

# Вторичные источники электропитания: анатомия и опыт применения

Источник питания является важнейшей составной частью любого электронного устройства от надежности которого зависит работоспособность всего устройства.

В 60-х годах прошлого века были разработаны первые импульсные источники питания (ИИП), которые интенсивно развивались в течение десятков лет и сегодня почти полностью вытеснили линейные источники питания (ЛИП) практически во всех областях техники. В чем же разница между этими двумя типами источников питания и чем ИИП так хороши?

Широко применявшиеся повсеместно в технике на протяжении многих десятков лет ЛИП являются весьма простыми и даже примитивными устройствами, рис. 1, состоящими всего лишь из нескольких элементов: понижающего трансформатора, выпрямителя, сглаживающего фильтра на основе конденсатора и полупроводникового стабилизатора (стабилитрон с мощным транзистором, или аналогичный по функции одиночный силовой полупроводниковый элемент).

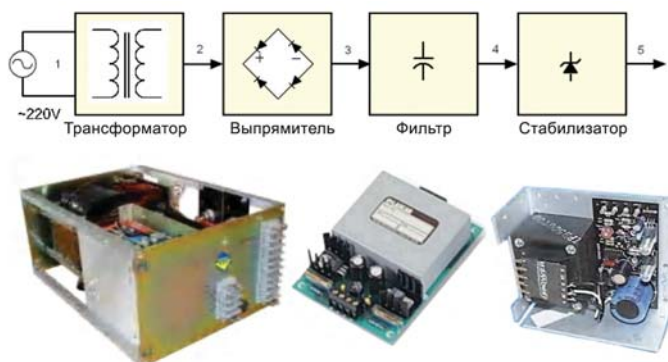


Рис. 1 Структура и внешний вид линейных источников питания

В отличие от них, ИИП являются значительно более сложными устройствами, работающими на высокой частоте и состоящими из сотен активных и пассивных элементов, рис. 2.

В чем же основные принципиальные отличия между этими двумя типами источников? В ЛИП входное переменное напряжение сначала понижается до необходимого уровня (или уровней, в случае многообмоточного трансформатора) с помощью трансформатора, затем выпрямляется

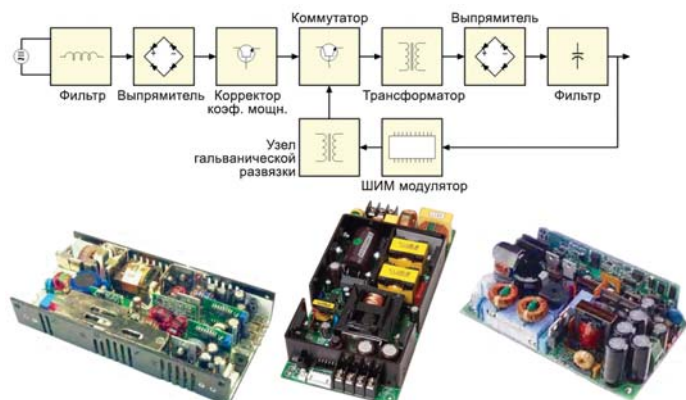
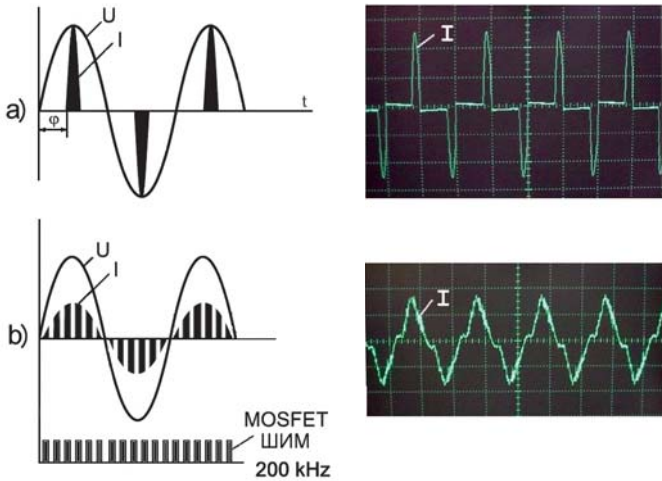


Рис. 2 Структура и внешний вид импульсных источников питания

диодным мостом, фильтруется с помощью электролитического конденсатора и стабилизируется нелинейным электронным элементом. Напряжение до стабилизирующего элемента выбирается большим, чем номинальное выходное напряжение источника, а его излишек гасится (рассеивается) в виде тепла на этом стабилизирующем элементе (что требует иногда использования радиаторов).

Наличие некоторого излишка напряжения позволяет осуществлять стабилизацию выходного напряжения источника как при уменьшении, так и при увеличении входного напряжения за счет изменения доли энергии, рассеиваемой на стабилизирующем элементе. По этой причине, к.п.д. такого источника всегда намного ниже единицы.

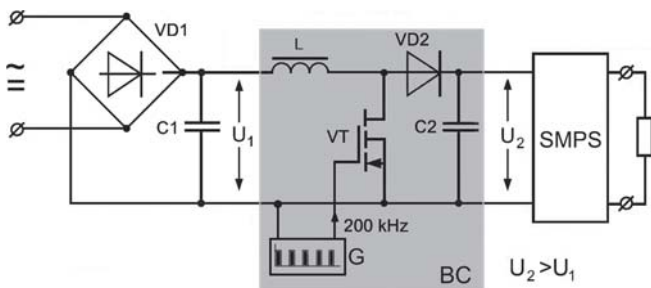
В ИИП входное переменное напряжение сначала выпрямляется диодным мостом (или просто проходит без изменения через диоды этого моста в случае питания источника от сети постоянного тока), сглаживается и поступает на коммутатор (обычно, ключевой элемент на базе MOSFET транзистора), с помощью которого постоянное напряжение «нарезается» на узкие полосы (частота коммутатора составляет 70–700 кГц для мощных источников и 1–3 МГц для маломощных). Сформированные таким образом прямоугольные высокочастотные импульсы поступают на трансформатор, выходное напряжение которого соответствует требуемому уровню напряжения, которое затем выпрямляется и фильтруется. Стабилизация уровня выходного напряжения при изменении уровня входного напряжения осуществляется с помощью цепи обратной связи, состоящей из специально предназначенного для этой цели драйвера, обеспечивающего широтно-импульсную модуляцию (ШИМ или PWM) сигнала управления коммутатором через узел гальванической развязки (обычно, дополнительный развязывающий трансформатор). Этот драйвер представляет собой небольшую, но достаточно сложную микросхему, отслеживающую выходное напряжение источника и изменяющую ширину импульсов управления в ту или иную сторону, при отклонении уровня выходного напряжения от заданного значения. Такую структуру имеют дешевые источники питания. Более качественные и дорогие ИИП содержат, как минимум, два дополнительных узла: входной высокочастотный фильтр и корректор коэффициента мощности, рис. 2. Первый нужен для защиты питающей сети (то есть всех остальных потребителей, питающихся от той же сети, что и ИИП) от высокочастотных гармоник, генерируемых в сеть ИИП. Второй применяется для увеличения коэффициента мощности источника питания. Проблема коррекции коэффициента мощности возникает в связи с наличием диодного моста со сглаживающим конденсатором на входе ИИП. При таком включении конденсатор потребляет из сети ток импульсами, только в те моменты времени, когда мгновенное значение синусоидально изменяющегося входного напряжения становится больше напряжения на конденсаторе (из-за его разряда на нагрузку). В остальное время, когда напряжение на конденсаторе больше мгновенного входного, диоды моста оказываются запертыми обратным напряжением конденсатора и потребление тока отсутствует. В результате, ток, потребляемый ИИП, оказывается существенно сдвинутым по фазе относительно напряжения, рис. 3а.



**Рис. 3** Форма тока и сдвиг фаз между напряжением и током, потребляемым ИИП, без ККМ (а) и с ККМ (б)

При большом количестве ИИП, подключенных к сети переменного тока, общее снижение коэффициента мощности в сети становится уже заметным (типичное значение коэффициента мощности ИИП без корректировки 0,65) в связи с чем, применяется его активная коррекция с помощью так называемого корректора коэффициента мощности (ККМ или PFC — Power Factor Corrector).

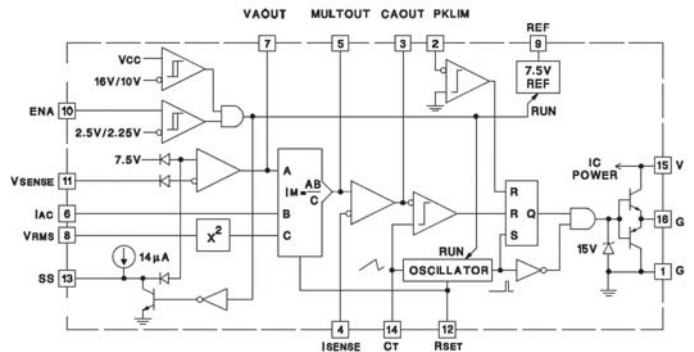
ККМ представляет собой самостоятельный преобразователь напряжения, так называемый «бустерный конвертер» (boost converter — BC), снабженный специальной схемой управления, рис. 4.



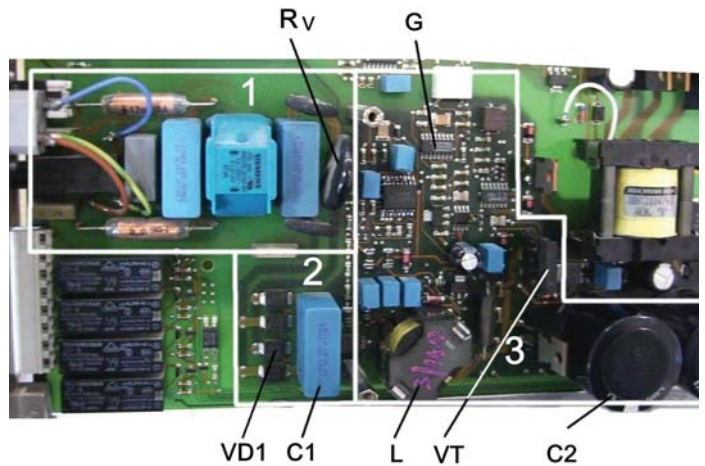
**Рис. 4** Бустерный конвертер (BC) и его подключение к импульсному источнику питания (SMPS)

Основными элементами BC являются: дроссель L, диод VD2, конденсатор C2 и быстродействующий ключевой элемент VT на базе MOSFET транзистора. Работа этого устройства основана на явлении возникновения импульсов повышенного напряжения обратной полярности на индуктивности, при разрыве тока в ее цепи. Транзистор VT с большой частотой (обычно, 200 кГц) включает и выключает ток в цепи индуктивности L, а образующиеся при этом импульсы повышенного напряжения через диод VD2 заряжают конденсатор C2, от которого питается нагрузка (в нашем случае, собственно ИИП). Таким образом, напряжение на конденсаторе C2 всегда выше входного напряжения BC. Благодаря этому свойству BC они получили большое распространение в электронных устройствах в качестве преобразователя напряжения стандартного гальванического элемента (1,2–1,5 В) в другое стандартное напряжение 5 В, необходимое для управления микросхемами. В нашем случае конденсатор C2 заряжается до напряжения 385–400 В. Благодаря тому, что конденсатор C1 имеет очень небольшую емкость (это, по сути, высокочастотный фильтр), а схема управления с ШИМ ключевого элемента постоянно отслеживает фазу входного переменного напряжения и обеспечивает соответствующую привязку импульсов управления (то есть импульсов тока) к фазе напряжения, удается практически полностью устранить сдвиг фаз между током и напряжением, потребляемым накопительным конденсатором C2, рис. 3б. Кроме того, эта же схема управления

обеспечивает жесткую стабилизацию напряжения заряда конденсатора C2. Несмотря на малые габариты микросхемы управления ККМ, она имеет довольно сложную внутреннюю структуру, рис. 5, а в целом, с учетом большого количества необходимых пассивных элементов, устройство ККМ получается довольно сложным и занимает весьма заметную площадь печатной платы ИИП, рис. 6.



**Рис. 5** Микросхема управления (UC 1854 типа) бустерным конвертером



**Рис. 6** Фрагмент печатной платы ИИП с бустерным конвертером 1 – входной фильтр; 2 – входной выпрямительный мост с фильтрующим конденсатором; 3 – корректор коэффициента мощности; Rv – варистор; G – микросхема управления бустерным конвертером

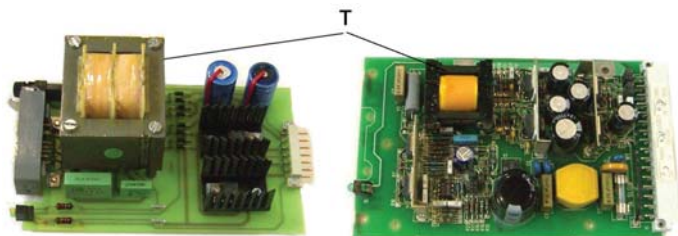
Почему же такие сложные устройства вытеснили с рынка простые и хорошо зарекомендовавшие себя ЛИП?

Основными преимуществами ИИП перед ЛИП, которые обычно указываются в технической литературе являются:

1. Значительное уменьшение размеров и массы за счет меньшего понижающего трансформатора (высокочастотный трансформатор имеет значительно меньшие габариты и массу по сравнению с трансформатором промышленной частоты той же мощности).
2. Возможность работы в очень широком диапазоне изменения входного напряжения.
3. Значительно более высокий к.п.д. (до 90–95%, против 40–70 % для ЛИП).
4. От себя добавим еще одно важное преимущество: возможность работы от сети и переменного, и постоянного тока.

Даже при беглом взгляде на два одинаковых по мощности и по свойствам источника питания хорошо заметны характерные отличия между ЛИП (слева) и ИИП (справа): ЛИП намного проще, но содержит значительно более крупный и тяжелый трансформатор (Т), рис. 7.

Плоский модуль ИИП (рис. 7, справа) является универсальным источником питания микропроцессорных реле защиты серии SPAC, SPAD, SPAU и др., который вдвигается по направляющим в корпус реле. Естественно, использовать в такой конструкции ЛИП с крупным трансформатором затруднительно.



**Рис. 7** Линейный (слева) и импульсный (справа) источника питания с одинаковыми техническими характеристиками. Т – трансформатор

Но, что мешает вместо одного крупного многообмоточного трансформатора с тремя выходными напряжениями применить три отдельных маленьких трансформатора, для которых вполне достаточно места на печатной плате ЛИП? В этом случае габаритные размеры ЛИП будут не намного отличаться от ИИП. Даже в случае мощного источника с одним уровнем выходного напряжения можно использовать несколько плоских трансформаторов, соединенных между собой параллельно. Так что наличие малого по размерам трансформатора не является абсолютным преимуществом ИИП.

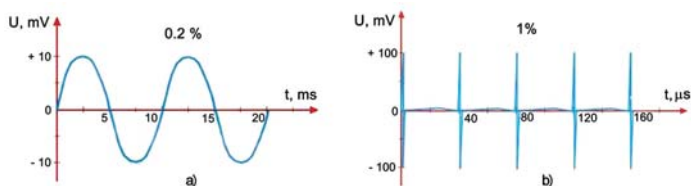
Что касается очень широкого диапазона входных напряжений, при которых обеспечивается работоспособность ИИП за счет использования ШИМ в системе управления основного ключевого элемента, то это преимущество представляется нам весьма условным. Ну, действительно, так уж важно на практике, что ИИП может работать при входных напряжениях, изменяющихся в пределах от 48 до 312 В? Ведь этот диапазон охватывает сразу несколько рядов номинальных напряжений, таких как: 48, 60, 110, 127, 220 В. Совершенно очевидно, что в конкретной аппаратуре ИИП будет работать при каком-то одном номинальном напряжении (изменяющемся в пределах не более, чем  $\pm 20\%$ ), а не сразу на всех одновременно. А если необходимо использовать аппаратуру при напряжении и 110 В и 220 В, то для этого существуют хорошо известные решения в виде маленького переключателя и отвода от обмотки трансформатора.

Коэффициент полезного действия является важным показателем, если речь идет о мощном источнике, а не об источнике мощностью 25–100 Ватт, которые мы рассматриваем. Кроме того, высокий к.п.д. и отсутствие заметного выделения тепла (что характерно для ИИП) может быть важно в миниатюрном переносном источнике питания полностью закрытого исполнения, например в таком, как источник питания ноутбуков. Во множестве других случаев, например, в источниках питания контроллеров и электронных реле промышленного назначения вопрос о к.п.д. источника питания не является актуальным.

Возможность работы от сети постоянного тока является важнейшим и абсолютным преимуществом ИИП. Линейные источники принципиально не могут работать от сети постоянного тока.

Вот, вкратце, анализ преимуществ ИИП перед ЛИП. Рассмотрим теперь недостатки ИИП.

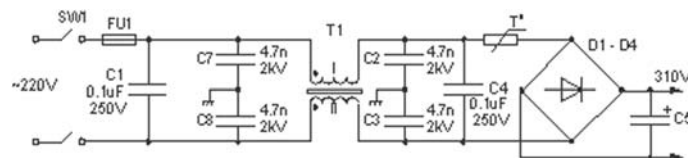
К недостаткам ИИП можно отнести наличие высокого уровня импульсных шумов на выходе источника, рис. 8.



**Рис. 8** Типовые уровни пульсаций выходного напряжения для ЛИП (а) и ИИП (б) с выходным напряжением 12 В

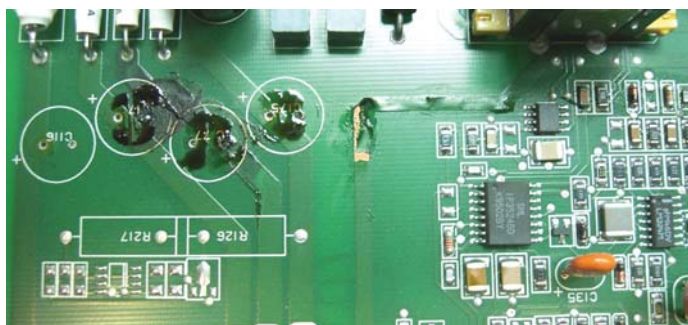
В отличие от ЛИП с его слабой 50-герцовой пульсацией, пульсации выходного напряжения в ИИП как правило, имеют значительно большую амплитуду и лежат в диапазоне

от нескольких килогерц до нескольких мегагерц, что создает проблемы распространения излучений в цепи электронной аппаратуры для питания которой предназначен ИИП, а также (по проводам и даже через эфир) в цепи совершенно посторонних электронных приборов. Кроме того, в ИИП приходится принимать специальные меры для предотвращения проникновения высокочастотных излучений в питающую сеть (по которой они распространяются и могут нарушить работу других электронных приборов) путем использования специальных фильтров, рис. 9.



**Рис. 9** Схема типового фильтра, устанавливаемого на входе ИИП

Наличие высокочастотной составляющей в выходном напряжении и в промежуточных узлах схемы предъявляет повышенные требования к многочисленным электролитическим конденсаторам, имеющимся в схеме ИИП, которые, к сожалению, редко учитываются разработчиками ИИП. Как правило, типы этих конденсаторов выбираются лишь по емкости, рабочему напряжению и габаритам, без учета их характеристик на высокой частоте. А между тем, далеко не все типы конденсаторов способны длительно работать под воздействием напряжения высокой частоты, а лишь имеющие низкий импеданс на высоких частотах. В результате не учета этого обстоятельства электролитические конденсаторы заметно нагреваются из-за повышенных диэлектрических потерь на высокой частоте. Повышенная температура электролита интенсифицирует химические реакции в конденсаторе, в свою очередь приводит к ускоренному растворению элементов корпуса конденсатора и вытеканию электролита прямо на печатную плату, что при очень плотном монтаже приводит к коротким замыканиям между разнопотенциальными выводами или, наоборот, к обрыву цепей вследствие растворения медных дорожек печатной платы (даже несмотря на наличие прочного покрытия дорожек платы), рис. 10.



**Рис. 10** Медные дорожки печатной платы ИИП, поврежденные просочившемся из конденсаторов электролитом

Другой распространенный тип повреждений ИИП, обусловленный повышенной температурой электролита — быстрое (в течение нескольких лет) высыхание электролита и значительное (на 30–70%) снижение емкости конденсаторов, что приводит к резкому ухудшению характеристик источника питания, а иногда и полной потере его работоспособности [1].

Для обеспечения эффективной работы ККМ, силовой коммутационный элемент (обычно, транзистор MOSFET) должен обладать как можно более низким сопротивлением в открытом состоянии. Величина этого сопротивления в значительной степени зависит от максимального рабочего напряжения транзистора.

Для транзисторов с максимальным рабочим напряжением 500–600 В это сопротивление составляет 0,05–0,3 Ома, тогда как, для транзисторов на более высокие напряжения (1000–1500 В) это сопротивление на один-два порядка выше (например, 12 Ом для транзистора 2SK1794 на напряжение 900 В; 17 Ом для транзистора IXTP05N100 на напряжение 1000 В; 7 Ом для транзистора STP4N150 на напряжение 1500 В). Этим объясняется выбор относительно низковольтных (с максимальным рабочим напряжением 500–600 В) транзисторов для ККМ. Например, в реальных конструкциях ИИП весьма ответственных устройств, используемых в электроэнергетике, таких как микропроцессорные реле защиты и регистраторы аварийных режимов широко применяются транзисторы типов IRF440, APT5025 и др. с максимальным напряжением 500 В, что совершенно недостаточно для работы в промышленной электрической сети с напряжением 220 В из-за наличия значительных коммутационных и атмосферных перенапряжений. Как известно, для защиты от таких перенапряжений электронная аппаратура снабжается, обычно варисторами. Однако, из-за недостаточной нелинейности характеристики вблизи рабочей точки, варисторы выбираются таким образом, чтобы между длительно приложенным рабочим напряжением и напряжением срабатывания под воздействием импульсного перенапряжения (так называемое «clamping voltage») была бы довольно существенная разница. Например, для варисторов любого типа, предназначенных для длительной работы при номинальном напряжении переменного тока 220 В clamping voltage составляет 650–700 В. В источниках питания упомянутых выше микропроцессорных устройствах использованы варисторы типа 20K431 с clamping voltage 710 В. Это означает, что при воздействии импульсов напряжения с амплитудой ниже 700 В варистор не обеспечит защиты электронных компонентов источника питания, особенно силовых транзисторов (500 В), включенных напрямую в цепь сети.

На высокой рабочей частоте трансформатор и катушка индуктивности в ККМ обладают высоким импедансом, ограничивающим ток, протекающий через них и через коммутирующие элементы. Однако, сбой в работе микросхем, обеспечивающих управление силовыми ключами ККМ или основного силового ключа ИИП (например, в результате воздействия импульсной помехи), приводит к переходу в режим работы на постоянном токе (то есть с очень низким импедансом) и резкой токовой перегрузке сразу многих силовых элементов схемы и мгновенному выходу их из строя. Учитывая высокую плотность монтажа ИИП, это приводит часто к повреждению соседних элементов схемы, выгоранию целых участков печатного монтажа. Вообще-то, что касается надежности, должно быть совершенно ясно, что надежность такого сложного устройства, как ИИП, содержащего множество сложных микросхем и силовых элементов, в том числе, работающих на высоких напряжениях в импульсном режиме с высокими скоростями нарастания тока и напряжения, всегда будет заметно ниже надежности такого простого устройства, как ЛИП, в котором имеется всего лишь несколько электронных компонентов, работающих в линейном режиме.

Плотность монтажа и энергоемкость ИИП постоянно растут, например, источник типа ЕМА212, рис. 2 (справа), при размерах 12,7 x 7,62 x 3 см имеет мощность 200 Ватт. Этому способствует применение схем управления на миниатюрных элементах поверхностного монтажа, очень плотный монтаж силовых элементов, постоянный рост рабочей частоты. Когда-то эта частота не превышала 50–100 кГц. Сейчас уже многие мощные источники с выходным током до 20А работают на частоте 300–600 кГц, а менее мощные, например, работающие под управлением контроллера ADP1621, уже на частоте более 1 МГц и более, что способ-

ствует дальнейшему снижению массогабаритных показателей ИИП. Обратной стороной этой медали (которую всячески рекламируют как достоинство ИИП) становится практически полная потеря ремонтпригодности таких устройств. Это является источником серьезных проблем для потребителя, использующего такие ИИП. И дело здесь даже не в материальных затратах на приобретение нового ИИП, а в том, что ИИП в подавляющей массе не унифицированы ни по размерам, ни по виду присоединений. Это могут быть и специальные жесткие разъемы, и колодки с винтами, и гибкий провод с разъемом, рис. 11, а могут быть и втычные разъемы на печатных платах, вдвигаемых по направляющим в корпус аппаратуры.



Рис. 11 Некоторые типы присоединений, используемых в ИИП

Такой разнорядностью в конструкциях ИИП приводит к невозможности замены поврежденного источника, как правило, встроенного внутри аппаратуры, на источник другого типа, если старые ИИП уже не выпускаются. Обновляются ИИП довольно часто, поэтому при выходе их из строя через несколько лет эксплуатации в составе более сложной аппаратуры, перед потребителем возникает сложная проблема: чем и как заменить этот ИИП? Автору неоднократно приходилось решать эту головоломку путем приобретения более компактного нового ИИП и встраивания его в корпус старого, вышедшего из строя, или размещения нового ИИП на плате, аналогичной по размерам старому ИИП. Все эти вынужденные ухищрения отнюдь не добавляют очков ИИП.

В системах промышленной автоматики применяется большое количество всевозможных электронных приборов: измерительных преобразователей, контроллеров и т.п., установленных в шкафах управления. Как правило, каждый из таких приборов имеет собственный встроенный источник питания. Из-за стремления уменьшить размеры приборов и удешевить их, встроенные источники питания выполняются до предела упрощенными (часто даже с гасящими резисторами вместо изолирующих трансформаторов). А элементная база таких источников выполняется на относительно дешевых элементах, не имеющих достаточных запасов по мощности и по напряжению. В результате, такие приборы часто выходят из строя по причине выхода из строя источников питания. Однако, так ли уж нужны такие источники в этих приборах? Вопрос можно поставить еще шире: а нужны ли вообще встроенные источники питания в электронных приборах и контроллерах промышленного назначения, предназначенные для установки в шкафах управления вместе с десятками других аналогичных приборов? Почему бы не выпускать для комплектных систем автоматики такие устройства, как контроллеры, электронные реле, электронные измерительные преобразователи и т.п. вообще без источников питания, а лишь с разъемом, предназначенным для подключения внешнего источника? Этот внешний источник питания, расположенный в шкафу, должен быть, по-нашему мнению, линейным, иметь хороший запас по мощности, должен быть снабжен необходимыми элементами для защиты от перенапряжений, коротких замыканий, и т.п. Более того, в шкафах, относящихся к системам автоматики повышенной надежности, таких линейных источников, соединенных между собой через диод, должно быть два (так называемый горячий резерв).

Как это ни покажется странным, но в эпоху импульсных источников питания существует множество компаний (VXI, Lascar, Calnex Electronics, Power One, HiTek Power, R3 Power и много других) продолжающих выпускать ЛИП, что свидетельствует об их популярности в определенных областях техники и об их доступности для практического применения. По нашему мнению, указанные выше подход позволил бы значительно повысить надежность систем автоматики, телеуправления, релейной защиты (с питанием от сети переменного тока) без увеличения ее стоимости (вследствие меньшей стоимости электронных приборов без встроенных источников питания).

Аналогичный подход может использоваться и в случае питания электронной аппаратуры (например, тех же микропроцессорных реле защиты) установленной в шкафах, от сети постоянного тока, с той лишь разницей, что два общих на шкаф источника питания должны быть импульсными, а не линейными. При этом эти источники должны быть подвергнуты серьезной реконструкции. Во-первых, из них должны быть исключены корректоры коэффициента мощности, как совершенно бессмысленные узлы при питании от сети постоянного тока, что само по себе уже повысит надежность источников. Во-вторых, эти ИИП шкафного типа должны быть достаточно крупными и удобными для поиска неисправностей и ремонта (в источниках шкафного типа нет смысла гнаться за компактностью), они не должны содержать элементов поверхностного монтажа. В-третьих, многочисленные электролитические конденсаторы, имеющиеся в ИИП, должны быть сконцентрированы на отдельной плате, предназначенной для простой замены ее после каждых 5 лет эксплуатации (то есть до того, как конденсаторы начнут выходить из строя). Сетевой фильтр должен использоваться готовый (такие фильтры представлены на рынке сотнями моделей), а не собираться из отдельных элементов,

для того, чтобы его можно было просто и быстро заменить в случае необходимости.

Предлагаемые меры, по нашему мнению, позволят снизить зависимость стационарной электронной промышленной аппаратуры от вторичных источников электропитания и значительно повысить ее надежность.

В заключение, несколько слов о новейших тенденциях, появившихся в области конструирования вторичных источников электропитания. Речь идет о попытках применения микропроцессоров в этих источниках, причем, и в линейных [2], и в импульсных [3]. Может быть, наш взгляд покажется читателю чрезмерно консервативным, но, по нашему мнению, микропроцессоры нужны в источниках питания так же сильно, как и в сиденьях для унитаза, где они применяются для точного измерения температуры соответствующей части тела и подогрева этого сиденья до температуры, соответствующей температуре упомянутой части тела. Ведь совершенно очевидно, что наличие функционально не оправданных сложных узлов в аппаратуре — это путь, однозначно ведущий к снижению ее надежности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Гуревич Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность. – Проблемы энергетики, 2008, № 5–6, с. 47–62.
2. Ю. Садиков Блок питания в виде сетевого адаптера с регулировкой выходного напряжения от 1,5 до 15 В и выходным током до 1 А. – Электроника-инфо, 2008, № 12, с. 42–43.
3. EFE-300/EFE-400. 300/400 Watts, Digital Power Solution. – Datasheet TDK-Lambda, 2009.

**В. ГУРЕВИЧ,**  
канд. техн. наук