Хотя отметим, что в прошлом не раз выдвигались предположения, что с развитием силовых полупроводниковых компонентов (тиристоров, MOSFET, IGBT), их значение и объемы применения будут неуклонно падать. Такие прогнозы основывались на сравнительно небольшой в то время долговечности (число циклов срабатывания) контактной группы, обусловленной использованными в ней электромеханическими элементами. А у полупроводниковых ключей и реле на их

основе количество срабатываний было практически ограничено только их календарным сроком службы (в среднем 12–15 лет).

Но при развитии силовой техники выяснился ряд важных обстоятельств. Во-первых, в ряде применений (военная техника, аппаратура для атомной промышленности) в условиях ионизирующих излучений, особенно повышенной интенсивности, токи утечки в закрытых полупроводниковых ключах существенно возрастают. Поэтому не обеспечивается необходимая надежность некоторых технических устройств. Во-вторых, и в указанных областях, и в другой промышленной аппаратуре и оборудовании, особенно при работе в неблагоприятных климатических условиях, повышенная (до +50...60 °С) или пониженная (до -40...-50 °С) температура. При этом не только снижается надежность, но и происходит снижение норм электробезопасности: значительно увеличивается ток утечки, что эквивалентно снижению сопротивления изоляции. С другой стороны, в условиях конкуренции фирмы — производители ЭМ-реле и контакторов вынуждены были существенно увеличить число срабатывания контактов (у некоторых типов силовых реле — до 10⁷ циклов (см. таблицу), а также повысить защищенность от неблагоприятных климатических воздействий. Кроме того, ЭМ-реле, по сравнению с полупроводниковыми коммутирующими устройствами, имеют следующие дополнительные преимущества:

- Большое число конфигураций контактов.
- Устойчивость к перегрузкам и коротким замыканиям.
- Низкое контактное сопротивление, которое, как правило, ниже сопротивления открытого полупроводникового перехода; поэтому даже при коммутации больших нагрузок не требуются дополнительные устройства охлаждения.
- Постоянная мощность управляющей цепи, не зависящая от коммутируемой нагрузки.
- Высокая устойчивость к воздействию внешних магнитных и электрических полей.
- Меньшие габариты по сравнению с полупроводниковыми аналогами при больших коммутируемых нагрузках.

• В ряде случаев — меньшая стоимость по сравнению с полупроводниковыми аналогами.

В итоге реле и контакторы остались «полноправными» силовыми компонентами.

Основные характеристики ЭМ-реле общего назначения:

- Контактная группа:
 - максимальная разрывная мощность на контактах $P_{к\ max}$;
 - максимальное напряжение постоянного или переменного напряжения на незамкнутых контактах $U_{к\ max}$;
 - максимальный постоянный или переменный ток $I_{к\ max}$;
 - контактное сопротивление замкнутых контактов $R_{к}$.
- Катушка (обмотка) управления:
 - мощность управления P_0 ;
 - напряжение питания U_0 ;
 - сопротивление обмотки (обмоток) R_0 .
- Параметры быстродействия:
 - время срабатывания $t_{сраб}$;
 - время отпущения $t_{отп}$.
- Параметры электроизоляции:
 - напряжение изоляции $U_{изол\ к-к}$ между контактами (в незамкнутом состоянии) и между контактами и обмоткой;
 - сопротивление $R_{изол\ к-к}$ между контактами (в незамкнутом состоянии) и между контактами и обмоткой.

Номенклатура выпускаемых в мире ЭМ-реле очень широка. Поэтому в рамках настоящей статьи, в которой идет речь о нескольких видах пассивных компонентов, возможно только фрагментарное изложение информации о параметрах и особенностях применения реле. Отечественные реле, разработанные еще во времена СССР и выпускаемые до сих пор, хорошо известны. Реле электромагнитные низкочастотные серий РПК, РПС, РЭК, РЭС и высокочастотные серий РПА, РЭА предназначены для применения в различных отраслях промышленности и техники и выпускаются в соответствии с ГОСТ 16121-86 [22]. Под слаботочными ЭМ низкочастотными реле подразумеваются реле, питаемые (управляемые) постоянным или переменным током номинальной частотой 50

или 400 Гц и предназначенные для коммутации (замыкания, размыкания, переключения) электрических цепей при нагрузке на одну контактную группу, не превышающей: на постоянном токе 25 А, 300 В, 750 Вт, а на переменном токе (частотой до 20 кГц) 25 А, 380 В эф.ф., 3000 В·А. Низкочастотные слаботочные электромагнитные реле обеспечивают коммутацию электрических сигналов с частотами до 100–1000 Гц при соответствующем уменьшении нагрузки. Высокочастотные слаботочные реле предназначены для коммутации сигналов с частотами свыше 1000 Гц.

Реле статические серии РВЭ с нерегулируемыми (фиксированными) выдержками времени предназначены для применения в различных отраслях промышленности и техники и выпускаются в соответствии с ГОСТ 16120-86 [23].

В промышленной аппаратуре автоматики широко применяются низковольтные реле, например [24]:

- реле времени типа ВС-33, ВС-43; ВЛ-5Х, -6Х, -7Х; РВ-01-03 и др.;
- промежуточные реле типа РЭП-15, -16, -26; РП-11, -121, -16, -23, -25; РЭВ82Х и др.,
- реле контроля трехфазного напряжения типа ЕЛ-11, -12, -13;
- реле напряжения: минимального и максимального напряжения типа РН-51, -53, -54, -153, -154;
- реле контроля напряжения РЭВ 821, РЭВ 825;
- реле тока типа РТ-40...-95, РСТ-11...-14 и др.

По возможностям контактных групп перечисленные типы реле обобщенно имеют следующие параметры: $I_{к\ max} = 2-16$ А, $U_{к\ max} = 12(24)-440$ В постоянного тока и 12–660 В переменного тока; количество замыкающих/размыкающих контактов — 1/0; 1/1; 2/0; 2/2, 2/4, 4/2; 4/4, 6/2; 8/0; механическая износостойкость — до 10⁶ переключений (циклов).

Производством реле во всем мире занимается множество предприятий. По данным к. т. н. В. Петракова, на российском рынке, наряду с компонентами японских и тайваньских производителей, большим спросом пользуются, например, ЭМ-реле компаний концерна Тусо Electronics [18]. В нем производством реле за-

Таблица. Основные характеристики силовых электромеханических реле зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	Контактная группа				Катушка			Примечание
		$P_{к\ max}$, Вт (В·А)	$U_{к\ max}$, В (В эф.ф.)	$I_{к\ max}$, А	Тип	P_0 , Вт (В·А)	U_0 , В (В эф.ф.)	R_0 , Ом	
SR4D4024 (Тусо Electronics)	Реле безопасности	–	–	8,0	DPST-NO, DPST-NC, 2N/O, 2N/C	0,0008	24	720	$R_{к} = 0,0002$ Ом (200 А); $N_{мех} = 10^6$ переключений; габариты 39,9×13×16 мм
EV200AAA (Тусо Electronics)	Реле высокого напряжения	45 000	12–900	500,0	SPST-NO, 1N/O	1,7	9–36	–	$N_{мех} = 10^6$ переключений; $R_{изол\ к-к} = 100$ МОм; $U_{изол\ к-к} = 2200$ В; габариты 21,5×65,6×73,2 мм
MY (OMRON): MY-2N, MY-4N	Универсальные миниатюрные	–	24 (220)	5,0	DPDT	–	6; 12; 24; 48; 110 (6; 12; 24; 48; 110; 240)	–	Встроенные индикаторы, защитные цепи; $U_{изол\ к-к} = 2000$ В эф.ф.; $T = -55...+60$ °С; габариты 21,5×36×28 мм
G2R (OMRON)	Сильноточные реле	–	30 (250)	16,0	SPST-NO, SPDT, DSPT-NO, DPDT	0,53; 0,36	12; 24; 48 (12; 24; 48; 110; 240)	–	$N_{эл} = 10^5$ переключений; $N_{мех} = 10^7$ переключений; $U_{изол\ к-к} = 5000$ В эф.ф.; $T = -40...+70$ °С; габариты 29×13×25,5 мм
G5RL-AC (OMRON)		–	(250)	16,0	–	–	–	–	$N_{эл} = 5 \times 10^4$ переключений; $N_{мех} = 10^7$ переключений; $U_{изол\ к-к} = 6000$ В эф.ф.; $T = -40...+70$ °С; габариты 29×12,7×15,7 мм
G8P (OMRON)		–	(250)	30,0	–	–	–	–	$N_{эл} = 10^5$ переключений; $N_{мех} = 10^7$ переключений; $U_{изол\ к-к} = 2500$ В эф.ф.; $T = -55...+105$ °С; габариты 32,1×28,2×20,1 мм

нимаются компании Schrack Technik (Австрия) [25], Agastat, Axicom P@B, OEG. Рассматриваемые реле принято классифицировать по применению и по исполнительному механизму.

В основу классификации по применению зарубежных реле положена коммутируемая мощность и некоторые особенности, обусловленные спецификой областей применения реле. Зарубежные реле, например компаний Tусо Electronics и входящей в него Schrack Technik, по применению делятся на:

- сигнальные реле;
- реле цепей питания;
- промышленные (силовые) реле;
- реле безопасности;
- автомобильные реле;
- прерыватели (выключатели сверхтоков);
- реле высокого напряжения.

В зависимости от применения требования к их параметрам отличаются очень сильно [26]. Так, для сигнальных реле важна надежность коммутации малых сигналов, для высокочастотных реле — величина и стабильность волнового сопротивления и ослабление сигналов в разомкнутом состоянии. Для силовых реле, естественно, важны коммутируемые значения мощности, напряжения и тока.

Сигнальные реле используются для коммутации сигналов, коммутируемый ток которых не превышает 2 А на резистивную нагрузку, мощность — 100 Вт постоянного тока (DC) или при некоторых условиях 500 В·А переменного тока (AC). Реле цепей питания предназначены для коммутации мощностей, не превышающих, как правило, 4 кВ·А. Промышленные реле предназначены для использования в промышленном оборудовании и коммутируют мощность, не превышающую 7,5 кВ·А. По установленной международной классификации нагрузка силовых реле ограничена током 30 А. Однако в последнее время зарубежные фирмы контакторы на токи более 30 А стали позиционировать как более сильноточные реле (60/100, 200 А), например, реле типа G9EA-1, G9EC-1 фирмы OMRON (см. таблицу).

Реле безопасности (безопасные реле) предназначены для использования в цепях управления, в которых вопросы безопасности стоят на первом месте. Такие реле разработаны для обеспечения безопасности с контактами, которые механически связаны, так как нормально открытый и нормально замкнутый контакты не могут быть закрыты одновременно. Используются в критически важных приложениях (лифты, эскалаторы, световые занавесы и т. д.). Особенностью реле является то, что даже при спекании одного из контактов сохраняется зазор между контактами не меньше 0,5 мм. Коммутируемая мощность этих реле не превышает 2 кВ·А. Автомобильные реле в настоящее время обычно работают при напряжениях от 9 до 16 В в автомобильных цепях постоянного тока. Переключаемые токи могут быть более 300 А. Прерыватели предназначены для выключения нагрузок, если токи превысят заданные значения (1000 или 2000 А).

Реле по исполнительному механизму делятся на реле с защелкой и реле без защелки. Каждая из этих групп в свою очередь

подразделяется на неполяризованные и поляризованные реле. В поляризованных реле для коммутации используют управляющий ток определенного направления, и в их конструкцию обычно входит постоянный магнит, который позволяет получить большую чувствительность. Неполяризованные реле могут переключаться током любого знака.

Реле без защелки (моностабильные) всегда возвращаются в исходное состояние, если питание снято с катушки. Они могут быть поляризованными или неполяризованными. Реле с защелкой (бистабильные) всегда сохраняют текущее состояние контактов, если питание снято с катушки. Бистабильные реле, как правило, поляризованные.

Большинство применяемых реле имеют исполнительный механизм постоянного тока. Однако некоторые сигнальные реле и реле общего назначения используют исполнительный механизм переменного тока, который приводится в действие цепью питания. Эти реле всегда неполяризованные. Управление реле зависит от его типа. Сигнал на контактах реле без защелки с некоторой задержкой повторяет сигнал управления. В реле с блокировкой установка и сброс производится импульсами напряжения определенной полярности. Если реле с одной обмоткой, то импульсы установки и сброса имеют различную полярность. В реле с двумя обмотками они могут иметь одинаковую полярность.

В настоящее время многие производители реле по-разному обозначают конфигурации их контактов. Ниже приводим варианты обозначений: вариант 1 / вариант 2 (в соответствии со стандартом DIN 41020):

- один нормально разомкнутый (замыкающий) контакт — 1А / SPST-NO;
- один нормально замкнутый (размыкающий) контакт — 1В / SPST-NC;
- один переключающий контакт — 1С / SPDT;
- 2 нормально разомкнутых контакта (двойной замыкающий контакт) — 2А / DSPT-NO или DM;
- 2 нормально замкнутых контакта (двойной размыкающий контакт) — 2В / DSPT-NC или DB;
- 2 контакта с переключением — 2С / DPDT.

При выборе силовых реле надо учитывать, что в каталожных данных максимальные значения коммутируемых напряжений, токов и мощностей приводятся при резистивной нагрузке. При коммутации реактивных нагрузок нагрузочная способность контактов реле снижается в зависимости от коэффициента мощности — $\cos\varphi$. Коэффициент снижения нагрузочной способности (F) реле определяют по заданной или измеренной величине $\cos\varphi$ в соответствии с рекомендациями фирмы-изготовителя. Например: при $\cos\varphi = 0,8 \rightarrow F = 0,95$; при $\cos\varphi = 0,7 \rightarrow F = 0,9$; при $\cos\varphi = 0,5 \rightarrow F = 0,8$; при $\cos\varphi = 0,4 \rightarrow F = 0,7$; при $\cos\varphi = 0,2 \rightarrow F = 0,2$.

Рассмотрим некоторые типы зарубежных реле подробнее, в частности силовые реле компании Tусо Electronics [18]. Начнем анализ с реле безопасности серии SR4XX... (SR4D4024, SR4M4024...). Реле SR4D4024 имеет следующие основные характеристики и особенности:

- Контактная группа: контакты — DSPN-NO, DPST-NC, 2N/O, 2N/C; $I_{к\max} = 8$ А.
- Катушка: $R_0 = 720$ Ом, $U_0 = 24$ В (DC), $P_0 = 0,8$ мВт.

Реле высокого напряжения специально разработаны для переключения высокого напряжения большой мощности (испытательное напряжение от 2,2 до 70 кВ). Функция переключения производится в вакууме или в герметичной камере, заполненной нейтральным газом. Приведем для иллюстрации некоторые характеристики реле серии Kilovac EV200AXXXNA, а именно EV200AAANA:

- Контактная группа: контакты — SPST-NO, 1N/O; $U_k = 12-900$ В, $I_{к\max} = 500$ А, $R_k = 0,2$ МОм; разрывная предельная мощность 320 В×2000 А на активную нагрузку (при $L = 25$ мкГн); механическая износостойкость — 10^6 переключений.
- Катушка: $U_0 = 9-36$ В, $P_0 = 1,7$ Вт.
- Параметры электроизоляции: $R_{\text{изол}} = 100$ МОм, $U_{\text{изол}} = 2200$ В.

Более подробно основные характеристики упоминаемых реле фирмы Tусо Electronics и других зарубежных силовых реле приведены в таблице.

Японская фирма OMRON [27], основанная в 1933 г. и акционированная (incorporated) в 1948 году, является мировым лидером по производству средств автоматизации. В интересующем нас аспекте OMRON — производитель широкой номенклатуры коммутирующих устройств. В конструкции силовых реле фирмы OMRON успешно решены две сложные задачи. Первая — сохранение в допустимых пределах величины контактного (переходного) сопротивления R_k в условиях образования неизбежных окислов при воздействии окружающей среды (температура, влажность, вредные примеси). Вторая — эффективное охлаждение контактной группы, что не просто, если осуществлена герметизация реле для устранения первого «артефакта». Кратко рассмотрим некоторые серии реле этой фирмы.

Универсальные миниатюрные реле серии MY фирмы OMRON широко известны. Они позволяют работать с нагрузкой до 5 А при 2-полосной конфигурации и до 3 А с 4 полюсами. Разные типы контактов позволяют выбрать оптимальные реле для решения различных задач. Различное исполнение реле позволяет по заказу выбирать тип встроенного индикатора (светодиодный, механический), защитные цепи (диод, RC-цепь), раздвоенные контакты. Силовые реле серии LY — многофункциональные, миниатюрные и предназначены для программного управления и силовых коммутационных цепей. Они рассчитаны на ток до 10 А и имеют исполнения для установки на DIN-рейку или печатную плату (PCB). Реле оснащены устройством гашения дуги и встроенным диодом. Реле серии LY имеют разные контактные группы, например: LY1 → SPDT, LY2 → DPDT, LY3 → 3PDT, LY4 → 4PDT.

Реле серии МК имеют очень высокую надежность и применяются при коммутации цепей переменного или постоянного тока. Для тестирования и удобства обслуживания в них встроен механический индикатор.

На сайте фирмы [27] указывается, что на смену отлично зарекомендовавшим себя реле серии МК пришли новые «супер-реле» МК-S. Особенности новой серии: такие же монтажные размеры и внешнее подключение; встроенный механический индикатор; наличие моделей с блокировочным рычагом. Кроме того, все материалы реле соответствуют RoHS и имеют сертификаты UL и IEC (TÜV).

Сильноточные реле фирмы OMRON серии GXXX (G2R, G5RL-AC... G8P) рассчитаны на коммутацию токов от 10 до 30 А при максимальных напряжениях 400 В постоянного тока (DC) и 380 В переменного тока (AC) [26, 28]. Так, реле G5LE — это новая серия силовых 10-А реле компании Omron в «кубическом» корпусе размером 22,5×16,5×19 мм. Реле G5LE выпускается с двумя вариантами конфигурации контактов: нормально разомкнутыми SPST-NO (исполнение «А») или переключающими SPDT (без суффикса). Для самых различных областей применения имеются разнообразные версии с различными опциями. Например, версия «Е» имеет большую нагрузочную способность — до 16 А. У 10-А моделей серии G5LE-G зазор между контактами составляет 0,8 мм. Это позволяет применять реле серии G5LE-G в оборудовании с механическими нагрузками до 10 г. Электрическая прочность изоляции реле G5LE составляет 1500 В эфф. между контактами одной полярности. Выпускаются версии реле с изоляцией катушки по классу F. Диапазон рабочих температур реле G5LE составляет от -40 до 85 °С, а электрический ресурс достигает 100 тыс. переключений при нагрузке 12 А с напряжением 250 В эфф. и частотой 1800 переключений в час (для версии G5LE-1-E). Реле G5LE могут работать в расширенном диапазоне температур от -40 до 105 °С с нагрузкой 12 А, что подтверждено испытаниями по методикам стандартов UL508, CSA22.2 и EN61810-1. В зависимости от модели реле G5LE имеют разное энергопотребление катушки: 400 или 360 мВт у G5LE-E или 700 мВт у G5LE-G. Реле G5LE выпускаются либо в брызгозащищенном, либо в герметичном пластмассовом корпусе. Сочетание низкой цены с высокими электрическими и механическими свойствами позволяет применять реле G5LE в различном оборудовании и приборах: стиральных машинах, электрических чайниках, кофеварках, парогенераторах, холодильниках, бойлерах и т. д.

У силовых реле G2R, G5RL-AC, G8P с током до 16 и 30 А механическая износостойкость (ресурс) — не менее 10^7 переключений, в то время электрическая — порядка 10^5 переключений. Напряжение электрической изоляции (контакт-катушка) не менее 5000–6000 В (AC) для токов 16 А и 2500 В — для токов 30 А. В основном температурный диапазон работы реле составляет -40...+70 °С, а для G8P — диапазон -55...+105 °С. Габаритные размеры оптимизированы и, например, для реле G8P равны 32,1×28,2×20,1 мм. Если учесть, что для этого реле $U_{к\max} = 250$ В эфф., $I_{к\max} = 30$ А эфф. (то есть $P_{к\max} = 7500$ В·А), то несложно подсчитать, что удельная мощность реле по объему $p_V = 410$ В·А/см³.

Основные характеристики упоминаемых реле приведены в таблице.

Несколько слов о применении сильноточных реле. При коммутации, вследствие механического взаимодействия контактов, а также микропробоев в начальный момент замыкания контактов происходит их самоочистка от образовавшихся окислов. В результате контактное сопротивление R_k , которое в начале замыкания может составлять 1–2 Ом, быстро уменьшается до единиц–десятков мОм. Важно помнить, что такое малое сопротивление у сильноточных реле достигается лишь при значительных коммутируемых токах. Так, в таблице для реле EV200AAANA (Tyco Electronics) приведено $R_k = 0,0002$ Ом при токе 200 А.

Другое обстоятельство состоит в том, что во время переключений на реактивную нагрузку контакты реле испытывают большие электрические перегрузки. При включении на емкостную нагрузку через его контакты протекает значительный ток, существенно превышающий его установившееся значение. Это вызывает дополнительный перегрев контактов. Типичный пример — использование в импульсных источниках питания, особенно во время включения. С другой стороны, при выключении индуктивной нагрузки к контактам прикладывается высокое напряжение самоиндукции, что повышает вероятность возникновения дуговых разрядов. В этом случае высокая температура дуги вызывает испарение материала контактов и, следовательно, их разрушение. В связи с упомянутыми особенностями надо иметь в виду, что приводимые в каталожных данных высокие показатели износостойкости (ресурса) порядка 10^6 – 10^7 переключений (циклов) характеризуют только механическую износостойкость ($N_{мех}$) без учета влияния величины и характера электрической нагрузки. Электрическая износостойкость (электрический ресурс) $N_{эл}$ — на 1,5–2 порядка меньше. Реально фактический ресурс может еще снижаться в зависимости от степени электрической нагрузки, ее «реактивности» (cosφ) и температуры окружающей среды.

Наиболее распространенным способом снижения влияния самоиндукции при размыкании контактов является применение искрогасящих цепей, включаемых параллельно контактам, в том числе и специальные токозамыкающие медные пластины (изолированные от контактов). В их число входят такие элементы или их комбинации, как диоды (только на постоянном токе); мощные стабилитроны, специальные импульсные диоды, подавители перенапряжений (супрессоры) и варисторы; демпфирующие RC-цепи. Каждое из этих решений имеет свои преимущества и недостатки [26], но в любом случае происходит увеличение потерь мощности и снижаются параметры электрической изоляции контактов ($R_{изол\ к-к}$ и $U_{изол\ к-к}$). Отметим, что можно перечисленные цепи искрогашения действительно включать на стороне нагрузки. Кроме того, в цепях переменного тока можно синхронизировать процесс выключения реле с моментом перехода тока нагрузки через ноль.

Продолжение следует

1. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 1.
3. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // Силовая электроника. 2010. № 2.
4. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.1 // Силовая электроника. 2010. № 3.
5. Сидоров И. Н., Мукосеев В. В., Христинин А. А. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник. М.: Радио и связь, 1985.
6. www.tirs.ru
7. www.elhand.com
8. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора // Современная электроника. 2007. № 7.
9. www.ferrite.ru
10. www.mag-inc.com
11. Стародубцев Ю., Белозеров В. Аморфные металлические материалы // Силовая электроника. 2009. № 2.
12. Эраносян С. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат, 1991
13. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 1.
14. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
15. Андронников Д. Плавкий предохранитель — элемент силовой электронной техники // Силовая электроника. 2007. № 1.
16. Шроер М. Миниатюрные предохранители Siba: «сгорел на работе» — спас оборудование // Силовая электроника. 2009. № 4.
17. www.wickmann.com (www.efo.ru/wickmann)
18. www.tycoelectronics.com
19. Каталог «Пассивные компоненты». Группа компаний «Симметрон», 2007 — www.symmetrongroup.ru
20. www.siba-fuses.com
21. www.radiobox.ru
22. ГОСТ 16121-86. «Реле слаботочные электромагнитные. ОТУ».
23. ГОСТ 16120-86 «Реле слаботочные времени. ОТУ».
24. Справочник ООО «Реле и автоматика». М., 2004 — www.rele.ru
25. www.schrack.ru
26. Звонарев Е. Электромеханические реле фирмы OMRON // Электронные компоненты. 2006. № 3.
27. www.omron.com
28. Кривандин С. Новые силовые реле Omron для бытовой и промышленной электроники // Электронные компоненты. 2008. № 6.