

# Надежность силовых устройств в России:

## мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3

**Авторы приводят общие черты и особенности силовых устройств, а также сообщают об их влиянии на обеспечение надежности. Рассмотрена информация о характерных отказах и неисправностях силовых устройств (СУ), обусловленных как отказами силовых компонентов, устройств управления, так и недостаточным учетом реальных условий эксплуатации. Приведены основные причины их возникновения, а также факторы влияния. Среди последних и просчеты при проектировании СУ, недостаточный объем испытаний и другие факторы. В общем виде рассмотрены основные мероприятия, способствующие улучшению надежности разрабатываемых силовых устройств. Отмечены особенности применения силовых полупроводниковых приборов и даны примеры их выбора в конкретных изделиях.**

**Владимир Ланцов**

vvlantsov@list.ru

**Саркис Эраносян**

sergera840@mail.ru

В части 1 [1] настоящей статьи указывалось, что, несмотря на достижения в развитии электронных и электротехнических компонентов за рубежом и в России, в то же время в электроэнергетике, силовой электронике существуют серьезные проблемы по обеспечению надежности. При общем значительном улучшении качества продукции благодаря внедрению в компаниях систем управления качеством продукции на основе стандартов серии ISO 9000, реальная надежность силовых устройств улучшается более медленно. С каждым десятилетием и даже годом растет количество техногенных катастроф, аварий и отказов в сетях электроснабжения, системах распределения электроэнергии, в силовых исполнительных устройствах. Среди факторов, влияющих на такое неблагоприятное положение, и заметное снижение уровня и объемов работ по повышению надежности, в частности силовых устройств, особенно в России. Для лучшего восприятия выдвигаемых тезисов и конкретных примеров приводятся краткая история развития теории надежности, принятые основные понятия, термины и определения.

В части 2 [2] статьи анализируется практика обеспечения надежности изделий в Советском Союзе и России. Положительно оценена роль служб надежности, существовавших на многих предприятиях СССР. Приводятся конкретные примеры работы таких служб, которые выполняли многие работы в этом направлении. В частности, производились расчеты параметров надежности, выдавались рекомендации по выбору более надежных компонентов и режимов их функционирования, разрабатывались методики входного контроля компонентов и узлов, их электротермотренировки, проводились различные испытания на надежность. В России в большинстве фирм деятельность служб надежности прекращена, а службы качества практически не проводят упомянутые виды работ. Также приводятся сведения по системам управления качеством продукции. Указано, что внед-

рение стандартов серии ISO 9000 лишь косвенно способствует повышению надежности продукции. Отмечается, что внедрение этих стандартов не отменяет действие других нормативных документов, если они не противоречат стандартам ISO 9000.

На основании проведенного анализа авторы сделали некоторые обобщения и привели основные факторы, влияющие на обеспечение надежности силовых устройств в России.

### Общие особенности силовых устройств и их влияние на обеспечение надежности

Номенклатура силовых устройств достаточно многообразна: источники вторичного электропитания (ИВЭ), регуляторы напряжения ветроэлектро- и дизельгенераторов, устройства катодной защиты трубопроводов от коррозии, системы силового электропривода, мощные преобразователи частоты, сварочные агрегаты и другие устройства. Различаясь по назначению и особенностям эксплуатации, СУ вместе с тем имеют много общего. Рассмотрим их общие черты, существенно влияющие на надежность их функционирования и требующие особого внимания при их проектировании.

1. По определению, силовые устройства — это устройства повышенной и большой мощности (более 200 Вт) и высоковольтные (более 20 А). Электропитание их может осуществляться как от сети переменного тока, так и от аккумуляторных батарей. В первом случае электропитание производится от силовой сети переменного тока (однофазной или трехфазной) частоты 50(60) Гц (на подвижных объектах — 400, 500, 1000 Гц). При этом мощность составляет единицы–сотни киловатт и более, а токи десятки–сотни ампер. Чем выше мощность силового устройства, тем больше требует оно внимания ко всем аспектам его проектирования, но особенно силовой части.

- Поскольку реальный КПД силовых устройств находится, как правило, в пределах  $\eta = 0,8...0,95$ , то в них выделяется значительная тепловая энергия. Это требует применения различных мер по эффективному отводу тепла.
- В силовых устройствах при включении имеют место большие пусковые токи (экстратоки), которые могут в несколько раз (иногда в десятки раз) превышать рабочие (номинальные) токи в стационарном режиме. Эти токи обусловлены: зарядкой конденсаторов большой емкости (ИБЭ), процессом запуска электродвигателей, холодным состоянием нагревательных элементов и т. п. Для систем, работающих в повторно-кратковременных режимах (подъемные устройства, сварочные агрегаты и т. д.), отмеченные особенности являются фактически «рабочими моментами» их эксплуатации.
- В энергетических установках большой мощности в случае их отказов и аварий возможны значительные экономические и иные последствия для всех потребителей электроэнергии. Поэтому в структурах СУ предусматриваются особые меры по надежной комплексной защите, как самих силовых агрегатов, так и потребителей от различных переходных процессов и перегрузок.
- В случае электропитания СУ от сети переменного тока с напряжением ~220 В, ~(3×380 В) с частотой 50(60) Гц, 400 Гц или постоянного тока 1000–3000 В (железнодорожный и другой подвижной электротранспорт), а также в высоковольтных силовых агрегатах необходимо обеспечивать высокое качество электроизоляции с учетом условий эксплуатации.
- В настоящее время большое значение придается мерам по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) силовых устройств, как с сетью электропитания, так и с нагрузками (потребителями). При этом необходимо соблюдать установленные нормы (МЭК, EN, ГОСТ) по уровню электромагнитных помех, как кондуктивного характера, так и излучением [3, 4].

### Характерные отказы силовых устройств и их причины

Даже в правильно спроектированных силовых устройствах нередко случаются различные отказы и неисправности, если не приняты дополнительные меры по обеспечению их надежности. Отказы силовых устройств могут приводить к очень серьезным последствиям, авариям и даже катастрофам [1]. В самом деле, выход из строя какого-либо локального потребителя редко приводит к отказу других потребителей. В то же время ненадежная работа, например, системы или блока электропитания чаще всего приводит к прекращению функционирования нескольких потребителей, зачастую жизненно важных для всего комплекса РЭА.

В общем случае внезапные отказы силовых устройств можно разбить на три группы:

- Отказы узлов и компонентов на стороне первичного электропитания (сети переменного тока).

Таблица 1. Характерные отказы в силовых устройствах и их причины

Степень опасности (вероятность) возникновения отказов	Компоненты и узлы (устройства), в которых возможны отказы	Характер отказов	Возможные причины
Наиболее вероятная	Силовые ключи и их модули: транзисторы	Пробой (выжигания): – токовый, – потенциальный, – тепловой, – по мощности (энергии)	Сверхнормативные превышения напряжения и тока; чрезмерные динамические потери мощности
	Тиристоры, симисторы	То же	То же и дополнительно превышение $dU/dt$ , $dI/dt$
	Выпрямительные диоды и мосты *	Потенциальный и токовый пробой	Сверхнормативные превышения напряжения и тока
	Диоды цепей обрания ключей (снабберов, фиксаторов уровня)	То же	То же
Периодически возникающая	Коммутирующие компоненты: выключатели, пускатели, силовые реле, автоматы включения и защиты	«Приваривание» силовых контактов	Сверхнормативные превышения напряжения и тока (например, длительное КЗ)
	Выпрямительные диоды **	Пробой (выжигания): – токовый, – потенциальный, – тепловой, – по мощности (энергии)	Перегрузка по току (длительное КЗ). Чрезмерные динамические потери мощности при переключении
	Силовые ключи ** (в импульсных стабилизаторах)	То же	То же
	Силовой трансформатор	«Подгорание» обмоток трансформатора	Выход из строя силовых ключей, длительная перегрузка по току
		Пробой изоляции	Ошибки в конструкции, дефект провода
Устройства, системы управления	Пробой драйвера силового ключа	Из-за отказа силового ключа	
Редко возникающая	Фильтры электромагнитных помех *	Выход из строя (пробой) в дросселе, конденсаторов фильтра	Неправильный выбор конденсаторов по рабочему напряжению
	Электролитические конденсаторы сглаживающих фильтров **	Заметное ухудшение параметров, перегрев	Неправильный выбор конденсаторов по частотным свойствам

\* На стороне первичного электропитания (сети переменного тока). \*\* На вторичной стороне (стороне нагрузки).

- Отказы узлов и компонентов на стороне нагрузки (вторичной стороне).
  - Отказы устройств в системах управления и защиты силовых объектов.
- В таблице 1 представлена классификация компонентов и узлов силовых устройств в зависимости от степени опасности (вероятности) возникновения в них внезапных отказов.

Постепенные отказы силовых устройств имеют гораздо меньшее значение, поскольку в настоящее время большинство силовых устройств работают в ключевых режимах, и к ним обычно не предъявляются высоких требований по стабильности параметров. Вместе с тем при длительной или интенсивной эксплуатации возможны случаи, когда уход параметров весь-

Таблица 2. Основные факторы, влияющие на возникновение отказов в силовых устройствах

Этапы (подэтапы) разработки силового устройства	Основные факторы, при игнорировании которых возможны отказы
Составление технического задания	Неполнота требований: ● по параметрам первичного электропитания (максимальное превышение от номинального значения, провалы и скачки напряжения); ● по характеру нагрузки (рабочие перегрузки, повторно-кратковременный режим и т. д.); ● по нештатным ситуациям на входе (несанкционированным отключениям-включениям) и на выходе; ● по уровню электромагнитных помех по цепи электропитания; ● по максимальной рабочей температуре и т. д.
Выбор структуры и разработка электрических схем	● Выбор неоптимальной структуры силовой части: без сравнения вариантов по количеству компонентов, рассеиваемой мощности, по КПД и т. п. ● Недостаточная надежность примененных компонентов и узлов. ● Выбор режимов работы компонентов без необходимого запаса. ● Не использование рекомендаций по применению фирм — изготовителей компонентов. ● Отсутствие детальной проработки процессов включения (пуска) и выключения силовых устройств. ● Недостаточная проработка комплексной защиты от перегрузок на входе и выходе: по току перегрузки, от КЗ, от перенапряжений, по мощности (энергии), по температуре — как силового устройства в целом, так и его узлов. ● Недостаточное использование компьютерного и физического моделирования (макетирования), недостаточность испытательных процедур
Разработка конструкции	Игнорирование общепринятых рекомендаций при конструировании: ● нерациональная компоновка силовых элементов и узлов; ● неоптимальная разводка печатных плат (без учета влияния помех); ● несоблюдение норм по выбору теплоотводящих радиаторов, производительности принудительного обдува (вентиляции); ● недостаточное внимание к вопросам ремонтопригодности и т. д.
Испытания опытного (экспериментального) образца	Малый объем и номенклатура лабораторных испытаний: ● неполное комплексное исследование переходных режимов, например процессов включения/отключения опытного образца; ● отсутствие проверки температурных режимов работы; ● отсутствие реальной проверки устройств защиты от перегрузок и замена ее имитацией (без проверки работы силового канала); ● отсутствие имитации внештатных ситуаций
Изготовление серийных образцов	● Отсутствие входного контроля наиболее ответственных узлов и компонентов (прежде всего силовых). ● Малый объем технологической тренировки или ее практическое отсутствие (по причине экономии трудозатрат). ● Недостаточно стендового и испытательного оборудования
Эксплуатация силовых устройств	● Слабые контакты с потребителями по сбору данных об эксплуатационной надежности. ● Недостаточный анализ причин отказов и отсутствие постоянной работы по их устранению

ма значителен. Это обстоятельство приводит к ремонту (замене компонентов). В статье [1] приводился пример, когда при длительной эксплуатации после 5000–8000 ч работы в импульсных блоках питания типа LPQ 112B (LPQ113B) фирмы Astec (средняя наработка на отказ 550 000 ч) происходили постепенные отказы. Доминировали 3 типа отказов: а) недопустимое уменьшение напряжения в канале +5 В; б) ложные срабатывания защиты по току; в) существенное увеличение пульсаций выходного напряжения, по сравнению с номинальной. В итоге приходилось или подрегулировать выходное напряжение (+5 В), или заменить, например, потенциометр, либо конденсатор сглаживающего фильтра. Иными словами, в первом случае надо провести профилактику, а в двух других — произвести ремонт.

Рассмотрим общие факторы, влияющие на вероятность возникновения отказов силовых устройств и снижение их надежности. По мнению авторов, основанному на многолетнем личном опыте разработок СУ, такими факторами на различных стадиях разработки и производства являются следующие (табл. 2).

Приведенные в таблице 2 факторы, в основном, не нуждаются в комментариях, тем более что при дальнейшей конкретизации они зависят от особенностей того или иного силового устройства. В частности, от его структуры, электрической схемы, особенностей функционирования и т. д.

### Общие рекомендации по обеспечению надежной работы силовых устройств

Таким образом, мы рассмотрели общие технические черты различных силовых устройств, которые надо учитывать при проектировании. Вместе с тем повышению надежности этих устройств в России прямо или косвенно способствовали некоторые благоприятные факторы:

- Отечественные специалисты и фирмы получили практически неограниченный, свободный доступ к импортным компонентам с их широкой номенклатурой и высоким (в среднем) уровне качества.
- Широкое распространение Интернета в совокупности с постоянным увеличением вычислительной мощности современных компьютеров привело к более быстрому получению информации о компонентах, рекомендациях фирм по их применению и др.
- Широкое распространение получило компьютерное моделирование (автоматизированное проектирование) электронных устройств.

Однако необходимо принимать во внимание и другие дополнительные соображения. В частности, всегда целесообразно проверять силовые компоненты, в том числе и импортные, на соответствие паспортным данным. Первоначальная эйфория по поводу высокой надежности всех импортных компонентов уже прошла. Да, в среднем они более качественные, чем отечественные компоненты, а также из стран СНГ, благодаря более совершенному уровню производства и контролю качества.

Вместе с тем выяснилось, что и они подвержены отказам и нуждаются в проверке.

Также следует подчеркнуть, что цены на качественные компоненты сильно завышены, сроки поставок часто нарушаются. Фирмы-производители или фирмы-разработчики сознательно ограничивают перечень важных технических параметров. По сравнению с правилами, существовавшими во времена СССР, это особенно удручает. Если в советские времена было грамотно написано письмо-запрос по тем или иным техническим параметрам электронного прибора, то можно не сомневаться, что будет получен исчерпывающий ответ. В крайнем случае, будет дан совет, какой прибор можно применить для решения поставленного технического вопроса.

Для иллюстрации этого приведем такой пример. Один из авторов был свидетелем следующей ситуации. В импульсном стабилизаторе тока накала мощной рентгеновской трубки БХВ-18 в качестве силового ключа использовался MOSFET-модуль типа STE53NA50 фирмы STMicroelectronics (ST). Данные стабилизатора:  $U_{\text{вх}}$  изменяется в пределах  $150 \pm 25$  В,  $U_{\text{вых}} = 20-80$  В (регулируемое),  $I_{\text{вых}} = 1-3$  А (нагрузка — инвертор), частота коммутации 5–7 кГц. MOSFET-модуль имел следующие данные:  $U_{\text{си max}} (U_{\text{DSS}}) = 500$  В,  $I_{\text{с max}} (I_{\text{D}}) = 53$  А,  $P_{\text{си max}} (P_{\text{D}}) = 460$  Вт,  $R_{\text{си}} (R_{\text{DS on}}) = 0,085$  Ом. В течение нескольких лет выход из строя модулей STE53NA50 при настройке, испытаниях и эксплуатации в среднем составлял порядка 1–3% при партии в 100–150 образцов. При снятии STE53NA50 с поставки дистрибьютор рекомендовал замену на STE53NC50 в том же корпусе (ISOTOP или SOT-227B) и с теми же значениями предельных параметров. Как положительное изменение указывалось, что значение  $R_{\text{DS on}}$  уменьшилось до 0,075 Ом. После замены модулей STE53NA50 на STE53NC50 при выпуске новой партии аппаратуры во время настройки и испытаний вышло из строя суммарно 18 образцов STE53NC50 из 25 шт. Это было удивительно и не поддавалось первым попыткам анализа. Поэтому схема была срочно доработана в части установки дополнительных защитных компонентов, а также улучшения режима выключения. Вместе с испытаниями задержка выпуска продукции составила 15 дней. Анализ постфактум в более спокойной обстановке показал следующее. С новыми свойствами — меньшим значением  $R_{\text{DS on}}$  и меньшим значением заряда на затворе MOSFET для переключения — модуль стал более «деликатным» и лишился, в частности, запаса по величине  $U_{\text{DSS}}$ . Этот запас, правда, нигде в данных не фигурировал, но дефекто, скорее всего, имелся.

Получившие широкое распространение методы автоматизированного проектирования, например, методы компьютерного расчета и моделирования, существенно сократили время разработки, а также оформления конструкторской документации. Однако следует отметить, что эти меры не могут полностью заменить методы физического моделирования (натурное макетирование). Этот тезис признают ведущие специалисты и в России, и за рубежом, тем более что в руководствах на при-

меняемые программные пакеты не так много рассмотрено моделей и примеров.

Наряду с положительными тенденциями, в России имеют место и неблагоприятные обстоятельства. В частности, естественное стремление уменьшить сроки проектирования и внедрения аппаратуры, минимизировать финансовые затраты, чтобы скорее выйти на рынок, привело к ухудшению качества изделий. Это результат того, что фирмы практически не проводят НИР, пренебрегают их объемом на этапах выполнения ОКР. К этому надо добавить, что резко уменьшилось количество высококвалифицированных специалистов, занятых решением проблем по проектированию современных силовых устройств. Об этой «кричащей» проблеме авторы уже писали в работе [5].

Таким образом, для существенного повышения надежности проектируемых силовых устройств необходимо обеспечить выполнение следующих мероприятий:

1. Выбрать входной автомат включения/защиты соответственно первичному сетевому напряжению, разрывной мощности (току) с элементами искрогашения и необходимым быстродействием. При этом обязательно наличие в СУ специального узла контроля параметров первичной сети для выполнения функции отключения силового агрегата с помощью автомата. Ненормальным состоянием сети электропитания считается, в частности, отклонение напряжения сети за пределы норм (по ТУ), например,  $\pm 25\%$  (вместо  $\pm 20\%$ ), пропадание одной из фаз трехфазной сети. Последовательно с автоматами или контакторами обязательно включение плавких предохранителей. Это связано с тем, что автоматы и контакторы до момента отключения цепи пропускают импульсы тока большой величины, которые способны вывести из строя полупроводниковые диоды или связанные с ними цепи. Плавкие предохранители ограничивают импульс тока КЗ цепи, и поэтому выделяющаяся при этом энергия меньше.
2. Обеспечить эффективное ограничение пусковых токов с помощью специальных узлов и компонентов: мощных терморезисторов и резисторов с их последующим автоматическим выключением, например, шунтируя его тиристором, специальных дросселей и т. п. Процесс нарастания выходного напряжения СУ, скорости перемещения (вращения) или нагрева должен при необходимости осуществляться плавно.
3. В силовых устройствах должны быть встроены узлы, которые при выключении автоматически «гасят» («разряжают») энергию силовых реактивных компонентов — конденсаторов, индуктивностей. Это повышает уровень безопасности обслуживающего персонала.
4. Оптимизировать выбор схмотехнического решения СУ с точки зрения минимизации количества критичных компонентов, обеспечив облегченные режимы работы силовых полупроводниковых приборов.

5. Выбрать надежные силовые компоненты, отдавая предпочтение интегрированным силовым модулям. Для ослабления возникающих импульсных перенапряжений на выводах силовых ключей при их переключении, а также для предотвращения ложных срабатываний ключей при больших значениях изменения напряжения  $dU/dt$  и тока  $di/dt$  необходимо предусматривать подключение специальных компонентов и цепей в комплексе с варисторами.
6. Предуспомотреть эффективные меры по комплексной защите, как самих СУ, так и потребителей от различных перегрузок. В частности это может быть:
  - защита от перегрузок по току — электронная, осуществляемая ограничением среднего значения выходного тока, например уменьшением длительности импульсов при ШИМ-управлении;
  - защита от КЗ — электронная, с выключением силовых ключей по управлению или их отключением от цепи электропитания;
  - защита от перенапряжений — электронная, например, двухступенчатая: первая сурень — ограничитель импульсных перенапряжений (мощные TVS-диоды, стабилитроны), вторая — с электромагнитным выключателем;
  - защита от перегрева внутри корпуса СУ;
  - защита электроприводов от «заклинивания» нагрузки на валу электродвигателя — с отключением от источника первичного (или вторичного) электропитания.
7. Провести аналитическую проверку (моделирование) работы устройств защиты при пуске, перегрузках, несанкционированных (нештатных) включениях/отключениях.
8. Выполнить мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости [6–8];
  - выбрать (спроектировать) сетевой фильтр помех, обеспечивающий подавление высокочастотных (ВЧ) кондуктивных электромагнитных помех, как со стороны сети, так и генерируемых силовых устройств в сеть электропитания в соответствии с установленными нормами;
  - выбрать решения по повышению помехоустойчивости устройства управления и защиты, в том числе и от внутренних помех по силовым цепям.
9. При проектировании конструкции требуется обеспечить:
  - эффективный отвод тепла путем конвекции или обдува высокопроизводительными вентиляторами, а при очень большой рассеиваемой мощности — отвод тепла другими способами;
  - необходимое качество электроизоляции (сопротивление, электропрочность), особенно при питании от сети переменного тока;
  - рациональную разводку электромонтажа и т. д.
10. Кроме компьютерного моделирования, для СУ желательно проведение натурного моделирования (макетирования). Для устройств очень большой мощности допускается макетирование в уменьшенном масштабе по мощности.

### Рекомендации по применению силовых полупроводниковых приборов

В таблице 1 приведены характерные отказы силовых устройств в зависимости от вероятности их возникновения. Наиболее часто отказывают силовые полупроводниковые приборы. Это связано с тем, что при относительно малых размерах, особенно площади кристалла, они переключают большие (иногда сверхбольшие) значения тока, напряжения и мощности. Наиболее существенное влияние на надежность функционирования силовых приборов оказывают максимальные напряжения, токи и мощность в рабочих и нештатных режимах. Отсюда следует, что в рекомендациях следует указать на относительную меру соответствия фактических режимов функционирования допустимым (предельным) значениям напряжения, тока и мощности как в режиме постоянного (среднего) тока, так и в импульсных режимах. Эти степени соответствия характеризуются коэффициентами электрической нагрузки  $K_{нр}$ , которые можно представить в виде отношения максимального рабочего параметра ( $U, I, P$ ) для силового прибора к его паспортным предельным значениям при максимальной температуре эксплуатации. Кроме того, существуют ограничения по величине мгновенной мощности (энергии), возникающей в процессе переключения полупроводникового прибора. И, наконец, для эффективного рассеивания мощности необходимо правильно выбрать теплоотводящие радиаторы для силовых приборов с учетом их теплового сопротивления, теплового сопротивления изолирующей прокладки и максимальной температуры эксплуатации.

Рекомендуемые коэффициенты  $K_{нр}$  целесообразно приводить с учетом фактической температуры, возникающей внутри блоков СУ. Например, для устройств коммерческого и промышленного назначения выполнить эту рекомендацию несложно, поскольку для них максимальная температура эксплуатации, как

правило, составляет  $+35^\circ\text{C}$  и  $+50^\circ\text{C}$  соответственно. К этим значениям надо прибавить перегрев внутри корпуса СУ. Обычно в правильно сконструированном модуле, блоке можно обеспечить перегрев в пределах  $15\dots 20^\circ\text{C}$ . В итоге максимально возможная температура силовых приборов для приведенных групп аппаратуры получится соответственно  $+55^\circ\text{C}$  и  $+70^\circ\text{C}$ .

В указанном контексте рассмотрим следующие силовые приборы:

- выпрямительные диоды и мосты общего назначения (низкочастотные);
- быстродействующие (fast и ultrafast) диоды;
- тиристоры, оптотиристоры, симисторы;
- полевые транзисторы с изолированным затвором по структуре MOSFET;
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (БИТЗ, или IGBT);
- интегрированные силовые модули (ИСМ, или ИРМ).

Биполярные транзисторы в настоящее время применяются гораздо реже, чем в 1970–1990 гг., и повсеместно вытесняются MOSFET, IGBT как более перспективными и надежными силовыми полупроводниковыми приборами. Поэтому авторы не включили биполярные транзисторы в перечень анализируемых силовых приборов.

Рекомендуемые значения коэффициентов электрической нагрузки  $K_{нр}$  для разных групп силовых полупроводниковых приборов приведены в таблице 3.

Сделаем некоторые пояснения о параметрах силовых приборов.

### Выпрямительные диоды и мосты

Основные параметры этой группы приборов: максимально допустимое значение обратного повторяющегося напряжения  $U_{RRM}$ , среднего выпрямленного/постоянного прямого тока  $I_{F(AV)}$  ( $I_{dAV}$ ), импульсного тока  $I_{FSM}$  — для повторяющихся или единичных импульсов диодов и мостов.

Максимально допустимое значение мощности рассеяния, как правило, не задается

Таблица 3. Рекомендуемые значения коэффициентов электрической нагрузки  $K_{нр}$  силовых полупроводниковых приборов

Силовые полупроводниковые приборы	Рекомендуемые коэффициенты электрической нагрузки $K_{нр}$ , не более:				Дополнительно учитываются (контролируются)
	по напряжению $K_{ну}$	по току $K_{нт}$		по рассеиваемой мощности (среднее значение) $K_{нр}$	
		по постоянному (среднему) значению $K_{н1}$ (1)	импульсному значению $K_{н2}$ (2)		
Выпрямительные низкочастотные диоды и мосты	0,7–0,8	0,6–0,7	0,7	0,1–0,2	1. Площадь тепловода — $S_v$ (скорость вентиляции — $V_v$ ) 2. $U_{isol} \geq 1,1 U_{isol\ max}$
Быстродействующие диоды	0,6–0,7	0,6–0,7	0,7	0,1–0,15	1. $S_v (V_v)$ 2. $U_{isol} \geq 1,1 U_{isol\ max}$ 3. $t_{rr}$
Тиристоры, оптотиристоры	0,6–0,7	0,5–0,6	0,7	0,1–0,2	1. $S_v (V_v)$ 2. $U_G < 0,9 U_{G\ max}$ 3. $d_i/d_c < 0,8 (d_i/d_c)_{max}$ 4. $d_i/d_c < 0,8 (d_i/d_c)_{max}$ 5. $U_{isol} \geq 1,1 U_{isol\ max}$
Полевые транзисторы MOSFET	0,6–0,75	0,5–0,7	0,6	0,1–0,2	1. $S_v (V_v)$ 2. $U_{GS} < U_{GS\ max}$ 3. $t_{on}, t_{off}$ 4. $U_{isol} \geq 1,1 U_{isol\ max}$
Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)	0,55–0,7	0,4–0,6	0,5–0,6	0,1–0,15	1. $S_v (V_v)$ 2. $E_{max} < 0,9 (E_{on} + E_{off}) f_k$ 3. $U_{GS} < U_{GS\ max}$ 4. $I_{C(k)} t_{C} < 0,8 I_{C(k)\ max} \times t_{C\ max}$ 5. $U_{isol} \geq 1,1 U_{isol\ max}$

Примечание. Необходимые пояснения, а также более подробные сведения о дополнительных показателях приведены в подразделах на конкретные группы силовых приборов

и определяется стандартными типами их корпусов. Значения коэффициента по рассеиваемой мощности  $K_{нр}$  в принципе можно выбирать и больше рекомендуемых, но тогда теплоотводящий радиатор будет иметь большую площадь и габариты. Она зависит от вида охлаждения: при принудительной вентиляции с определенной производительностью ( $V_v, \text{м}^3/\text{мин}$ ) или путем естественной конвекции. При этом имеет значение как конфигурация радиатора (плоский, ребристый, игольчатый и т. п.), так и допустимая температура корпуса прибора. Если выводы выпрямительного диода или моста изолированы от корпуса, то электропрочность их изоляции по паспорту (спецификации, ТУ) прибора должна быть не менее рекомендуемого значения для данного вида электропитания сети переменного тока (однофазной или трехфазной) по соответствующим стандартам, то  $U_{isol} \geq U_{isol\max}$ .

Покажем процедуру выбора выпрямительных диодов с точки зрения повышения надежности силовых устройств.

Пример 1. Для сетевых выпрямителей и мостов обычно выбираются выпрямительные диоды или мосты со следующим напряжением  $U_{RRM}$ : 600–800 В — для однофазной сети (~220 В) и 800–1000 В — для трехфазной ( $3 \times \sim 220$  В или  $3 \times \sim 380$  В) сети переменного тока [9]. При этом приняты во внимание: максимальное повышение сетевого напряжения (на +20%), возможные «перекося» напряжения фаз сети и перенапряжения. Кроме того, в этом случае напряжение изоляции выводов относительно корпуса блока должно быть  $U_{isol} \geq 2500$  В.

### Быстродействующие диоды

Для быстродействующих (fast и ultrafast) диодов характерны те же основные параметры, которые описаны для выпрямительных диодов. С другой стороны, для снижения падения напряжения на диодах и, следовательно, потерь мощности в импульсных ИВЭ и регуляторах с низковольтным сильноточным выходом применяется параллельное соединение диодов, при котором еще больше уменьшаются фактические значения  $K_{нр}$ ,  $K_{нлн}$  по сравнению с рекомендуемыми. Важный параметр  $F_t$ , эквивалентный мгновенной энергии на диоде (с конкретным прямым сопротивлением), в отечественных спецификациях или ТУ вообще не указывается. Между тем при возникновении перегрузок по току и учете реального времени срабатывания защиты этот параметр, безусловно, должен приниматься во внимание и контролироваться при проектировании СУ. Известны случаи, когда, например, в высококачественных блоках питания превосходные по своим параметрам зарубежные диоды, выбранные с запасом только по допустимым значениям  $I_{F(AV)}$ ,  $I_{FSM}$  выходили из строя. Это казалось необъяснимым, но, по нашему мнению, происходило при значительных токовых перегрузках или КЗ из-за недостаточного быстродействия узла защиты по току.

Время восстановления обратного сопротивления диода  $t_{rr}$  при изменении полярности приложенного напряжения на обратное должно учитываться при выборе диода для рабо-

ты на высоких частотах коммутации  $f_k$  в импульсных ИВЭ, инверторах сварочных агрегатов и т. п. Относительно рекомендуемого значения  $K_{нр}$  для быстродействующих диодов все ранее сделанные пояснения для выпрямительных диодов остаются в силе. Правда, при этом должны дополнительно учитываться динамические потери мощности на диоде, которые возникают благодаря конечному (не нулевому) значению  $t_{rr}$ .

Пример 2. Рассмотрим выбор диодов выходного выпрямителя для импульсного ИВЭ с узлом ККМ и мощностью 1200 Вт (27 В/45 А), на основе прямоходового однотактного преобразователя напряжения с частотой 200 кГц, выполненного по структуре типа «косой» мост [10]. В таком ИВЭ в ВЧ-выпрямителе преобразователя напряжения в соответствии с рекомендациями таблицы 3 должны быть использованы диоды Шоттки со следующими параметрами:  $U_{RRM} = 100$  В,  $I_{F(AV)} = 80$  А,  $U_{FM} = 0,67$  В. Причем, как следует из статьи [10], каждый из диодов выходного выпрямителя представляет собой параллельное соединение двух диодов в одном модуле 83CNQ100, что позволило уменьшить  $U_{FM}$  (напряжение на открытом диоде). В результате этого суммарные потери в диодах выходного выпрямителя снизились на 34%. Эти мероприятия в итоге обеспечили фактические значения коэффициентов нагрузки диодов выпрямителя по току  $K_{нл}$  ( $K_{нлн}$ ) не более 0,12 (0,2). Тем самым подтверждается важный принцип: меры по повышению надежности улучшают качественные характеристики изделия, в нашем случае блока питания 27 В, 45 А. При этом заметим, что реально надо принимать при выборе диода:  $U_{RRM} \geq (2,2-2,5) U_{\text{вых}}$  а  $t_{rr} \leq 75$  нс.

### Тиристоры, оптодиоды, симисторы

К этим силовым приборам в принципе применимы те же рекомендации по выбору коэффициентов нагрузки  $K_{нл}$  ( $K_{нлн}$ ,  $K_{нр}$ ), а также по выбору площади теплоотвода-радиатора  $ST$  (производительности вентиляции  $V_g$ ), что и для выпрямительных диодов. Однако поскольку тиристоры и оптодиоды — это четырехслойные ( $p-n-p-n$ ) полупроводниковые приборы с внутренней положительной обратной связью (эффект «защелкивания»), то у них есть ряд существенных особенностей. Во-первых, управление осуществляется только процессом включения приборов, за исключением запираемых тиристоров. При этом напряжение (прямое и обратное) на управляющем электроде  $U_G$  (на управляющем оптоизлучателе для оптодиодов) не должно превышать допустимого значения, то есть  $U_G < U_{G\max}$ . Во-вторых, скорости изменения напряжения  $dU/dt$  и тока  $dI/dt$  в силовой (анодной) цепи не должны превышать допустимых значений этих параметров с учетом максимальной рабочей температуры приборов. То есть должно быть  $dU/dt < 0,8(dU/dt)_{\max}$  и  $dI/dt < 0,8(dI/dt)_{\max}$ . В этой связи необходимо принимать во внимание наличие, уровень и частотный диапазон помех в силовой цепи при выборе схемотехнических решений. Приведенные ранее замечания по выбору теп-

лоотводов-радиаторов ( $ST$ ,  $V_g$ ) и величине напряжения изоляции  $U_{isol}$  для выпрямительных диодов остаются в силе и в этом случае.

Пример 3. Рассмотрим выбор оптодиодов для блока питания 800 Вт (200 В/4 А), содержащего оптодиодный регулируемый выпрямитель с питанием от однофазной сети переменного тока 220 В, 50 Гц, разработанного одним из авторов. Структура выпрямителя: сетевой фильтр помех — выпрямительный мост (2 диода и 2 оптодиода) — замыкающий (нулевой) диод — LC-фильтр. Что касается диодов, то в примере 1 рассмотрен их выбор по напряжению  $U_{RRM}$  (600 В). Аналогично диодам выбирается и значение  $U_{RRM}$  для оптодиодов. Значение тока  $I_{F(AV)}$  для диодов и оптодиодов было определено как  $I_{F(AV)} \geq I_n/K_{нл}$ , то есть  $I_{F(AV)} = 4 \text{ А}/0,5 \geq 8 \text{ А}$ . С учетом изложенного были выбраны отечественные оптодиоды типа ТО325-12,5-8 с параметрами:  $U_{RRM} = 800$  В,  $I_{F(AV)} = 12,5$  А,  $U_{isol} = 2500$  В. Кроме того, силовая часть оптодиодов зашунтирована RC-цепью и варистором для ликвидации ложных срабатываний из-за возможного превышения допустимого значения  $dU/dt$ . На симисторы в полной мере распространяются все рекомендации, касающиеся тиристоров.

### Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET)

Мощные полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным (N или P) каналом выполняются по структуре: металл-диэлектрик (окисел) — полупроводник (МДП или MOS) и сокращенно называются МОПТ, или MOSFET. Отличия MOSFET от биполярных транзисторов и их особенности: они управляются напряжением (электрическим полем) и поэтому имеют очень большое входное сопротивление (мегаомы), нормально закрыты и открываются, если напряжение затвор-исток (G-S) достигает определенного порога (threshold) —  $U_{GS(th)}$ , который обычно для мощных MOSFET равен 3,5–6 В. Кроме этого, к их достоинствам можно отнести:

- большую перегрузочную способность в импульсном режиме, то есть отношение между максимально допустимыми значениями импульсного тока  $I_{DM}$  к постоянному току стока  $I_D$  обычно составляет  $I_{DM}/I_D = 4$ ;
- линейную зависимость напряжения на открытом канале сток-исток (D-S) от протекающего ток стока  $I_D$  при практически постоянном сопротивлении открытого канала  $R_{DS(on)}$ .

Рекомендации по коэффициентам электрической нагрузки  $K_{нл}$  для MOSFET приведены в таблице 3. Другие особенности и дополнительные рекомендации по применению  $K_{нл}$ :

- Поскольку допустимое напряжение между затвором и истоком MOSFET обычно не должно быть более  $\pm 20$  В, то необходимо в этой цепи установить ограничитель перенапряжений, например на двуханодном стабилизаторе с напряжением стабилизации  $18 \pm 1$  В.
- Для повышения помехоустойчивости и пассивного запаривания транзистора необходи-

мо предусмотреть использование резистора между затвором и истоком, на практике обычно 200 Ом...3 кОм — в зависимости от мощности MOSFET.

- При активном запираании мощных высоковольтных транзисторов следует учитывать ток заряда емкости Миллера, которая «подключена» между выводами сток-затвор (D-G). Этот ток протекает по внутреннему импедансу генератора управляющего импульса, буквально «выгрызая» ток запираания отрицательного импульса, подаваемого в цепь затвор-исток (G-S).

Отметим еще одну очень важную особенность полевых транзисторов. Малое изменение сопротивления открытого состояния канала сток-исток  $R_{DS(on)}$  оказывает существенное влияние при параллельном включении полевых транзисторов. В этом случае выявляются дополнительные отличия от аналогичной работы мощных биполярных транзисторов. Если мы включаем вместо одного два полевых транзистора, то получим экономию в мощности потерь на открытом эквивалентном ключе ровно в 2 раза, при условии идеального разделения тока и постоянстве  $R_{DS(on)}$ . При этом для более точных расчетов надо помнить: увеличение тока стока от 1 до 10 А увеличивает  $R_{DS(on)}$  на 17–20%; возрастание температуры на каждые 10 °C увеличивает  $R_{DS(on)}$  на 1–1,3%.

Другая картина получается при включении параллельно двух биполярных транзисторов. В этом случае, а также при идеальном разделении тока, мы можем получить экономию мощности потерь в эквивалентном ключе только в 0,7–0,8 раза. Эта экономия в основном определяется уменьшением напряжения насыщения биполярного транзистора  $U_{ce sat}$  из-за снижения тока коллектора в 2 раза.

Пример 4. Рассмотрим выбор силового полевого транзистора в единичном силовом модуле конвертера для источника бесперебойного питания (ИБП) с выходной мощностью 1800 Вт, рассмотренного в [11]. Мощность силового модуля конвертера, которая впоследствии была уточнена, равна  $P_{cm} = 740$  Вт (135 В/5,5 А).

Напомним, что единичный модуль выполнен на основе квазирезонансной схемы (однотактный «косой мост»), в котором используются два одновременно включаемых/отключаемых силовых ключа. Причем в этой схеме максимальное напряжение на закрытых ключах фиксируется на уровне питающего постоянного напряжения. Для напряжения сети 220 В +20% это постоянное выпрямленное напряжение  $\approx 370$  В (в режиме холостого хода преобразователя). Так как ток в квазирезонансном преобразователе имеет форму «полуволны» [12], то целесообразно привести следующие расчетные данные для выбора типа силового транзистора: амплитуда тока силовых ключей —  $I_{ампл.кв}$  и эффективный ток  $I_{эфф.кв}$ . Ввиду предполагаемой возможности применения ИБП [11] в аппаратуре оборонного назначения, необходимо было использовать полевой высоковольтный транзистор типа 2П809Б, разработанный в АОТ НПО «Электроника» (г. Воронеж). Параметры опытных образцов этого транзистора были следующие: напряжение сток-исток  $U_{DSS} = 500$  В; постоянный ток сток  $I_D = 9,6$  А

(при температуре корпуса 35 °C) и  $I_D = 8$  А (при температуре 70 °C); сопротивление открытого канала сток-исток  $R_{DS(on)} = 0,6$  Ом. Были получены следующие расчетные параметры для электронного ключа квазирезонансного преобразователя: максимальная амплитуда тока  $I_{ампл.кв} = 17,9$  А (при максимальном сетевом напряжении 264 В); максимальный эффективный ток ключа  $I_{эфф.кв} = 7,2$  А (при минимальном сетевом напряжении 176 В). Как видно по приведенным данным, применение в качестве ключа одного транзистора не позволяет выполнить рекомендации (табл. 3). Кроме того, для этого случая очень велики потери мощности в транзисторах, а именно:  $P_{\Sigma mp} \approx 62$  Вт. Поэтому, с точки зрения повышения надежности, необходимо, чтобы каждый ключ состоял из двух параллельно включенных транзисторов 2П809Б, что и было применено в схеме силового модуля [11]. В результате через каждый транзистор будет протекать ток 3,6 А, то есть  $K_{нл} = 0,45$  при  $K_{ну} = 0,74$ . Суммарные потери мощности в транзисторах силового модуля при этом стали  $P_{\Sigma mp} \approx 31$  Вт.

### Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)

IGBT представляют собой сочетание входного MOSFET-транзистора с выходным мощным биполярным (*p-n-p*) транзистором. Наибольшее применение в IGBT нашла практическая модель, которая имеет паразитную *pnpn*-структуру, отраженную *pnpn*-транзистором (дополнительный маломощный биполярный транзистор) [13]. Этот транзистор нормально заперт благодаря шунтированию его эмиттер-базового перехода внутренним резистором. Вместе с основным силовым биполярным транзистором образовавшаяся структура создает глубокую внутреннюю положительную обратную связь. Такая связь создает предпосылки для образования тиристорного эффекта «защелкивания». Иными словами, скорости изменения коллекторного напряжения  $dU_c/dt$  и тока  $dI_c/dt$  реально должны быть ограничены во избежание «защелкивания», что было характерно особенно для ранних моделей. IGBT объединяют в себе некоторые достоинства мощных MOSFET и биполярных транзисторов, так и их недостатки:

1. Большое значение максимально допустимого напряжения коллектор – эмиттер  $U_{CE}$ , которое может составлять от 300 до 2200 В и более.
2. IGBT управляются напряжением (зарядом) и имеют большое входное сопротивление (мегаомы), так же как и MOSFET.
3. Транзисторы нормально закрыты и открываются при такой же, как у MOSFET, величине порогового напряжения.
4. IGBT обладают большей перегрузочной способностью в импульсном режиме, чем биполярные транзисторы.
5. Напряжение на переходе коллектор – эмиттер IGBT в открытом состоянии  $U_{CEsat}$  мало зависит от коллекторного тока  $I_c$  (для современных приборов  $U_{CE sat} = 2,3–3,5$  В).
6. Заряд, накопленный в базе мощного *p-n-p* транзистора, вызывает «хвост» при выключении IGBT: от 0,3 до несколько микросекунд в зависимости от разновидности (класса) прибора.

К существенным проблемам в управлении этих приборов можно отнести «высокопотенциальность» источника питания затвора. Речь идет о том, что между базой (не выведена) и эмиттером (выведен) силового (биполярного) транзистора IGBT всегда присутствует высокое напряжение  $U_{CE}$  пока он заперт. В то время как у обычного MOSFET, который нормально заперт, потенциал затвора отличается от потенциала истока не более чем на  $\approx \pm 20$  В. При некоторых проверках (ТУ) затвор MOSFET закорачивается с истоком. В связи с этим требования к схемам управления и драйверам для приборов MOSFET значительно снижены, по сравнению с похожими проблемами, которые необходимо преодолеть для IGBT, где, например, нужна защита от понижения напряжения затвора  $< +8$  В [13].

Рекомендации по коэффициентам электрической нагрузки  $K_{нл}$  для IGBT приведены в таблице 3. В частности, по обеспечению защиты перехода затвор – эмиттер IGBT они аналогичны рекомендациям для цепи затвор – исток MOSFET. Дополнительные рекомендации для применения IGBT:

• Необходимо предусматривать ограничение скорости изменения коллекторного напряжения и тока с запасом относительно предельных значений  $dU_c/dt$  и  $dI_c/dt$ , что одновременно снижает уровень помех.

- Для большинства IGBT величина коллекторного тока при КЗ не должна превышать (5–10)-кратного максимального значения с учетом температуры и в течение ограниченного интервала времени (например, 10 мкс).

Подчеркнем, что основные достоинства IGBT проявляются при рабочих частотах от 1 до 40 кГц, то есть актуально применение этих приборов в устройствах управления электроприводом, в инверторах для ИБП с ШИМ до 20 кГц и т. п.

### Интегрированные силовые модули

Интегрированные или интеллектуальные силовые модули (ИСМ или IPM) чаще всего представляют собой объединение в одном корпусе нескольких бескорпусных силовых приборов одного класса или их комбинации разных классов. Для примера можно указать одно-тиристорный модуль, MOSFET-полумост или мост со встречно-параллельными диодами каждого транзистора, IGBT-полумост или мост, имеющий встречно-параллельные диоды, выпрямительный диодный мост вместе с однофазным или трехфазным IGBT-мостом и другие сочетания. В некоторых случаях в эти силовые структуры встраиваются и драйверы для управления и защиты [14, 15].

Естественно, что все приведенные ранее особенности работы конкретных классов дискретных силовых приборов (диоды, тиристоры, MOSFET, IGBT) имеют место и в их комбинациях, то есть в IPM. Поэтому рекомендации по выбору коэффициентов электрической нагрузки дискретных приборов (табл. 3) распространяются и на IPM.

**Заключение**

1. Наиболее часто выходят из строя силовые транзисторы, затем силовые диоды и диоды обрaмления силовых ключей (антипараллельные, в цепях снабберов, фиксаторов уровня). Характер отказов (табл. 1) — пробой (выжигания): токовый, потенциальный, по мощности. Причины отказов, в основном, таковы: отсутствие необходимого запаса рабочих параметров компонентов относительно их предельных значений, нарушение нормальных режимов пуска/выключения, неправильный выбор алгоритма работы устройств управления и защиты от перегрузок. Реже встречаются отказы коммутирующих устройств, силовых трансформаторов, драйверов силовых ключей. Чаще всего эти отказы вторичны и вызваны первичным отказом силовых компонентов. В целом вероятность появления отказов, кроме упомянутых причин, связана как с просчетами проектирования, недостаточным объемом проверок, моделирования и испытаний, так и с неполным учетом реальных условий эксплуатации (табл. 2).
2. В общем виде основные мероприятия, повышающие надежность СУ, следующие:
  - контроль состояния и быстрое реагирование/отключение от первичной сети электропитания в случае необходимости;
  - ограничение пусковых токов;
  - выполнение силовой части на надежных, экспериментально проверенных компонентах, а также выбор правильных коэффициентов нагрузки  $K_{нi}$  по напряжению, току и мощности (табл. 3);
  - наличие эффективной комплексной защиты от различных перегрузок и других аварийных состояний (токовые перегрузки, КЗ, перенапряжения, превышение допустимой температуры или энергии и т. д.);
  - выполнение мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости силовой части и повышение помехоустойчивости устройств управления и защиты;

- рациональные конструктивные решения по эффективному отводу тепла, обеспечению необходимого качества электроизоляции, по рациональной разводке электро монтажа и т. д.
3. При испытаниях опытного (экспериментального) образца необходимо обеспечить такой объем испытаний, который позволит проверить выполнение сделанных рекомендаций, в частности:
    - проверку температурных режимов работы силовых компонентов и СУ в целом;
    - реальную проверку устройств защиты от перегрузок (с проверкой работы силового канала);
    - комплексное исследование переходных режимов, например, процессов включения/отключения образца, имитацию нештатных ситуаций.
  4. При производстве поставочных партий или серийных образцов изделий необходимо обеспечить:
    - входной контроль наиболее ответственных узлов и компонентов (прежде всего силовых);
    - достаточный объем технологической тренировки изделий и эффективные режимы ее проведения.
  5. При эксплуатации СУ у потребителей необходимо по возможности обеспечить сбор и анализ причин отказов компонентов и узлов, а также организовать оперативную работу по их устранению.

*Продолжение следует*

**Литература**

1. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 1 // Силавая электроника. 2008. № 3.
2. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 2 // Силавая электроника. 2008. № 4.

3. Электромагнитная совместимость технических средств / Справочник. Под ред. В. С. Кармашева. М.: Госстандарт, 2001.
4. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 1 // Силавая электроника. 2006. № 4.
5. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силавая электроника. 2007. № 4. 2008. № 1.
6. Колосов В., Мухтарулин В. Устранение недопустимых воздействий на электронную аппаратуру из сетей электропитания // СТА. 2001. № 2.
7. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. М.: Технология, 2003.
8. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 2 // Силавая электроника. 2007. № 1.
9. Антонов С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Современная электроника. 2007. № 8.
10. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силавая электроника. 2006. № 2.
11. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2. // Силавая электроника, 2008, №1.
12. Эраносян С., Ланцов В. Квазирезонансные источники вторичного электропитания: проблемы, новый взгляд // Силавая электроника. 2007. № 3.
13. Иванов В. В., Колпаков А. И. Применение IGBT // Электронные компоненты. 1996. № 1(2).
14. Колпаков А. И. Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.
15. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: вчера, сегодня, завтра // Силавая электроника. 2006. № 1.