

Надежность силовых устройств

в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения.

Часть 4. Импульсные источники питания

В общем виде рассмотрены основные проблемы импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ) и приведены меры, способствующие повышению их надежности. Более подробно изложены практические рекомендации по обеспечению надежности импульсных ИВЭ и их узлов. Рассмотрены конкретные мероприятия по повышению надежности импульсных источников питания.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Саркис Эраносян

sergera840@mail.ru

В части 1 [1] настоящей статьи указывалось, что, несмотря на очевидные достижения в последние годы 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. Несмотря на общее улучшение качества продукции, благодаря внедрению в фирмах систем управления качеством продукции на основе стандартов серии ISO9000, реальная надежность силовых устройств при эксплуатации улучшается более медленно. Анализируются факторы, влияющие на такое неблагоприятное положение, в том числе и заметное снижение уровня и объемов работ по повышению надежности, в частности силовых устройств, особенно в России.

В части 2 [2] статьи для сравнения анализируется практика обеспечения надежности изделий в Советском Союзе и в России. Положительно оценена роль служб надежности, существовавших в организациях и на предприятиях в СССР. Приводятся конкретные примеры работы таких служб. Для решения задач обеспечения высокой надежности изделий, особенно в сложных условиях эксплуатации, службы надежности выполняли многие работы в этом направлении. В частности, производились расчеты 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 работы, возлагая их на разработчиков.

В части 3 статьи [3] характеризуются общие черты и особенности силовых устройств (СУ) и их влияние на обеспечение надежности. Приведена информация о характерных отказах и неисправностях СУ, обусловленных как отказами силовых компонентов, устройств управления, так и недостаточным учетом реальных условий эксплуатации. Рассмотрены основные причины их возникновения, а также факторы влияния. Приведены рекомендации по применению силовых полупроводниковых приборов и даны примеры их выбора в конкретных СУ.

Отказы импульсных источников питания. Причины и факторы влияния

В настоящей работе будут рассмотрены импульсные источники питания только на основе высокочастотных транзисторных преобразователей. Однако заметим, что предложенная методология обеспечения надежности импульсных ИВЭ в целом применима и к тиристорным преобразователям (инверторам).

У импульсных источников отказы происходят не реже, а даже чаще, чем вообще у силовых устройств. Это связано со следующими обстоятельствами:

- Импульсные ИВЭ, работающие на высоких частотах преобразования (от 20 до 300 кГц), представляют собой одни из самых сложных СУ.
- В питающей сети переменного тока часто случаются различные аномальные явления и аварии, к которым менее чувствительны такие СУ, как нагревательные печи, бойлеры, отдельные виды электроприводов и т. д.
- К выходу (выходам) источника, как правило, подключено большое количество устройств потребителей с различными режимами работы, что повышает вероятность возникновения различных аварийных ситуаций.

Как упоминалось в [3], в импульсных ИВЭ могут происходить как внезапные (катастрофические) отказы, так и постепенные отказы. Отказы первого типа связаны с выходом из строя силовых компонентов (силовых транзисторов, диодов) в виде пробоев (выжиганий): токовых, потенциальных, по мощности, из-за перегрева. Причины таких отказов в основном следующие: 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. Постепенные (параметрические) отказы импульсных ИВЭ случаются реже и имеют гораздо меньшее значение. В частности, при длительной или интенсивной эксплуатации возможны случаи, когда уход выходных параметров ИВЭ может быть весьма значительным. Могут возникать такие отказы, как недопустимое изменение выходного напряжения, существенное увеличение пульсаций. В целом веро-

ятность появления отказов, кроме упомянутых причин, связана как с просчетами проектирования, так и с неполным учетом реальных условий эксплуатации.

Авторы были неоднократно свидетелями таких ситуаций, когда импульсные ИВЭ разрабатывались с нарушением (игнорированием) оптимальных алгоритмов проектирования, в том числе рекомендаций по обеспечению надежности. Положение усугублялось в тех случаях, когда такие работы выполнялись специалистами без должного практического опыта. Подобные случаи, характерные для последних лет, описаны, например, в статье [4]. В ней приводятся примеры, как такие ИВЭ или вообще не доходили до освоения в производстве, или долго дорабатывались «до кондиции» уже непосредственно на стадиях производства, поставки и эксплуатации.

Показатели надежности импульсных источников питания

Представляет интерес познакомиться с показателями надежности практических импульсных ИВЭ с сетевым входом (AC/DC-преобразователей). Как правило, для ИВЭ коммерческого и промышленного исполнения приводится такой показатель надежности (безотказности), как наработка на отказ или среднее время безотказной работы (T_{cp} или MTBF). В таблице представлены сведения о показателях надежности некоторых серийно выпускаемых импульсных ИВЭ отечественных и зарубежных фирм. Таблица составлена на основании сведений, приведенных в [5–8].

Из таблицы 1 следует, что безотказность импульсных ИВЭ, выпускаемых после 2000 г., определяется T_{cp} и находится в пределах 150 000–1 200 000 ч. Значение T_{cp} чаще всего приводится при температуре окружающего воздуха +25 °С. При повышении температуры выше +40 °С (иногда +45 или +50 °С) рекомендуется или снижать значение тока нагрузки (на 40–50%), или производить интенсивное охлаждение источника, например, обдувом. Заметим, что по поводу высоких показателей T_{cp} у специалистов возникают вопросы о корректности и достоверности приводимых значений, особенно если достоверно неизвестно, получены они расчетным или экспериментальным путем. Так, для импульсных ИВЭ фирмы «ММП Ирбис» в таблице указаны расчетные значения T_{cp} . В то же время при проведении определительных испытаний на надежность, например, ИВЭ типа БПС200Е этой фирмы [5] при минимальном числе отказов $C = 1$, длительности испытаний $t_{исп} = 4000$ ч (примерно полгода), необходимое количество образцов источников составил $N_{min} = 150\,000/4000 = 38$. Если же проводить испытания на надежность импульсных ИВЭ с большими значениями T_{cp} при тех же условиях, например: $T_{cp} = 550\,000$ ч (LPS352-C фирмы Astec) [8] или 1 200 000 ч (KP600A-220D1212CL фирмы «Александр-Электрик») [6], то потребуются уже $N_{min} = 138$ и $N_{min} = 300$ образцов соответственно.

Конечно, можно принять число отказов $C = 0$, что позволит уменьшить количество об-

разцов, но все равно оно будет большим. В подобных случаях приходится прибегать к проведению ускоренных испытаний ИВЭ на надежность (методика проведения которых не всегда достаточно достоверна), дополняя их анализом отказов при производстве и особенно при эксплуатации. В любом случае определение или подтверждение высоких показателей надежности ИВЭ является длительным и дорогостоящим мероприятием (большое количество испытываемых образцов, дополнительное оборудование и т. д.).

Особенности проектирования надежных импульсных источников питания

Вопросам обеспечения надежности импульсных источников питания при проектировании посвящено сравнительно немного статей. Можно указать, например, что принципы рационального проектирования и оптимизации импульсных ИВЭ, в том числе с некоторыми рекомендациями по обеспечению их надежной работы, изложены в [9, 10, 11]. В частности, в них дано сравнение различных типов силовых ключей, рассматриваются вопросы их надежного переключения, даются сведения об обеспечении плавного пуска ИВЭ, анализируются некоторые схемы защиты от токовых перегрузок, КЗ и перенапряжений. Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) источников, а также рекомендации по рациональному конструированию ИВЭ. Самый общий подход к оценке надежности ИВЭ содержится в статье [12]. В частности, в указанной работе в результате анализа требований к ИВЭ, предназначенных для комплектования наземных стационарных и подвижных объектов бортовой морской, авиационной и космической техники, приводится следующая информация. Наибольшая потребность существует в модульных источниках питания с наработкой на отказ от 10 000 до 50 000 ч (37%) и от 50 000 до 100 000 ч (33%).

Это достаточно жесткие требования, если учитывать реальные режимы применения ИВЭ в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) в аспекте внедрения новых государственных стандартов «Климат-7» и «Мороз-6». Авторы не обнаружили публикации о комплексном подходе к обеспечению надежности импульсных ИВЭ на современном уровне. Также нет работ с приведением практических рекомендаций по обеспечению надежной работы импульсных источников питания с учетом использования современных компонентов на всех стадиях проектирования и производства. Поэтому авторы взяли на себя смелость попытаться комплексно и в практическом плане изложить основные тезисы по решению этой проблемы.

Для обеспечения надежной работы ИВЭ, особенно с питанием от сети переменного тока, при проектировании необходимо выполнить основные процедуры, которые во многом совпадают с общим алгоритмом разработки надежных силовых устройств [3]. Но для импульсных ИВЭ необходимо дополнительно выполнить еще ряд специальных мероприятий и рекомендаций, обусловленных работой ИВЭ на высоких частотах преобразования — от 50–80 до 200–300 кГц. Кроме того, имеют существенное значение специфика их структуры, схемотехники, характер нагрузки и т. д. В общем, это предполагает при разработке ИВЭ выполнение следующих мероприятий:

1. Выбор рациональной структуры ИВЭ, в частности:
 - выбор типа и схемы корректора коэффициента мощности (ККМ/PFC) при питании ИВЭ от однофазной сети переменного тока;
 - выбор силовой части преобразователя напряжения (ПН) в зависимости от мощности проектируемого ИВЭ, особенностей управления и т. д.
2. Выбор быстродействующих силовых ключей (транзисторов, диодов), а также других компонентов (магнитных элементов, кон-

Таблица. Показатели надежности некоторых импульсных источников питания (AC/DC-преобразователей)

Тип, модель (год)	Фирма	Выходные параметры			Среднее время безотказной работы (T_{cp}), 10 ³ ч (при T °С)	Примечание
		P _{вых} , Вт	U _{вых} , В	I _{вых max} , А		
МП60А (2006)	ММП «Ирбис»	50	5	10	150	КПД = 82%
БПС200Е (2006)	ММП «Ирбис»	200	24	8,3	150	КПД = 86–90%
KP600A-220D1212CL (2007)	ООО «Александр-Электрик»	480	12 12	20,0 20,0	1200 (+25)	КПД = 85%
KP600A-220S48CL (2007)	ООО «Александр-Электрик»	600	48	12,5	1200 (+25)	КПД = 85%
LWR1601-6 (2005)	Power-One	125	24	5,1	600 (+40)	КПД = 88%, КМ = 0,91
FNP300-1012 (2005)	Power-One	300	12	25,0	200 (+25)	КПД = 83%, КМ = 0,96
LPQ112-B (2002)	Astec	110	+5 +12 –12 25	9,0 4,5 0,7 2,5	550 (+25)	$\eta = 70\%$ без ККМ
LPS352-C (2002)	Astec	350	+5	70,0	550 (+25)	КПД = 75%, КМ = 0,99

Примечание. Принятые обозначения: КМ — коэффициент мощности (PF — Power Factor).

денсаторов), способных эффективно работать при высоких частотах преобразования. При выборе компонентов предпочтение необходимо отдавать более надежным компонентам хорошо зарекомендовавших себя фирм-изготовителей. Для выбора силовых компонентов можно, например, воспользоваться сведениями из статьи [13]. При выборе классов и типов силовых компонентов рекомендуется учитывать особенности их применения, например, рассмотренные в [3]. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать интегрированным силовым модулям [14, 15].

3. Выбор схемы ограничения пусковых токов соответственно мощности импульсного ИВЭ, его особенностей и типу питающей сети переменного тока (однофазная или трехфазная) [16].
4. Выбор оптимальной схемы управления силовыми ключами: соответственно выбранной структуре ККМ, преобразователя, а также частоте преобразования.
5. Определение оптимального алгоритма функционирования и схемы комплексной защиты ИВЭ от различных аварийных ситуаций:
 - аномалии в сети переменного тока (превышение допустимых отклонений напряжения, пропадание фаз при трехфазной питающей сети и другие);
 - перегрузки по току, короткие замыкания (КЗ), недопустимый перегрев силовых ключей (транзисторов), превышение максимально допустимой мгновенной мощности (энергии) на ключах, а также перенапряжения и недопустимое снижение напряжения на выходе (выходах).
6. Выполнение мероприятий по обеспечению ЭМС, обусловленных генерированием при работе импульсного ИВЭ спектра электромагнитных помех большой интенсивности и в широком диапазоне частот. При этом, в отличие от многих видов силовых устройств, необходимо обеспечить подавление помех не только на зажимах питающей сети, но и на выходе ИВЭ [17–20]. Рассмотрим подробнее специальные рекомендации по проектированию надежных импульсных ИВЭ, обусловленные их спецификой.

Схемы ограничения пусковых токов

Схемы ограничения пусковых токов подробно описаны в [10]. В маломощных (до 30–50 Вт) импульсных источниках питания для ограничения пусковых токов рекомендуется простое решение: включить токоограничительный резистор R_0 в цепь однофазного переменного тока или после сетевого выпрямительного моста (до конденсатора). Отметим, что в рабочем режиме функционирования источника такой резистор ограничивает и регулярные зарядные токи конденсатора сетевого выпрямителя. При этом происходит подавление высших гармоник тока и улучшается коэффициент мощности (КМ). В более мощных (до 1–1,5 кВт) ИВЭ в качестве токоограничительных резисторов R_0 можно ис-

пользовать мощные терморезисторы (термисторы) с отрицательным температурным коэффициентом (NTC). В холодном состоянии (перед пуском) сопротивление NTC-терморезистора большое, а к моменту окончания пуска оно уменьшается в 30–50 раз, что позволяет практически не снижать КПД источника. Недостаток — необходимость выдержать некоторое время для «остывания» терморезистора с целью восстановления его начального сопротивления. Это не всегда возможно, например, при несанкционированных отключениях/включениях электропитания.

В мощных импульсных ИВЭ часто используют схемное решение, когда мощный постоянный резистор R_0 , включенный перед конденсатором сетевого выпрямителя, в конце процесса пуска шунтируется автоматическим переключателем — сильноточным электро-механическим реле или тиристором. В наиболее простом случае момент срабатывания переключателя определяется или по заданной длительности пуска, или по напряжению на конденсаторе. Этот резистор вновь подключается при падении напряжения ниже допустимого уровня при перегрузках и других аварийных ситуациях. Недостатки такого решения: а) усложнение схемы; б) дозаряд конденсатора после замыкания переключателя, приводящий к значительным токам через конденсатор [10, 16]. В работе [16] указано, что в статическом трехфазном инверторе 220 В 400 Гц мощностью 6 кВт с питанием от трехфазного напряжения 380 В 50 Гц, разработанном одним из авторов, описанная схема пуска в процессе пятилетней эксплуатации не отказала ни разу. В последнее время для ограничения пусковых токов все большее применение находят мощные терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (PTC). При штатном пуске такой терморезистор так же, как и постоянный резистор, ограничивает величину зарядного тока конденсатора до безопасной величины. После окончания процесса заряда он шунтируется силовым реле. Если же возникают нештатные ситуации (аварии): сбой в момент или после заряда конденсатора, пробой (КЗ) конденсатора, неисправность реле, то при использовании постоянного резистора возможен выход из строя самого резистора и других компонентов схемы. В таких ситуациях PTC-терморезистор, быстро нагреваясь, переходит в высокоомное состояние, увеличивая свое сопротивление во много раз, вплоть до десятков килоом [21]. В этой же статье приведены параметры мощных PTC-терморезисторов типа J20X фирмы Epcos, а также результаты исследований применения PTC J204 ($R_0 = 100 \text{ Ом} \pm 25\%$, $U_{\max} = 800 \text{ В}$), включенных в схему мощного выпрямителя в штатном и нештатном режимах. Выпрямитель питается от трехфазной сети 3×380 В 50 Гц («треугольник») с конденсатором сглаживающего фильтра емкостью 940 мкФ. Для большей надежности использовано параллельное включение двух терморезисторов PTC J204.

В работе [16] показано, что в мощных (более 10 кВт) импульсных ИВЭ, которые, как правило, питаются от трехфазной сети переменного тока, рекомендуется включать сетевые токоограничительные дроссели. Здесь

же приведены данные некоторых трехфазных сетевых дросселей фирмы Elhand [22]. Автором статьи [16] в пакете MicroCap 7.0 была промоделирована схема входной части статического преобразователя с мощностью 12 кВт с сетевым трехфазным дросселем EDN3N 0,6/32 (0,6 мГн/32 А — в каждой фазе). В сглаживающем LC-фильтре применены 2 дросселя типа ED1W (2,5 мГн/100 А). Фильтр имеет входной конденсатор емкостью 1020 мкФ и рассчитан на подавление пульсаций 300 Гц. Расчетная величина пускового тока, протекающего через диоды трехфазного выпрямительного моста (160MT120KB фирмы IR), не превышает допустимого значения. Переходный процесс длится не более 10 мс, что не должно привести к срабатыванию установленного на входе автоматического выключателя на ток 25 А.

Дополнительно отметим, что во входных устройствах ИВЭ должны быть встроены узлы, которые при выключении автоматически «гасят» («разряжают») энергию конденсаторов сетевых выпрямителей, в частности, мощный резистор последовательно с сильноточным реле или тиристором. Особенно это важно для мощных ИВЭ и высоковольтных источников питания.

Корректоры коэффициента мощности

Применение стандартных импульсных ИВЭ с конденсаторами большой емкости в сетевом выпрямителе приводит к искажению синусоидальной формы потребляемого тока и снижению коэффициента мощности — $\text{KM}/\cos\varphi$, или Power Factor (PF). Это явление обусловлено возрастанием реактивной (емкостной) составляющей потребляемого из сети тока, что соответственно приводит к появлению высших гармоник. При этом типичное значение $\text{KM}(\cos\varphi)$ с емкостным фильтром составляет 0,4–0,6. С точки зрения надежности большие зарядные токи снижают срок службы диодов сетевого выпрямителя и конденсаторов. Начиная с конца 1990-х гг., за рубежом стали быстро развиваться импульсные ИВЭ с коррекцией коэффициента мощности (ККМ/PFC). Такие ИВЭ-ККМ, как правило, используются при питании их от однофазной сети переменного тока мощностью до 3–5 кВт и могут обеспечить КМ порядка 0,8–0,99, то есть практически синусоидальную форму потребляемого из сети тока. Вступившие в действие в Европе и в развитых странах мира новые стандарты ЭМС (EN61000-3-2-95; IEC 6100-3-2) вызвали в России появление аналогичных стандартов, в частности ГОСТ Р 51317.3-2-99 [17]. Для уменьшения содержания высших гармоник тока при построении ИВЭ-ККМ используется два способа:

1. Пассивная коррекция путем включения резистора или НЧ-дросселя (без зазора) в цепи переменного тока после сетевого фильтра, а также стандартного НЧ-дросселя после выпрямительного моста (смотри выше при описании схем ограничения пусковых токов).
2. Активная коррекция, то есть применение ККМ на основе повышающего стабилизатора выпрямленного сетевого напряжения.

Первый способ применим для сравнительно маломощных источников (до 50 Вт) и позволяет обеспечить КМ порядка 0,75–0,85 при дополнении его некоторыми схемными решениями, например [23]. При втором способе обеспечивается более высокое значение КМ — порядка 0,95 и выше. В этом случае низкочастотное (например, 100 Гц) пульсирующее напряжение после сетевого выпрямителя поступает на повышающий импульсный стабилизатор напряжения, работающий на высокой частоте (порядка 100–200 кГц). В состав активного корректора КМ входят: накопительный ВЧ-дрессель, силовой ключ (MOSFET, IGBT), бустерный диод, выходной буферный конденсатор и ККМ-контроллер. Выпрямленное сетевое напряжение повышается и стабилизируется на уровне +350–400 В. Более подробно принцип работы ККМ, требования к его узлам и конкретные схемно-компонентные реализации описаны, например, в статьях [13, 14].

Надежная работа ККМ обеспечивается при следующих условиях:

- Индуктивность накопительного ВЧ-дресселя гарантирует неразрывный ток дресселя в основных режимах функционирования.
- В силовом ключе следует использовать IGBT или MOSFET; но, по мнению авторов, предпочтительнее при частотах коммутации более 100 кГц применять MOSFET с параметрами: $U_{DSS} \geq 600 \text{ В}$, $I_D \geq P_{\text{вых}} \text{ ККМ} / U_{\text{вых}} \text{ ККМ} \times \eta \times K_{\text{нд}}$, при этом желательно, чтобы $R_{DS \text{ on}} = (0,1-2) \text{ Ом}$ — соответственно для мощности от 1500 до 100 Вт.
- В качестве бустерного диода оптимально использование высоковольтных ($U_{RRM} \geq 600 \text{ В}$) быстродействующих диодов, желательны диоды Шоттки из карбида кремния (SiC) [13].
- Должна быть обеспечена защита силовых компонентов от токовых перегрузок и КЗ. Вообще, по теории надежности включение дополнительного силового устройства (активного ККМ) в состав ИВЭ увеличивает количество его компонентов и тем самым несколько снижает его надежность. Однако следует учитывать, что в этом случае преобразователь напряжения работает в более комфортном режиме, поскольку его напряжение питания стабилизировано в широком диапазоне изменения сетевого напряжения и тока нагрузки. Кроме того, обеспечивается первичная защита от перегрузки по току, так как контроллер в ККМ ограничивает ток перегрузки в допустимых пределах. Поэтому в информации фирм-производителей импульсных ИВЭ, [7, 8] авторы не обнаружили данных о снижении показателей надежности ($T_{\text{ф}}$) при выпуске новых моделей ИВЭ с активной коррекцией коэффициента мощности.

Преобразователи напряжения

Выбор рациональной, с точки зрения надежности, структуры силовой части преобразователя напряжения (ПН) в зависимости от мощности проектируемого ИВЭ можно произвести, например, в соответствии с методикой расчетов потерь мощности в ИВЭ по [10]. В зависимости от мощности ИВЭ ориентировочно следует применять следующие классы ПН:

- в диапазоне мощностей до 100–300 Вт — однотактные преобразователи напряжения: обратноточковые (ОПН-О) или прямоходовые (ОПН-П) с размагничивающей обмоткой вследствие относительной простоты силовой части;
- в диапазоне мощностей от 300 до 1500 Вт — однотактные прямоходовые ОПН со структурой типа «косой» мост (ОПН-П/КМ) или двоянные двухтактные полумостовые (ДПН-полумост) — с двумя последовательно включенными силовыми ключами;
- в диапазоне мощностей от 1500 Вт до 3–5 кВт и более — вне конкуренции прямоходовые ОПН-П/КМ или двухтактные мостовые (ДПН-М) одинарные или двоянные.

Предложенные рекомендации основаны на изучении большого количества публикаций и опыте авторов. Однако возможны и отклонения от этих рекомендаций, связанные с традициями и опытом проектирования различных разработчиков и фирм. В частности, некоторые исследователи полагают, что, например, двоянные ОПН-О могут применяться в импульсных ИВЭ до мощностей порядка 1 кВт. Среди структур ПН авторы отдают безусловное предпочтение ОПН-П/КМ, в котором принципиально нет сквозных токов. В такой структуре несложно организовать защиту от токовых перегрузок и по мощности, поскольку оба силовых ключа и первичная обмотка силового трансформатора включены последовательно.

Двухтактные структуры преобразователей (ДПН-полумост, ДПН-М) отличаются большей сложностью. Несмотря на их некоторые достоинства (например, удвоенная частота пульсаций на выходе), эти структуры имеют такие существенные недостатки, как принципиальная возможность протекания сквозных токов через силовые ключи при их переключении. В мостовых схемах присутствует явление подмагничивания силового трансформатора при работе на LC-фильтр. Для ликвидации подмагничивания приходится использовать разделительный конденсатор с большой реактивной мощностью, включенный последовательно с первичной обмоткой силового трансформатора, или/и вводить схему контроля подмагничивания силового трансформатора. Кроме того, из опыта предыдущих разработок один из авторов (С. А. Эраносян) показал [24], что можно получить схему мостового преобразователя, в котором опасное подмагничивание сердечника трансформатора практически отсутствует. Для этого нужно комбинировать, выбирая частоту работы, материал магнитопровода (наклонная петля перематывания), а также параметры силового трансформатора (уменьшение L_s). Ослабление влияния сквозных токов обычно осуществляется включением последовательно с транзисторами дресселей насыщения, работающих только в моменты переключения транзисторов. В остальное время накопленная в них энергия рассеивается в параллельно включенных RCD-цепях. Вместе с тем в некоторых случаях, например, в большинстве высоковольтных преобразователей, наиболее эффективно использование именно структур ДПН полумостовых даже

при небольших мощностях (от 10–20 Вт) или в более мощных (более 400–500 Вт) мостовых ПН. Такое положение объясняется стремлением максимально использовать достоинства двухполупериодных высоковольтных выпрямителей-умножителей.

Общие рекомендации по выбору надежных силовых ключей и режимов их работы были кратко рассмотрены ранее. Более подробно об этом сказано в работе [3]. Развитие мощных высоковольтных MOSFET и IGBT часто ставит перед разработчиком вопрос: что из них выбрать? Рекомендации на эту тему даны в работе [25]. По мнению авторов, в настоящее время основные условия выбора в пользу того или иного класса мощных транзисторов для применения в преобразователях ИВЭ заключаются в соблюдении баланса следующих факторов:

1. При единичной мощности ИВЭ менее 3–5 кВт предпочтительнее использовать MOSFET, а не IGBT (то есть если не используется параллельное соединение нескольких импульсных ИВЭ).
2. В настоящее время при частотах преобразования более 50 кГц (возможно, 75–100 кГц) предпочтение нужно отдавать MOSFET. В каждом конкретном случае, кроме приведенных рекомендаций, необходимо также учитывать условия эксплуатации (максимальную рабочую температуру, наличие ионизирующих излучений), ограничения по поставке и стоимости компонентов и т. д. После выбора надежных силовых компонентов (по публикациям, рекомендациям фирм-изготовителей и т. п.) необходимо их экспериментально проверить для определения возможности эффективной работы на требуемой частоте преобразования (коммутации) в принятой структуре преобразования. Для обеспечения большей мощности ИВЭ можно применять параллельное соединение силовых ключей (транзисторов), причем при использовании MOSFET практически не требуется использование симметрирующих компонентов в их цепях.

Для предотвращения в процессе коммутации возникновения на выводах транзисторов перенапряжений к переходам транзисторов (сток-исток для MOSFET, коллектор-эмиттер для биполярных транзисторов и IGBT) должны быть подключены специальные компоненты и цепи — поглотители энергии выбросов. К числу таких цепей относятся: RC-цепи (демпферы), RCVD-цепи (снабберы — snabbers, фиксаторы уровня — clampers). В маломощных ИВЭ для этой цели можно применять мощные стабилитроны с последовательно включенными быстродействующими диодами. Силовые переходы транзисторов должны быть зашунтированы встречно-параллельными (антипараллельными) быстродействующими диодами для ограничения напряжений обратной полярности. Такие напряжения могут возникать из-за неправильного выбора силового трансформатора (большие значения L_s , C_s), собственных ВЧ-колебаний в силовых ключах большой амплитуды и т. д. При этом время восстановления обратного сопротивления t_{rr} этих диодов должно быть, по крайней мере, не хуже

времени включения t_{on} и выключения t_{off} транзисторов. В большинстве случаев в структурах транзисторов уже имеются такие диоды. К сожалению, надо отметить, что их быстродействие не отвечает изложенным требованиям. Поэтому на высоких частотах преобразования (например, для MOSFET при частоте более 150 кГц) приходится использовать транзисторы без встроенных диодов. В этом случае встречно-параллельно транзисторам включаются дискретные сверхбыстродействующие (ultrafast) диоды.

Комплексная защита импульсных ИВЭ от различных аварийных ситуаций

Наличие оптимальной комплексной защиты импульсных ИВЭ, как и всех других силовых устройств, от различных аварийных ситуаций — одно из главных условий надежной работы источников. В общем случае защита мощных импульсных ИВЭ иерархически выполняется многоуровневой и многофункциональной:

- Защита по входу:
 - общая защита от токовых перегрузок и КЗ (входные предохранители, автоматы включения);
 - защита от аномальных явлений в питающей сети переменного тока.
- Защита преобразователя (инвертора) и силовых ключей:
 - защита от токовых перегрузок и КЗ;
 - защита силовых ключей по мгновенной мощности;
 - защита силовых ключей от перегрева.
- Защита выхода ИВЭ:
 - защита от перенапряжений;
 - защита от уменьшения или исчезновения выходного напряжения (выходных напряжений);
 - допусковый контроль выходных напряжений (только для ИВЭ специального назначения);
 - защита по току — общая или/и по каждому выходному каналу.
- Защита устройства управления от токовых перегрузок, от перенапряжений по входу и по цепи электропитания.

Плавкие предохранители и автоматы включения и защиты

Несмотря на наличие различных узлов электронной и тепловой защиты, в составе защиты ИВЭ необходимо всегда использовать плавкие предохранители. 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. Следует указать, что всегда существует вероятность пробоев и КЗ в различных частях схемы ИВЭ вне традиционных «мест» установки узлов и компонентов электронной защиты. Кроме того, 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. В последнее время номенклатура плавких предохранителей была существенно расширена, а их параметры улучшены. В работе [26] приведены пояснения по основным параметрам плавких предохранителей и рекомендации по их выбору.

Автоматы включения и защиты (пускатели) обычно используются в мощных источниках питания, выполненных конструктивно в блочном (не модульном) исполнении. Из зарубежных автоматов наиболее часто применяются изделия фирм [27, 28].

Защита преобразователя (инвертора) от аварийных ситуаций

Предварительно отметим общее правило: перед непосредственным выключением преобразователя (ИВЭ) при его работе в компьютеризированной аппаратуре в нем должен быть сформирован информационный сигнал об этом событии. Сигнал передается в аппаратуру как для сигнализации, так и для сохранения обработанной информации во избежание ее потери.

Защита преобразователя (инвертора) от токовых перегрузок и КЗ

Такая защита обычно организуется с помощью компараторов, встроенных в устройство (микросхему) ШИМ- или ЧИМ-управления, на которые приходит сигнал токовой перегрузки с датчика (датчиков) тока. В качестве датчиков тока используются резисторы, трансформаторы тока и датчики Холла, которые включаются или последовательно с силовыми транзисторами, или/и с силовым трансформатором. Защита от перегрузки по току чаще всего происходит при ограничении средней величины тока за счет уменьшения длительности импульсов при ШИМ-управлении или уменьшения частоты преобразования при сохранении длительности импульсов при ЧИМ-управлении. Для мощных и высоковольтных источников необходимо полностью выключать инвертор при значительном превышении (более 15–25%) тока или КЗ. Это делается через короткое время (не более 10–100 мкс при частоте преобразования 200–20 кГц соответственно), пока происходит ограничение тока. Для мощных высоковольтных источников обязательно быстрое выключение преобразователя. Исполнительный узел (компонент) быстрого выключения должен быть с памятью, например, на основе триггера или мало-мощного тиристора. Принципиально это может быть выполнено или в самой микросхеме управления, или в ее обрательном при введении элемента выключения с памятью, или «снятием» напряжения питания с устройства управления.

Для защиты от значительных токовых перегрузок и КЗ возможно дополнительное применение быстродействующего предохранителя в цепи электропитания инвертора (после конденсатора сетевого выпрямителя или выходного конденсатора ККМ). Один из авторов заметил такую защиту в мостовом преобразо-

вателе мощного (3 кВт) высоковольтного (10–60 кВ) источника типа Compact 3K5 фирмы Ital Structures (Италия) [29] с питанием от однофазной сети переменного тока 230 В 50–60 Гц. В этой связи можно указать, например, на быстродействующие предохранители фирм Tyco Electronics [30] и Wickmann [31].

Защита силовых ключей от перегрева

В правильно спроектированном, с учетом максимальной температуры эксплуатации, преобразователе (импульсном ИВЭ), работающем в номинальном режиме при благоприятных условиях, такая защита может и не потребоваться. Однако если ИВЭ работает от «плохой» сети электропитания, когда возможны частые несанкционированные включения/отключения, а также токовые перегрузки (с ограничением тока, например, на уровне 120–135%) или изменение условий отвода тепловой мощности от ИВЭ, такая защита необходима. В простейшем случае роль защитного элемента выполняет биметаллический термовыключатель (термопредохранитель), устанавливаемый на теплоотводах — радиаторах силовых ключей. В качестве примера можно привести термовыключатели серии ВТЛ-xxx фирмы Nedis [32]. Возможно также применение термовыключателей типа G4-05 фирмы Thermodisk [33] и DFxxxS фирмы Dong-Yang [34].

В мощных источниках питания, как правило, используется принудительная вентиляция (обдув) силовых ключей и блоков в целом с помощью высокопроизводительных вентиляторов. На случай остановки (отказа) вентиляторов (заклинивание вала с крыльчаткой, сгорание обмоток электродвигателя, пробой электроизоляции и т. д.) в струе воздуха устанавливаются датчики температуры (например, терморезисторы). Сигнал аварии с этих датчиков поступает на узел защиты для отключения преобразователя или ИВЭ в целом.

Защита выхода ИВЭ

Защита выхода (выходов) ИВЭ от перенапряжений

Для большинства потребителей (РЭА на основе цифровых, аналоговых, аналого-цифровых микросхем, высокоточный электропривод и т. д.) неприемлемы даже кратковременные превышения номинальных значений напряжения питания сверх установленного допуска. В то же время при реальной эксплуатации возможны некоторые аномальные явления (аварийные ситуации), когда могут происходить импульсные, кратковременные или длительные превышения номинального значения выходного напряжения (выходных напряжений). Например, из-за превышения напряжения сети электропитания (например, более чем на +20% из-за отключения наиболее мощных потребителей от сети, перекаса фаз в сети), при скачкообразном сбросе тока нагрузки (на 100%) наиболее нагруженных выходных каналов за большее время, чем быстродействие импульсного ИВЭ. Также возможны

сбои и отказы в устройстве управления и другие случаи. Защиту выходов ИВЭ от перенапряжений (импульсных, кратковременных или длительных) можно осуществлять различными способами, например:

- установкой мощных ограничителей перенапряжений (стабилитронов, TVS-диодов, варисторов, электровакуумных разрядников в высоковольтных цепях) параллельно выходам ИВЭ;
- установкой параллельно самому мощному выходу ИВЭ тиристора-замыкателя с управлением от узла обнаружения перенапряжений (защита типа Crowbar или Shut down);
- выключением преобразователя после прихода сигналов о перенапряжениях на устройство управления и защиты.

Первый метод применяется тогда, когда надо ограничить импульсные перенапряжения. В частности, TVS-диоды (Transient Voltage Suppressors) способны ограничивать импульсные перенапряжения мощностью в сотни ватт и единицы киловатт, но в течение времени 1–10 мс. Например, униполярный TVS-диод типа P6KE6,8A имеет следующие параметры [34]: ограничение напряжения (начальное значение) на уровне 6,8 В $\pm 0,35$ В, импульсная мощность 600 Вт (1 мс), импульсный ток до 57 А, постоянная рассеиваемая мощность (с теплоотводом) 5 Вт. При превращении кратковременного перенапряжения в длительное подразумевается, что должна сработать защита от перегрузок по току в этом канале (смотри далее) и отключить преобразователь (ИВЭ). Естественно при этом, что мощные ограничители перенапряжений должны быть установлены на соответствующие теплоотводы-радиаторы и так выбраны по мощности, чтобы остаться в работоспособном состоянии после снятия перенапряжений.

Второй метод широко применялся с 1975-го и до 1990-х годов. Его суть в том, что при возникновении перенапряжения с допустимой временной задержкой срабатывает мощный тиристор-замыкатель, шунтируя выход ИВЭ и вызывая значительную токовую перегрузку вплоть до КЗ. При этом, конечно, должна сработать защита от токовых перегрузок и КЗ с обязательным выключением этого канала или ИВЭ в целом. Чтобы на каждом из выходных каналов не устанавливать тиристоры, сигналы о перенапряжениях непосредственно (при гальванически связанных каналах) или, если они гальванически не связаны друг с другом, то через оптроны, передаются на узел управления тиристором в самом мощном канале. Недостатки этого типа защиты:

1. Протекание дополнительных больших токов через компоненты ИВЭ, которые могут их повредить.
2. Возможность ложных срабатываний тиристора от различных ВЧ-помех.
3. Мало приемлем для очень мощных ИВЭ.

В последнем случае общепринято выключать преобразователь после прихода сигналов о перенапряжениях на устройство управления и защиты.

Защита от уменьшения или исчезновения выходного напряжения (выходных напряжений)

Защита подобного типа обязательна для импульсных ИВЭ всех компьютеров, информационно-измерительных систем и систем автоматизации, чтобы предотвратить появление ложной информации и, соответственно, некорректных или вообще ошибочных управляющих воздействий. Например, в персональных компьютерах с самого начала было принято, что сигналы о наличии и минимально допустимом уровне каждого из каналов электропитания (+5, +12, -12, +24 В) поступают на 4-канальный узел сравнения (например, 4-канальный компаратор LM 339N).

Допусковый контроль выходных напряжений используется, как правило, только для некоторых ИВЭ специального, например, оборонного назначения. Принцип его организации подобен предыдущему с той лишь разницей, что уставки напряжения должны быть двухуровневыми (например, $\pm 5\%$, $\pm 8\%$ и т. д.).

Защита выходов ИВЭ по току.

Наиболее просто такая защита выглядит для одного выходного канала. В этом случае можно использовать уже рассмотренную защиту преобразователя от токовых перегрузок. В многоканальном ИВЭ, в зависимости от специфики нагрузки, токовая защита по выходу может быть общей или/и по каждому выходному каналу, если каналы значительно отличаются по мощности. В первом случае сигналы от датчиков тока (резисторов, трансформаторов тока и других) через элементы согласования и развязки поступают для объединения на схему «ИЛИ» и далее на устройство управления и защиты ИВЭ. Наиболее просто организовать такую защиту с помощью трансформаторов тока, включаемых последовательно с вторичными обмотками силового ВЧ-трансформатора. При их использовании, во-первых, легко получить сигнал перегрузки нужного уровня по напряжению, а во-вторых, осуществить гальваническую развязку сигнала от силовой цепи.

Во втором случае, например, в маломощных (слаботочных) каналах, где используются линейные интегральные стабилизаторы напряжения, происходит ограничение выходного тока при перегрузках благодаря встроенным в них узлам защиты. При этом возникает перегрев стабилизатора и начинает срабатывать встроенная тепловая защита. Также возможно использование быстродействующих полупроводниковых предохранителей (IC-protectors) на токи 0,25–2,7 А (сопротивление 0,035–0,023 Ом) для разрыва цепи при КЗ на выходе стабилизаторов. В этом случае после выключения ИВЭ необходимо произвести замену предохранителя, что не всегда удобно. В упомянутых вариантах информация о возникшей аварии, благодаря наличию защиты от уменьшения (исчезновения) выходного напряжения какого-то канала, передается в устройство управления и защиты ИВЭ.

Защита устройства управления (УУ)

Для надежной работы импульсного ИВЭ в целом важно, чтобы само УУ было эффек-

тивно защищено от токовых перегрузок по выходу, от перенапряжений по входу и по цепи электропитания. Кроме того, необходимо обеспечить защиту УУ как от внешних, так и от внутренних помех, чтобы исключить сбой в работе устройства и соответственно нарушения в нормальном функционировании преобразователя (и ИВЭ в целом). Значение последнего требования особенно возрастает с увеличением мощности ИВЭ. Обеспечение ЭМС устройства управления достигается за счет:

- установкой «своего» фильтра помех по питанию;
- использования для электропитания УУ напряжения не ниже 12–15 В (а не 5 В);
- при необходимости повышения порога по входам УУ;
- гальванической развязки собственно ШИМ-контроллера, например, через оптопару, с внешним узлом сравнения в цепи обратной связи на стороне нагрузки;
- гальванической развязки сигналов о перегрузках с устройством управления и защиты;
- пространственного разделения при электромонтаже сигнальных цепей, цепей электропитания УУ и силовых цепей ИВЭ (возможно, вместе с элементами экранирования).

Заключение

1. Рекомендации по обеспечению надежной работы импульсных источников питания в принципе имеют много общего с изложенными ранее рекомендациями по проектировании надежных силовых устройств [3]. Прежде всего, это относится к таким моментам, как:
 - наличие узлов контроля состояния первичной сети электропитания и отключения при необходимости;
 - ограничение пусковых токов и плавный пуск,
 - выполнение силовой части на надежных, экспериментально проверенных силовых компонентах;
 - выбор оптимальных коэффициентов электрической нагрузки ($K_{нл}$) силовых компонентов;
 - наличие устройств комплексной защиты от токовых и других перегрузок;
 - выполнение мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости;
 - рациональные конструктивные решения по эффективному отводу тепла, обеспечению необходимого качества электроизоляции, рациональному электромонтажу.
2. Особое значение для обеспечения надежности импульсного ИВЭ имеют рациональный выбор и оптимальное проектирование следующих устройств, узлов и компонентов:
 - надежные схемы ограничения пусковых токов соответственно особенностям структуры ИВЭ;
 - корректоры коэффициента мощности при питании от однофазной сети переменного тока;
 - преобразователи напряжения, выполненные в зависимости от мощности, а также от частоты преобразования;

- силовой ВЧ-трансформатор, спроектированный по критериям минимума потерь мощности, оптимальной паразитной индуктивности (L_s), а также требований по высокому качеству электроизоляции;
- аналитическая и экспериментальная обработка комплексной защиты импульсных ИВЭ от различных аварийных ситуаций как одно из главных условий надежной работы источников.

Продолжение следует

Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2008. № 3.
2. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 4.
3. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.
4. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2008. № 1.
5. Информационный диск «ММП Ирбис» 2005: AC/DC, DC/DC, инверторы // www.mmp-irbis.ru
6. Информационный диск «Александр-Электрик» 2007: модули и блоки электропитания // www.aeip.ru
7. Информационный диск «ЭЛТЕХ-2005»/Power-One: AC/DC, DC/DC // www.eltech.spb.ru
8. Информационный диск Astec-2002: Edition7. Catalog // www.astecpower.com
9. Мкртчян Ж. Основы построения устройств электропитания ЭВМ. М.: Радио и связь, 1990.
10. Эраносян С. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
11. Сергеев Б. С. Схемотехника функциональных узлов источников вторичного электропитания: Справочник. М.: Радио и связь, 1992.
12. Исаев В., Вялов А. Об оценке надежности источников вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры // Современная электроника. 2007. № 7.
13. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
14. Эраносян С., Ланцов В. Разработка интегрированных силовых модулей и их применение в источниках вторичного электропитания // Современная электроника. 2006. № 8.
15. Ланцов В., Эраносян С. Интегрированные компоненты — основа построения современных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 3.
16. Семенов Б. И волки сыты, и овцы целы. Комбинированный метод защиты преобразователей от пусковых сверхтоков и подавления высокочастотных гармоник // Силовая электроника. 2008. № 3.
17. Электромагнитная совместимость технических средств / Справочник. Под ред. В. С. Кармашева. М.: Госстандарт, 2001.
18. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. М.: Технология, 2003.
19. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2006. № 4.
20. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2007. № 1.
21. Бенкхов Ш. Безопасный заряд // Силовая электроника. 2008. № 3.
22. www.elhand.com.pl
23. Жданкин В. Принципиальная схема ИВЭП серии NL65 // СТА. 2003. № 3.
24. Эраносян С., Ланцов В. Эволюция импульсных источников вторичного электропитания: от прошлого к будущему. Часть 2 // Силовая электроника. 2009. № 1.
25. Колпаков А. И. IGBT или MOSFET? Практика выбора // Электронные компоненты. 2000. № 2.
26. Андронников Д. Плавкий предохранитель — элемент силовой электронной техники // Силовая электроника. 2007. № 1.
27. www.abb.com
28. www.omron.com
29. www.italstructures.com
30. www.tyco.com
31. www.wickmann.com
32. www.nedis.com
33. www.thermodisk.com
34. www.farnellinone.com