

# Надежность силовых устройств в России:

мифы и реалии, проблемы и пути решения.  
Часть 5. Импульсные источники питания

**В статье рассмотрены некоторые примеры по проектированию надежных импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭ). Приведены мероприятия и примеры по обеспечению надежности ИВЭ в процессе производства: входной контроль покупных компонентов, выходной контроль узлов и компонентов собственного производства, особенности настройки и другие. Анализируются мероприятия по поддержанию уровня надежности ИВЭ источников электропитания при их производстве и эксплуатации.**

**Владимир Ланцов**

vlantsov@list.ru

**Саркис Эраносян**

sergera840@mail.ru

В частях 1–3 [1–3] указывалось, что в настоящее время в электроэнергетике, силовой электронике существуют серьезные проблемы по обеспечению надежности. Реальная надежность силовых устройств (СУ) при эксплуатации улучшается сравнительно медленно, особенно в России.

## Примеры проектирования надежных узлов и импульсных источников питания в целом

Укажем несколько примеров проектирования надежных узлов и импульсных ИВЭ в целом. В работах [3–5] рассмотрены примеры некоторых узлов, для которых были выбраны силовые компоненты с рекомендуемыми, с точки зрения повышения надежности, коэффициентами электрической нагрузки. В том числе:

- регулируемый стабилизированный выпрямитель мощностью 800 Вт (200 В/4 А) в импульсном высоковольтном источнике питания (ВВИП);
- преобразователь мощностью 840 Вт на MOSFET типа 2П809Б в источнике бесперебойного питания (ИБП).

Рассмотрим эти примеры более подробно.

Тиристорный регулируемый выпрямитель мощностью 800 Вт (200 В/4 А) с питанием от однофазной сети переменного тока 220 ±44 ВэФ, 50 Гц разработан одним из авторов. Структура выпрямителя: сетевой фильтр помех; выпрямительный мост (2 диода и 2 оптодиода); замыкающий (нулевой) диод; LC-фильтр. Были выбраны отечественные низкочастотные диоды типа КД203А ( $U_{RRM} = 600$  В,  $I_{F(AV)} = 10$  А). Коэффициенты электрической нагрузки диодов: по напряжению  $K_{нУ} = 1,2 \times (1,41 \times 220 \text{ ВэФ}) / 600 \text{ В} = 0,62$ ; по току  $K_{нТ} = 4 \text{ А} / 10 \text{ А} = 0,4$ . В качестве оптодиодов использованы отечественные тиристоры ТО325-12,5-8 ( $U_{RRM} = 800$  В,  $I_{F(AV)} = 12,5$  А,  $U_{isol} = 2500$  В). Коэффициенты электрической нагрузки силовой цепи оптодиодов: по напряжению  $K_{нУ} = 1,2 \times (1,41 \times 220 \text{ ВэФ}) / 800 \text{ В} = 0,46$ ; по току  $K_{нТ} = 4 \text{ А} / 12,5 \text{ А} = 0,32$ , то есть с большим запасом. Замыкающий диод также выбран типа КД203А. Кроме того, для исключения ложных срабатываний из-за возможного

превышения допустимого значения  $dU/dt$ , силовая часть оптодиодов зашунтирована RC-цепью (300 Ом; 0,047 мкФ) и варистором типа 595-275 фирмы Philips. Параметры варистора:  $U_{max} \cong 275$  ВэФ,  $U_{max} = 350$  В;  $P_{рас.макс.} = 0,6$  Вт, поглощаемая энергия  $E_{max} = 12\text{--}117$  Дж (10–1000 мкс).

Источник бесперебойного питания (ИБП) с выходной мощностью 1800 Вт [5] разрабатывался одним из авторов для аппаратуры средств связи. В ИБП использовались единичные силовые модули (СМ) конвертора с единичной мощностью  $P_{см} = 840$  Вт (140 В/6 А). Единичный модуль выполнен на основе квазирезонансной схемы (однотактный «косой мост»), в котором используются два одновременно работающих силовых ключа. Достоинство этой схемы в том, что максимальное напряжение на закрытых ключах фиксируется на уровне питающего постоянного напряжения. То есть для напряжения сети 220 В +20%, 50 Гц величина этого напряжения составляет ≈370 В (в режиме холостого хода преобразователя). Ток через силовые транзисторы в квазирезонансном преобразователе имеет форму «полуволны». Для электронного ключа квазирезонансного преобразователя: максимальная амплитуда тока  $I_{ампл.w1} = 17,9$  А (при максимальном сетевом напряжении 264 В); максимальный эффективный ток ключа  $I_{эфф.w1} = 7,2$  А (при минимальном сетевом напряжении 176 В). В модуле необходимо было использовать отечественный MOSFET типа 2П809Б, разработанный в АООТ «НПО «Электроника»» (г. Воронеж). Параметры опытных образцов этого транзистора:  $U_{DSS} = 500$  В,  $I_D = 9,6$  А (при +35 °С) и 8 А (при +70 °С);  $R_{DS(on)} = 0,6$  Ом. С целью повышения надежности каждый ключ был выполнен из двух параллельно включенных транзисторов 2П809Б. В результате через каждый транзистор протекает ток 3,6 А, поэтому  $K_{нТ} = 0,45$  при  $K_{нУ} = 0,74$ . Отметим, что суммарные потери мощности в транзисторах силового модуля составили  $P_{\Sigma mp} \approx 31$  Вт. Если не применять параллельное соединение транзисторов, то потери возрастали до  $P_{\Sigma mp} \approx 62$  Вт.

В работах [6, 7] приводятся сведения о структуре и схемотехнике мощных инверторов сварочных агрегатов. Поскольку основным режимом работы таких

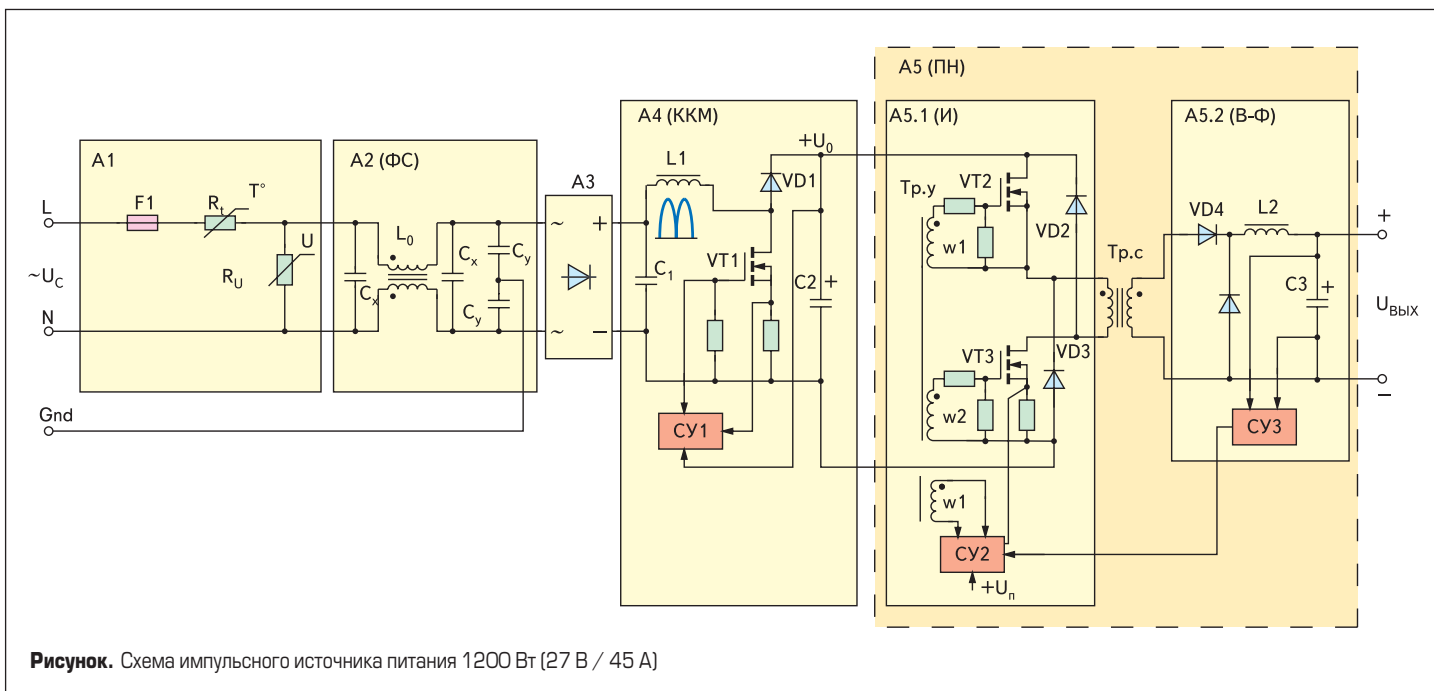


Рисунок. Схема импульсного источника питания 1200 Вт (27 В / 45 А)

агрегатов является повторно-кратковременный режим, то есть переход от холостого хода к режиму значительной токовой нагрузки, то мероприятия по обеспечению надежной работы очень важны. Читатель сам сможет в этом убедиться, проанализировав использованные структурно-схемотехнические решения высокочастотных инверторов таких агрегатов.

Рассмотрим, с точки зрения надежности, режимы функционирования основных компонентов импульсного ИВЭ мощностью 1200 Вт (27 В / 45 А). Упрощенная схема этого ИВЭ приведена в [8]. На рисунке представлена схема такого импульсного ИВЭ.

Во входном устройстве (А1) включен ограничитель пусковых токов, мощный терморезистор (термистор)  $R_t$  с отрицательным температурным коэффициентом (NTC). Для ограничения импульсных перенапряжений из сети, амплитуда которых может достигать 2 кВ, при-

менен силовоточный быстродействующий варистор  $R_U$ . Сетевой помехоподавляющий фильтр А2 (ФЧ) типа  $C_x L_0 C_x C_y$  осуществляет подавление электромагнитных помех как со стороны сети, так и со стороны самого импульсного ИВЭ.

Активный корректор коэффициента мощности — А4 (ККМ) — является повышающим (до напряжения  $U_0 = +350-400$  В) импульсным стабилизатором выпрямленного сетевого напряжения. Он обеспечивает практически синусоидальную форму потребления тока от сети. Основные элементы ККМ: силовой ключ VT1 на высоковольтном MOSFET, бустерный быстродействующий диод VD1, накопительный дроссель L1, выходной буферный конденсатор C2, схема управления (CY1) на основе контроллера ККМ.

Накопительный дроссель L1 выполнен на кольцевых сердечниках типа МП-140.

К дросселю, помимо требований обеспечить непрерывный ток и выдерживать максимальное переменное напряжение ( $\geq 200$  В), также предъявляется требование по минимальному значению паразитной емкости ( $C_p$ ). Выходной (буферный) конденсатор (C2) — электролитический с напряжением  $\geq 450$  В и низким выходным импедансом на частотах пульсаций ( $\geq 100$  кГц).

Увеличение емкости сверх расчетных значений связано с необходимостью обеспечения стандартного времени удержания напряжения на выходе источника (20 мс). С этой целью приходится применять параллельное соединение конденсаторов. Высокочастотный полипропиленовый конденсатор C1 (емкостью  $4 \times 1,5$  мкФ) на входе ККМ используется для улучшения запуска ККМ и фильтрации высокочастотных составляющих тока коммутации. Преобразователь напряжения А5 — одноктакт-

Таблица. Параметры и коэффициенты электрической нагрузки основных узлов и компонентов импульсного источника питания 1200 Вт (27 В / 45 А)

Узлы	Элементы	Сведения о компонентах		Коэффициенты электрической нагрузки $K_{нi}$		$P_{\Sigma}$
		Типономинал, фирма	Основные параметры	$K_{нU}$	$K_{нI}$	
A1	Rt	B57364S109M (Epcos)	$R_0 = 1 \text{ Ом} \pm 20\%$ , $V = 2800$ , $I_{\text{max}} = 16 \text{ А}$	–	0,52	–
	RU	B72214S271K101 (Epcos)	275 Вэф / 430 В <sub>н</sub> (1мА) / Еmax = 71 Дж / 4500 А имп	0,95*	–	–
A2 (ФЧ)		FN2070-10/06 (Schaffner)	$U_{\phi} = 0-250(275)$ Вэф, 50 Гц, $I_{\phi} = 10$ А эф ( $L_0 = 2 \times 4,5$ мГн, $C_x = 1$ мкФ, $C_y = 2 \times 4,7$ нФ)	0,95*	0,83	2,0
A3 (BC)		26MB60A (IR)	$U_{RRM} = 600 \text{ В}$ , $I_{F(AV)} = 25 \text{ А}$	0,62	0,33	13,3
A4 (ККМ) 200 кГц	L1	–	$L_1 = 360$ мкГн: сердечник МП140 K44×28×10,3, $\Delta B = 0,06$ Тл, $W = 55$ (∅1,5 мм), $R_w = 0,024$ Ом	–	0,55	4,0
	VT1	IXFN48N50Q (IXYS):	$U_{DSS} = 500 \text{ В}$ , $I_D = 48 \text{ А}$ , $P_D = 500 \text{ Вт}$ , $R_{DS(on)} = 0,1$ Ом, корпус SOT-227B	0,8	0,13	17,9
	VD1	CSD10060A (CREE):	$U_{RRM} = 600 \text{ В}$ , $I_{F(AV)} = 10 \text{ А}$ , $U_{FM} = 1,8 \text{ В}$ , $Q = 28$ нКл, корпус TO-220-2	0,63	0,4	15,8
	C1	K73-50-500B	$U_n = 500 \text{ В}$ , $C = 1,5$ мкФ (4 параллельно)	0,74	–	–
	C2	EXR (Hitano)	$U_n = 450 \text{ В}$ , $C = 100$ мкФ (28 параллельно, вариант 1)	0,83	–	–
A5 (ПН) 200 кГц	VT2, VT3	IXFN48N50Q (IXYS)	$U_{DSS} = 500 \text{ В}$ ; $I_D = 48 \text{ А}$ , $P_D = 500 \text{ Вт}$ , $R_{DS(on)} = 0,1$ Ом, корпус SOT-227B	0,74	0,13	13,9
	VD2, VD3	8EWF06S (IR)	$U_{RRM} = 600 \text{ В}$ , $I_F = 8 \text{ А}$ , $U_F = 1,2 \text{ В}$ , $t_{rr} = 60$ нс, корпус D-Pak (TO-252AA)	0,63	< 0,1	1,0
	Тр.с	–	Сердечник: ПК30×16 2500НМС1, $\Delta B = 0,064$ Тл, обмотки: $W_1 = 66$ , $R_{w1} = 0,089$ Ом, $W_2 = 12$ , $R_{w2} = 0,0036$ Ом	–	–	5,6 7,4
	VD4, VD5	83CNQ100A (IR)	$U_{RRM} = 100 \text{ В}$ , $I_{F(AV)} = 80 \text{ А}$ , $U_F = 0,67 \text{ В}$ (2 диода параллельно), корпус D61-8	0,8	0,28	63,5
A6 (В-Ф)	L2	–	L2-1 = L2-2 = 190 мкГн (2 обмотки параллельно): сердечник МП250 K44×28×10,3, $\Delta B = 0,03$ Тл, $W = 29$ (2×∅2,02 мм), $R_w = 0,004$ Ом	–	0,8	3,4
	C3	K53-37-32B; EXR (Hitano)	$U_n = 32 \text{ В}$ , $C = 15$ мкФ (2 параллельно) $U_n = 63 \text{ В}$ , $C = 470$ мкФ (параллельно-накопительный)	0,84	–	–

Примечание. \*Вместо коэффициента электрической нагрузки по мощности  $K_{нP}$  приведены величины рассеиваемой мощности  $P_{\Sigma}$  (Вт), поскольку максимально допустимая мощность зависит от площади тепловода — радиатора, его конфигурации и т. д.

ный прямоходовой, по схеме так называемого «косого» моста. Диоды VD2 и VD3, рекуперирющие энергию намагничивания силового трансформатора Тр.с на входной конденсатор преобразователя, имеют обратное напряжение  $U_{RRM} = 600$  В и время восстановления  $t_{rr} = 60$  нс. Управление силовыми ключами производится от схемы управления СУ2 на основе ШИМ-контроллера с развязкой посредством управляющего трансформатора Тр.у. Выходной ВЧ-выпрямитель (диоды VD4, VD5) выполнен на низковольтных диодах Шоттки, имеющих наименьшее падение напряжения порядка  $U_F = 0,67$  В, а также традиционно малое время восстановления обратного сопротивления ( $t_{rr} = 35-75$  нс). Для уменьшения статических потерь мощности применено параллельное соединение диодов, которые есть в примененной диодной сборке.

Более подробно типы и параметры основных узлов и компонентов приведены в таблице. Там же приведены значения коэффициентов электрической нагрузки  $K_{нл}$  компонентов (по напряжению —  $K_{нл}$ , по току —  $K_{нт}$ ), а также потери мощности (статические и динамические)  $P_{\Sigma}$  в компонентах. Расчеты произведены при следующих условиях:

- изменение напряжения питающей сети  $220 \text{ В} \pm 20\%$ , 50 Гц;
- максимальная температура окружающего воздуха  $+40$  °С.

Анализ значений коэффициентов  $K_{нл}$  и потерь мощности  $P_{\Sigma}$  показывает, что режимы работы компонентов выбраны с необходимым запасом, по отношению к предельно возможным параметрам, и полностью соответствуют ранее приведенным рекомендациям [3]. Расчетное значение КПД источника — 88%.

### Обеспечение надежности импульсных ИВЭ при производстве

Приведем перечень необходимых мероприятий, способствующих повышению надежности и осуществляемых при производстве импульсных ИВЭ, в частности:

- Входной контроль компонентов и покупных узлов.
- Пооперационный контроль компонентов и узлов собственного производства.
- Выходной контроль компонентов и узлов собственного производства.
- Оптимизация настройки (регулировки) источников питания в целом.
- Технологическая тренировка изделий.

#### Входной контроль компонентов и покупных узлов

Номенклатура изделий, объем и вид контроля зависит от требований к показателям надежности, условиям эксплуатации и назначению (исполнению) ИВЭ: коммерческого, промышленного или оборонного назначения. Например, для РЭА военного назначения, особенно в реальных условиях производства в России, необходим 100%-ный входной контроль комплектующих изделий. Известно, что уже с начала 2000 года Министерство обороны РФ разрешило применение импортных компонентов в аппаратуре военного назначе-

ния. Это было сделано из-за отсутствия в требуемой номенклатуре отечественных компонентов, аналогичных по параметрам, уровню и качеству.

Такое решение было связано также с тем, что, во-первых, в России во много раз сократились объемы выпуска компонентов с приемкой «5» и выше; во-вторых, многие предприятия оказались в ближнем зарубежье. В-третьих, и это главное, после 1991 г. практически прекратились разработки и внедрение перспективных электронных компонентов. Авторы неоднократно писали об отставании отечественной электронной промышленности на 5–7 лет от развитых стран Запада в некоторых областях электроники. В первую очередь, можно указать на микропроцессоры, устройства памяти, оптоэлектронные компоненты и новые силовые компоненты (MOSFET, IGBT).

Поскольку Military электронные компоненты в Россию не поставляются, то было принято решение использовать в аппаратуре военного назначения импортные компоненты промышленного исполнения. Предварительно они проходили сертификацию в соответствующих организациях (ЦНИИ-22 МО РФ, г. Москва; РНИИС «Электронстандарт», г. Санкт-Петербург и др.) и включались в соответствующие ограничительные перечни применения. В статье [9] приводятся и другие причины принятых решений. В частности, указывается, что доля мирового рынка электронной компонентной базы (ЭКБ) военного и космического назначения составляет \$1,4 млрд, то есть порядка 0,5–0,8% от мирового объема производства всей ЭКБ ( $\approx 300$  млрд). Поэтому большинство производителей не имеют реальных стимулов для участия в аэрокосмическом и вообще в военном бизнесе с точки зрения производства соответствующей ЭКБ.

Приоритет применения ЭКБ иностранного производства индустриального уровня качества должен отдаваться стабильным крупным фирмам — изготовителям компонентов космического приборостроения с отлаженной прецизионной технологией изготовления. К числу таких фирм относятся International Rectifier (IR), Advance Power Technology (APT), Ixys, Infineon (INF), Epcos, STMicroelectronics (ST), Philips (PHI), Texas Instruments (TI), Motorola (MOT), Octagon и другие. Сложность выбора, времени поставки, проведения достоверных испытаний, долговременного производства и ремонта РЭА на основе импортной ЭКБ с лихвой окупается ее преимуществами, включая сокращение времени проектирования. При этом мы не говорим уже об огромных затратах на разработку и налаживание производства широкой номенклатуры современных и перспективных компонентов в России. (Заметим, что стоимость строительства современного завода по производству микросистемных, в недалеком будущем — наноэлектронных, схем доходит до \$2–3 млрд). Несмотря на более высокие в среднем уровни качества, по сравнению с отечественными компонентами, и проведение предварительной сертификации импортная ЭКБ, применяемая в аппаратуре военного назначения, все равно должна проходить 100%-ный входной контроль.

Для некоторых источников питания промышленного исполнения, работающих в основном в необслуживаемом режиме в естественных условиях (срок службы — не менее 20 лет, технический ресурс — не менее 100 000 ч), например, в устройствах катодной защиты различных трубопроводов [10], входной контроль могут проходить 75–90% комплектующих изделий. В целом требования проведения входного контроля обусловлены следующими факторами при производстве и хранении компонентов:

- Статистический характер выходного контроля многих видов компонентов, особенно не силовых, выпускаемых в объеме десятков тысяч — миллионов изделий, при котором выборка не превосходит 5% объема выпуска.
- Возможное повреждение или уход параметров компонентов при ненадлежащих условиях хранения (тем более при длительном хранении).
- Приобретение компонентов в России через цепочку посредников (дилеров, дистрибьюторов), а не непосредственно у производителя, как было в СССР, или у генерального дистрибьютора (как за рубежом, например, Farnell, Setron, Elfa).

Вообще говоря, входному контролю в первую очередь должны подвергаться:

- Компоненты с повышенной интенсивностью отказов.
- Вновь применяемые компоненты, которые не удалось детально проверить, а достоверные сведения об их качестве и надежности невозможно получить.
- Компоненты, которые не удастся заменить, а их качество нестабильно в процессе поставок.
- Компоненты, достаточно длительное время (более 3–5 лет) находившиеся на складе, особенно при ненадлежащих условиях хранения, и т. п.

Обычно при входном контроле, прежде всего, визуально проверяются: соответствие маркировки и упаковки, внешний вид, отсутствие видимых повреждений, следов коррозии выводов и т. п. Для контроля компонентов используются как стандартные приборы и оборудование (в том числе лабораторные регулируемые источники питания), так и специальное нестандартное оборудование — универсальное или узкоцелевое. Входной контроль, кроме особых случаев (смотри пример ниже), проводится при нормальных условиях: температура окружающего воздуха  $20 \pm 5$  °С, влажность не более 80%.

Приведем перечень минимально контролируемых параметров силовых полупроводниковых приборов:

- а) выпрямительные диоды: ток утечки  $I_r$  (при рабочем или максимальном обратном напряжении — повторяющемся  $U_{RRM}$  или постоянном  $U_{DRM}$ );
- б) тиристоры (оптотиристоры): ток утечки  $I_{Tr}$  в закрытом состоянии (при рабочем или максимальном обратном напряжении — повторяющемся  $U_{RRM}$  или постоянном  $U_{DRM}$ );
- в) биполярные транзисторы: обратный ток коллектора базового перехода  $I_{CBO}$  (при рабочем или максимальном напряжении  $U_{CBO}$ ), коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером  $h_{21E}$ ;
- г) полевые транзисторы (MOSFET): ток утечки  $I_{DSS}$  цепи сток-исток закрытого транзис-

тора (при рабочем или максимальном напряжении  $U_{DSS}$ ), напряжение затвор-исток  $U_{GS} \leq 0,8 \times U_{GSmax}$

д) биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT): ток утечки  $I_{CES}$  закрытого IGBT (при рабочем или максимальном напряжении  $U_{CES}$ ), напряжение затвор-коллектор  $U_{CC} \leq 0,8 \times U_{GSmax}$

Микросхемы управления и защиты (ШИМ-, ЧИМ- и ККМ-контроллеры, драйверы) и микромодули (микроплаты) на их основе обычно проверяются с использованием специального стенда (приспособления). Довольно часто в целях экономии денежных средств они проверяются в составе импульсного ИВЭ такого же типа, который используется в качестве оборудования и в котором предусмотрены быстроразъемные контактные соединители вместо стандартного монтажа (под пайку).

Пассивные компоненты, предназначенные для работы в напряженных режимах и/или в жестких условиях эксплуатации, также могут подвергаться входному контролю. В этих случаях обычно контролируются:

- для всех резисторов — величина сопротивления ( $R_{ном}$ ), а для высокоомных прецизионных и высоковольтных резисторов дополнительно величина сопротивления изоляции ( $R_{из}$ );
- для конденсаторов — величина емкости ( $C_{ном}$ ), а для электролитических конденсаторов дополнительно величина тока утечки  $I_{ут}$  (при номинальном напряжении);
- контролируемые параметры моточных изделий (дроссели, трансформаторы) — сопротивление обмоток, величина индуктивности, а также некоторые другие.

Особое место при входном контроле занимает отбор компонентов по каким-либо ключевым параметрам, что является вынужденным ввиду отсутствия на рынке других компонентов с требуемыми параметрами. При длительном хранении на складе, тем более в ненадлежащих условиях, возможны как повреждения компонентов, материалов, так и ухудшение их параметров. Одному из авторов неоднократно приходилось сталкиваться с такими явлениями. На одном из предприятий (Санкт-Петербург) при изготовлении высоковольтных мощных трансформаторов для импульсных высоковольтных источников питания (ВВИП) [11] для электроизоляции слоев высоковольтной обмотки использовалась кабельная бумага. В дальнейшем готовый трансформатор помещался в бак с трансформаторным маслом. При очередном (конец сентября 1998 г.) выпуске одной из партий высоковольтного блока при испытаниях на электропрочность было зафиксировано снижение испытательного напряжения в 2 раза (25 вместо 50 кВ). Анализ показал, что кабельная бумага хранилась не в герметичной упаковке, в неотопляемом и с повышенной влажностью (в тот период времени) помещении. В результате бумага «насосала» влаги, что снизило электропрочность трансформаторного масла. Были приняты меры по улучшению упаковки бумаги при хранении, а также введено обязательное просушивание бумаги перед намоткой катушек трансформаторов.

Похожий случай имел место на том же предприятии в 2002 г. при изготовлении высоковольтных делителей напряжения для ВВИП. В делителе использовались высоковольтные прецизионные резисторы типа VR-68 ( $R = 68 \text{ МОм} \pm 1\%$ ,  $R_{рас\ max} = 1 \text{ Вт}$ ,  $U_{max} \sim / U_{max} = 7 \text{ кВэф}/10 \text{ кВ}$ ,  $TKC \leq \pm 0,02\%/^{\circ}\text{C}$ ) фирмы Philips. В данном случае эти резисторы, как потом выяснилось, также хранились в ненадлежащих условиях (наличие пыли и повышенная влажность в помещении). Заметного снижения рабочего напряжения резисторов не наблюдалось, но в несколько раз повысилась величина дрейфа (временной нестабильности) выходного напряжения ВВИП. Для исключения подобного негативного явления в будущем пришлось ввести в процесс сборки высоковольтного делителя несколько подготовительных операций. Перед сборкой резисторы VR-68 промывались спиртовой смесью, высушивались при температуре  $+50^{\circ}\text{C}$  и помещались в технологический герметичный контейнер (эксикатор).

Еще пример: при настройке блока в составе аппаратуры в ИВЭ мощностью 350 Вт, который поставлялся одной из малых фирм, произошел отказ после 80 часов работы. Проверка показала, что причиной отказа был не выход из строя активных компонентов (большинство из которых были импортные), а пробой «старого» (фактический срок хранения 10 лет) резистора типа МЛТ-2 (2 Вт, 750 В). После его замены на «свежий» резистор ОМЛТ-2 (срок хранения 2 года) источник надежно работал в течение более 1000 ч.

Приведем также другие примеры по проведению входного контроля компонентов из практики авторов.

*Пример 1.* Контроль оптоотристорных модулей МТОТО80-XX: 2 оптоотристора в корпусе;  $I_{Tmax} = 80 \text{ А}$ , XX — 8Y3 ( $U_{RRM} = 800 \text{ В}$ ) или 9Y3 ( $U_{RRM} = 900 \text{ В}$ ).

Модули использовались в предстабилизаторах напряжения мощностью до 2000 Вт (30–200 В / 10 А) импульсных ВВИП [11]. Предварительный опыт применения модулей этого типа показал, что без отбраковки некоторые образцы модулей выходят из строя или при прогоне аппаратуры (суммарно в течение 100 ч), или в ближайшей месяц после начала эксплуатации. При норме  $I_{Tr\ max} \leq 6 \text{ мА}$  фактически до 20% образцов оптоотристорных имели значение 15–40 мА. Анализ показал, что вследствие значительного увеличения тока утечки при температуре  $+(50-55)^{\circ}\text{C}$  (внутри аппаратуры) происходит дополнительный разогрев оптоотристора и самопроизвольное открывание запертого оптоотристора, поскольку нормируемое значение тока удержания — не более 100 мА. При этом после интервала времени (несколько полупериодов) питающего напряжения происходили или отказы оптоотристорных, или ложные срабатывания защиты от токовых перегрузок. Поэтому было решено ввести 100%-ный входной контроль МТОТО80-Х Х по величине тока утечки  $I_{Tr}$ . Входной контроль производился следующим образом:

- предварительная проверка величины  $I_{Tr}$  в «холодном» состоянии;
- затем прогрев контролируемых образцов в режиме (тиристор открыт) в термостате

(температура  $+50^{\circ}\text{C}$ ,  $I_T = 5 \text{ А}$ , напряжение 220 В, 50 Гц) в течение не менее 1 ч;

- закрывание оптоотристорных и измерение токов утечки;
- отбраковка образцов по результатам контроля.

Принятая методика позволила практически избежать отказов модулей при производстве и свести к приемлемому минимуму эти отказы при эксплуатации.

*Пример 2.* Контроль биполярных транзисторов типа КТ816, КТ817.

В 1995–96 гг. при монтаже и настройке некоторых импульсных ИВЭ на одном из предприятий Санкт-Петербурга (ОАО «НПП «Буревестник») был зафиксирован значительный процент отбракованных транзисторов типа КТ816, КТ817. Типичные отказы и неисправности КТ816, КТ817 были следующие: пробой  $p-n$ -переходов, низкое значение  $h_{21E}$  и даже «выпадение» (!) выводов транзисторов из корпуса при самых незначительных усилиях. Транзисторы имели даты изготовления 1994–95 гг., нормальную упаковку и штамп ОТК. Выяснение обстоятельств отказов элементов с дилером и изготовителем (ПО «Кремний», г. Брянск) показало, что в те годы некоторые партии транзисторов выпускали небольшие компании. Эти фирмы, арендуя производственные участки, оборудование и закупив остатки материалов у генеральной компании, продавали транзисторы по сниженным ценам. В этой связи пришлось временно отказаться от поставок «свежих» транзисторов и перейти на «старые» транзисторы до 1992 г. выпуска. При этом проводился 100%-ный входной контроль образцов транзисторов по указанным выше параметрам. Впоследствии, примерно через 2 года, когда само ПО «Кремний» стало выпускать эти транзисторы с улучшением технологии изготовления и на модернизированном оборудовании, входной контроль постепенно был отменен, и больше особых проблем не возникало.

*Пример 3.* Контроль и отбор варисторов типа 594–30.

В ВВИП рентгеновских трубок (РТ) после высоковольтного делителя обратной связи (ОС) используются ограничители импульсных перенапряжений, возникающих при самопроизвольных пробоях РТ или КЗ на выходе ВВИП. Для этой цели обычно использовались защитные газоразрядники на напряжение  $\leq 100 \text{ В}$ , обладающие малыми токами утечки ( $\leq 5-10 \text{ нА}$ ). Такие требования обусловлены высоким сопротивлением низковольтного плеча высоковольтного делителя обратной связи (ОС). Вторая ступень ограничителя выполнялась на стандартной резистивно-диодной цепочке между дифференциальными входами усилителя ОС, причем максимально возможный полезный сигнал на входе усилителя составлял  $\pm 12 \text{ В}$ . В 1997–98 гг. в России невозможно было приобрести отечественные разрядники, а импортные газоразрядники еще не поставлялись. В этой связи один из авторов решил использовать для этой цели варисторы, например, типа 594–30 (Philips), с паспортными данными: напряжение ограничения  $U = 38 \text{ В}$ , постоянная рассеиваемая мощность 0,4 Вт, максимальная допустимая энергия поглощения ( $E_{max}$ ) — не менее 9,2 Дж (10–1000 мкс). Было исследо-

вано порядка 10 штук варисторов этого типа и выяснилось, что у 70–80% варисторов этого типа при напряжении  $\pm 12$  В величина тока утечки не превышает 5–10 нА. Далее был организован входной контроль варисторов и их отбор по указанному параметру. Остальные варисторы использовались по своему обычному назначению.

О результатах входного контроля производитель ИВЭ информирует изготовителя или дистрибьютора, добиваясь замены отбракованных изделий и требуя улучшения качества поставляемых изделий.

### Пооперационный контроль компонентов и узлов собственного производства

Пооперационный контроль является важным и обязательным мероприятием не только с точки зрения обеспечения высокого качества и надежности продукции, в том числе и ИВЭ, но и позволяет снизить финишные трудозатраты и сократить возможную потерю времени. Из всего многообразия мероприятий по контролю отметим пооперационный контроль печатных плат (ПП) и моточных изделий.

Для повышения надежности ИВЭ стараются уменьшить плотность компоновки ПП. Чаще всего используются одно- или двусторонние ПП. В настоящее время изготовление ПП и их проектирование в ряде случаев осуществляется в специализированных компаниях — контрактных производствах. В частности, можно указать на отечественные фирмы «УниверсалПрибор», «Аксон», «Резонит», зарубежные компании с отделениями в России — AT&S (Австрия), Pacific Microelectronic Inc. (Тайвань) и другие. Они имеют современное высокопроизводительное технологическое и контрольно-измерительное оборудование. Проверка плат осуществляется оптическими приборами, например в отраженном свете. При этом контролируется прочность сцепления (адгезии) проводников со стеклотекстолитом, отсутствие видимых замыканий проводников и т. п. При больших партиях ПП для контроля могут использоваться автоматизированные стенды с контактными микрощупами для контроля карты сопротивлений («0» или «∞»). Это позволяет выявить наличие «лишних» соединений или отсутствие необходимых (некачественная металлизация отверстий). Подобные методы контроля очень важны при переходе на технологию поверхностного монтажа (SMD).

При проверке опытных образцов и первых серийных партий ПП, предназначенных для сетевых ИВЭ, необходимо дополнительно проверять такой параметр, как электропрочность, то есть контролировать величину испытательного напряжения между входной (сетевой) частью платы и низковольтными выходами. Обычно при питании от однофазной сети переменного тока  $\sim 220$  (230) В, 50 (60) Гц необходимо подавать напряжение  $\sim 1200$ – $1500$  В, 50 Гц в течение 1 минуты. Соответственно при питании от трехфазной сети переменного тока  $3 \times \sim 380$  В, 50 Гц величина напряжения составляет  $\sim 2500$  В, 50 Гц (1 мин). При серийном выпуске такие испытания проводятся только при выходном контроле самого ИВЭ.

Для уменьшения «отхода» (% брака) моточных изделий при производстве уже при конструировании принимают меры по минимизации рисков изготовления некачественных изделий. Так, запрещается применять, кроме обоснованных случаев, «очень тонкие» провода с диаметром менее 0,12 мм. И, наоборот, для больших токов в обмотках (более 10 А) не рекомендуются обмоточные провода с диаметром более 1,5 мм. В таких случаях обычно применяют: параллельное соединение проводов; лицендрат (многожильный провод); медную тонкую фольгу с соответствующей подготовкой (притупление кромок, покровный лак и т. д.).

При пооперационном контроле ВЧ моточных изделий (дросселей, трансформаторов) осуществляются следующие проверки:

- Сердечники (магнитопроводы): визуальный контроль на отсутствие сколов, царапин, трещин, оценка плоскопараллельности сечений в кернах.
- Обмоточные провода: визуально — цвет и состояние изоляционного покрытия, приборный контроль — диаметра провода с помощью микрометра, а изоляции с помощью мегаомметра.
- Намотанные катушки: отсутствие короткозамкнутых (КЗ) витков на специальном стенде.

Отметим, что некоторые виды контроля появились в России в середине 1990-х годов, когда произошло существенное ухудшение качества намоточных проводов.

### Выходной контроль компонентов и узлов собственного производства

Выходной контроль параметров проходят все компоненты и узлы собственного производства. Мы ограничимся рассмотрением контроля параметров моточных изделий (высокочастотных дросселей и трансформаторов), сетевых фильтров электромагнитных помех, микроплат управления и защиты. При этом особое внимание будет уделено обеспечению безотказности и долговечности изделий.

**Высокочастотные (ВЧ) дроссели.** При проектировании ИВЭ целесообразно использовать покупные дроссели, которые имеют хорошо отработанную технологию изготовления. Кроме того, подобные дроссели, как правило, прошли необходимые испытания на климатические и механические воздействия, а также эксплуатировались длительное время. К таким дросселям можно отнести отечественные ВЧ-дроссели типа Д13, ДМ и т. п. Из зарубежных хорошо себя зарекомендовали дроссели фирм Epcos, Murata и других. Вместе с тем широкий диапазон выходных токов импульсных ИВЭ в сочетании иногда с повышенными напряжениями, как, например, в ККМ, вынуждают достаточно часто разрабатывать «собственные» дроссели.

При выходном контроле таких дросселей, так же как и у покупных, контролируются внешний вид, маркировка, сопротивление обмотки (обмоток)  $R_L$  и величина индуктивности  $L$  с помощью LCR-измерителя. У многообмоточных дросселей дополнительно проверяется фазировка (полярность) выводов, то есть соответствие «начала/конца» обмотки обозна-

чениям (нумерации) выводов по документации (чертежам). Контроль производится одним из двух методов: а) с использованием генератора импульсов и осциллографа, б) с использованием LCR-измерителя. В первом случае на одну (первую по нумерации) обмотку от генератора подается импульсное напряжение. При этом измерение напряжений на обмотках дросселя производится с помощью двухлучевого осциллографа. По совпадению (несовпадению) фаз напряжения на обмотках определяется правильность маркировки выводов. При втором методе обмотки соединяются последовательно друг за другом. Если LCR-измеритель показывает увеличение значения индуктивности при каждом последующем их измерении, то мы имеем дело с согласным включением обмоток, то есть «конец» первой обмотки соединен с «началом» второй обмотки.

Также у многообмоточных дросселей контролируется качество электроизоляции: сопротивление изоляции  $R_{из}$  и испытательное напряжение между обмотками  $U_{из}$ . Такой контроль очень важен для обеспечения безотказности и долговечности дросселей. Для низковольтных дросселей величина сопротивления изоляции, как правило, не должна быть менее 20 МОм, для сетевых дросселей — не менее 100 МОм. Испытательное напряжение между обмотками обычно нормируется порядка 100–250 В, 50 Гц — для низковольтных дросселей и 500 (1000) В, 50 Гц для сетевых дросселей (при условии, что такие дроссели при установке изолированы от металлического корпуса источника). В некоторых случаях, когда дроссели предназначаются для работы при частотах 100–300 кГц, у образцов первой промышленной партии можно проверить величину добротности или паразитной емкости между выводами.

**Силовые ВЧ-трансформаторы.** Предварительно сделаем несколько замечаний. Силовые ВЧ-трансформаторы, к сожалению, купить сложно из-за большого разнообразия мощностей, токов и напряжений импульсных ИВЭ, а также широкого диапазона частот преобразования (20–300 кГц). В принципе можно сделать заказ по кооперации на изготовление таких трансформаторов, но такая партия (по экономическим соображениям) должна быть достаточно большой по объему (сотни–тысячи штук). При этом количество типоминималов трансформаторов должно быть минимально. Кроме того, встают вопросы о качестве изготовления трансформаторов в данной компании (контроль сердечников, намоточных проводов, пропитки/заливки, выходных параметров) и о проведении финишной приемки. В этой связи достаточно часто в России изготовление ВЧ-трансформаторов и их выходной контроль осуществляются непосредственно в компании-разработчике импульсных ИВЭ и аппаратуры, для которой они предназначаются.

Приведем перечень обычно контролируемых параметров ВЧ-трансформаторов:

- Омические (активные) сопротивления обмоток.
- Правильность маркировки выводов обмоток (аналогично многообмоточным дросселям (смотри выше)).

в) Индуктивность  $L_{\mu}$  первичной обмотки (индуктивность намагничивания).  
 г) Напряжения  $U_1-U_i$  на обмотках  $w_1$  (первичная),  $w_2-w_i$ , измеряемые в режиме холостого хода. Трансформатор питается от генератора, работающего на частоте, указанной в нормативном документе.

д) Параметры электроизоляции: сопротивление изоляции  $R_{из}$ , электропрочность изоляции (испытательное напряжение  $U_{из}$ ).

Активные сопротивления обмоток фактически измеряются 2 раза, причем первый раз при поперационном контроле намотанных катушек. При больших сечениях проводов обмоток (сопротивление — доли ома), конечно, это не измерение, а фактически приблизительный контроль намотки (отсутствие обрыва, иногда для высоковольтных обмоток — отсутствие межвитковых замыканий). Величина индуктивности  $L_{\mu}$  первичной обмотки, как и в случае с дросселями, определяется LCR-измерителем. Поскольку индуктивность намагничивания зависит от материала сердечника и количества витков обмотки, то косвенно это свидетельствует о правильности намотки первичной обмотки и качестве сердечника трансформатора.

Измерение номинальных напряжений обмоток трансформатора на рабочей частоте представляет определенные трудности по следующим причинам:

- Если оцениваются трансформаторы для AC/DC-преобразователей, то необходимо на первичную обмотку подать импульсное напряжение с амплитудой 150 (300) В (питания ИВЭ от однофазной сети переменного тока 220 ВэФ) и 450–550 В (при питании от трехфазной сети 3×380 ВэФ).
- Необходимо также обеспечить заданные параметры импульсов: частоту (20–300 кГц), крутизну фронтов (доли микросекунд), а при ШИМ — рабочий коэффициент заполнения импульсов ( $\gamma = 0,2-0,4$ ) и т. д.

Выполнение этих условий требует использования достаточно сложных, универсальных стендов, в состав которых должны входить: генератор импульсов, ключевой усилитель мощности с регулируемой защитой от токовых перегрузок и КЗ (с отключением), регулируемый источник питания с защитой, осциллограф и коммутационные элементы. При широкой номенклатуре изготавливаемых трансформаторов не всегда возможно иметь такие стенды, особенно в небольших компаниях. Поэтому обычно прибегают к косвенным методам проверки. Часто для проверки используется настроенный, доработанный и испытанный опытный (экспериментальный) образец ИВЭ данного типа в режиме холостого хода (или близкого к нему). Силовой ВЧ-трансформатор самого источника выпаявается из платы, и к контактным площадкам на плате подсоединяются быстроразъемные соединители. Таким образом, каждый проверяемый трансформатор работает в реальном режиме. В принципе, с целью упрощения проверки, можно вместо прямоугольного напряжения использовать синусоидальное напряжение высокой частоты, подаваемое на первичную обмотку. Если нет возможности подать напряжение с рабочей амплитудой (например, 150/300 В), то можно подавать уменьшенное

напряжение с соответствующей коррекцией частоты.

В отечественной практике для ВЧ-трансформаторов AC/DC-преобразователей сопротивление между первичной и вторичными обмотками нормируется на уровне не менее 100 МОм (в отдельных случаях допускается не менее 20 МОм). Также при питании источников от однофазной сети переменного тока ~220 (230) ВэФ, 50 (60) Гц величина испытательного напряжения ~1500 ВэФ, 50 Гц (плавно увеличивается в течение 1 мин). Соответственно при питании от трехфазной сети переменного тока 3×~380 ВэФ, 50 Гц величина испытательного напряжения составляет ~2500 ВэФ, 50 Гц (1 мин). Испытательное напряжение между вторичными низковольтными обмотками должно быть 100 (500 В), 50 Гц (1 мин) — в зависимости от величины низкого напряжения.

*Сетевые фильтры электромагнитных помех.* Сетевые фильтры электромагнитных помех (ФС) собственного производства проходят проверку параметров, если они выполнены в виде отдельной сборки (модуля). Наиболее часто в импульсных ИВЭ используются следующие структуры: одинарные П-образные  $C_x1-L1-C_x2-2C_y$  и сдвоенные  $C_x1-L1-C_x2-2C_y-L2-C_x3-2C_y$  [12]. В качестве индуктивностей используются двухобмоточные дроссели, обмотки которых включены в сетевые провода (фаза «L» и нейтраль «N»). По отношению к кондуктивным несимметричным помехам они включены согласно, а относительно симметричных помех — встречно. «Полярность» обмоток дросселей и соответствующая маркировка выводов была проверена ранее. В качестве конденсаторов  $C_x$  (0,1–1 мкФ) и  $C_y$  (1–6,8 нФ) используются керамические конденсаторы с малыми величинами собственной индуктивности и тангенса угла потерь ( $\text{tg}\delta$ ).

При проведении выходного контроля фильтров, как правило, осуществляется: а) проверка электромонтажа, б) проверка параметров электроизоляции (сопротивление, электропрочность, в) проверка коэффициента подавления несимметричных помех (их подавлять наиболее трудно). Требования к параметрам электроизоляции были изложены выше. В частности, величина испытательного напряжения между «L» и «N» составляет 500 ВэФ, 50 Гц (1 мин) — для однофазной сети переменного тока 220 ВэФ, 50 Гц. Величина испытательного напряжения между соединенными вместе входами «L», «N» и корпусом Gnd (средняя точка соединения конденсаторов  $C_y$ ) составляет 1500 ВэФ, 50 Гц (1 мин).

В практической работе один из авторов для проверки коэффициента подавления несимметричных помех использовал следующую схему. Соединялись вместе входные зажимы «1(L)» с «2(N)» и выходные зажимы «3(L<sub>1</sub>)» с «4(N<sub>1</sub>)». Между объединенным таким образом входом фильтра и зажимом «5(Gnd)» через безиндуктивный резистор R1 с сопротивлением 50 (75) Ом включался высокочастотный генератор синусоидальных сигналов. Между объединенным выходом фильтра и зажимом «5(Gnd)» включался нагрузочный резистор  $R_2 = 50$  (75) Ом. При подаче на вход сигналов с амплитудой 5 (10) В в частотном диа-

пазоне 0,15–10 (20/30) МГц по осциллографу измерялась «подавленная» амплитуда несимметричной помехи. Для уменьшения времени проверки были выбраны такие (характерные) значения частоты сигналов: 0,15; 1,0; 3 (5); 10; 20 (30) МГц.

*Микроплаты управления и защиты.* Устройство управления и защиты (УУЗ) импульсного ИВЭ выполняется на отдельной миниатюрной плате (микроплате) в тех случаях, например, когда источник многоканальный. Поэтому бывает практически сложно разместить УУЗ на основной плате без повышения плотности компоновки, тем более, если габаритные размеры основной печатной платы жестко заданы. При проведении выходного контроля УУЗ осуществляется: а) проверка электромонтажа, б) проверка соответствия параметров управления, в) проверка функционирования защиты. Проверка электромонтажа первоначально производится визуально, потом ограниченной «прозвонкой» с помощью мультиметра (в соответствии с указаниями инструкции по проверке и настройке). Для проверки параметров УУЗ практически необходимы: регулируемый источник питания, приспособление (плата) с размещенными регулировочными компонентами (R, C), осциллограф и цифровой мультиметр. Подавая на входы УУЗ различные контрольные напряжения (с помощью регулировочных элементов приспособления), на выходах можно наблюдать форму и параметры импульсов (фаза, амплитуда, частота, длительность) и сравнивать их с требуемыми. При несоответствии их контрольным значениям производится изменение номиналов пассивных элементов (R, C) в «обрамлении» микросхемы управления. Далее при установке на соответствующих входах УУЗ пороговых значений сигналов перегрузки (по току, по перенапряжению и т. д.) контролируется срабатывание УУЗ. Это, например, уменьшение длительности импульсов управления (при ШИМ), понижение частоты (при ЧИМ), исчезновение управляющих сигналов и т. д.

### Оптимизация настройки источников в целом

Импульсный ИВЭ, разработанный опытными специалистами с учетом рекомендаций по надежности и изготовленный с соблюдением всех техпроцессов и контрольных операций, в принципе может начать функционировать сразу при первом включении. Однако на практике все равно необходимо потратить определенное время на настройку его параметров, чтобы они соответствовали техническим требованиям. Оптимизация настройки (регулировки) импульсных ИВЭ заключается не только в сокращении ее продолжительности при полном объеме регулировочно-контрольных процедур. Важно также избежать возможных повреждений, выхода из строя компонентов или ухудшения их качества. Реально некоторый процент изготовленных изделий имеет какие-то дефекты. По мнению авторов, оптимизация настройки ИВЭ заключается в использовании:

- универсальных настроечных стендов;
- оптимального алгоритма настройки.

Универсальный стенд для настройки AC/DC-преобразователей, обеспечивающий «электро-

безопасную» и правильную настройку источников, должен иметь в своем составе:

- а) регулятор переменного напряжения (вариатор, лабораторный автотрансформатор, регулируемый стабилизатор переменного напряжения);
- б) развязывающий сетевой трансформатор;
- в) защитное устройство от токовых перегрузок и КЗ (с выключением), например:
  - на основе симистора или оптоэлектронной (ТО325-12,5-9, ТО525-12,5-9) «двойки» в сети переменного тока и с резистивным датчиком на входе источника (выходе) стенда;
  - с наличием мощного низкоомного резистора, последовательно включенного с сетевым входом источника питания (после завершения начального этапа настройки выключается);
- г) набор мощных нагрузочных резисторов с высоковольтными переключателями;
- д) источники низковольтного питания, используемые при различных проверках (для питания УУЗ, имитации различных ситуаций) и т. п.;
- е) измерительные приборы и т. д.

За рубежом для этих целей с конца 1980-х годов достаточно широко применяются автоматизированные стенды, в которых изменение режимов настройки устанавливается программно. При отсутствии универсального стенда в принципе необходимо соблюдать минимальные требования к стенду (а–г), а также иметь внешние измерительные приборы и источники питания.

Оптимальный алгоритм настройки импульсных ИВЭ подразумевает рациональный порядок и состав процедур настройки:

- визуальный экспресс-контроль электромонтажа и сборки;
- выборочная «прозвонка» электромонтажа, в частности входных цепей, выходов и между входами и выходами;
- проверка (настройка) параметров функционирования устройства управления (УУ) совместно с силовыми элементами без подачи питания на силовую часть источника (с внешним электропитанием УУ);
- имитация сигналов перегрузок и контроль функционирования устройства защиты (УЗ);
- первичное включение источника в целом от сети переменного тока через стенд при небольшой нагрузке;
- финишная настройка основных параметров источника в номинальном режиме и в режиме холостого хода;
- проверка функционирования источника при пуске и выключении, а также в различных нештатных ситуациях.

Настроенные таким образом источники подготовлены к проведению технологической тренировки (приработки).

#### Технологическая тренировка

Технологическая тренировка источников питания характеризуется как общей продолжительностью проведения, длительностью отдельных периодов, так и условиями проведения. Общая продолжительность тренировки обычно составляет:

- для источников коммерческого исполнения — 8–12 ч, иногда 3–4 ч;
- для источников индустриального исполнения — минимально 12 ч, максимально 24 ч;
- для источников военного назначения — 120–150 ч, а в особых случаях это время может быть увеличено.

Технологическая тренировка изделий в коммерческом или промышленном исполнении, как правило, осуществляется в нормальных условиях: температура окружающего воздуха 20 ± 5 °С, влажность — до 80%.

Во время прогона контролируется выходное напряжение и ток нагрузки, например, через 2–4 ч в зависимости от длительности тренировки, после установленного времени прогрева (30 или 60 мин). Кроме того, импульсные ИВЭ проходят технологическую тренировку (прогон) в составе аппаратуры, в которой они используются. Так, в ОАО «НПП «Буревестник»» (Санкт-Петербург) при настройке аналитической лабораторной аппаратуры и ее прогоне общая наработка источников фактически составляла до 72 ч. На этом же предприятии при выпуске промышленных люминесцентных сепараторов, поставляемых в Якутию и Анголу, дополнительный прогон импульсных ИВЭ в составе сепараторов длится не менее 100 ч.

Условия проведения и программа технологической тренировки для аппаратуры оборонного назначения регламентируются специальными стандартами. Основным критерием проведения этих испытаний состоит в том, чтобы изделие подвергалось наиболее тяжелым режимам работы блока в условиях неблагоприятных внешних воздействий.

#### Мероприятия по поддержанию необходимого уровня надежности ИВЭ при их эксплуатации

При эксплуатации источников питания разработчиком и изготовителем проводятся следующие мероприятия:

- а) сбор сведений по работоспособности импульсных ИВЭ, включая количество и характер неисправностей и отказов, условия возникновения, сопутствующие обстоятельства (по отзывам потребителей или отчетам специалистов после проведения ими гарантийных или послегарантийных ремонтов);
- б) анализ и классификация сведений о произошедших неисправностях и отказах;
- в) выработка и внедрение рекомендаций по восстановлению (ремонту) источников, в том числе по изменению состава их ЗИП (группового, индивидуального, «россыпью»);
- г) принятие решений по модернизации ИВЭ после их длительной эксплуатации, например по просьбе заказчика (потребителя).

Срок службы аппаратуры и оборудования, в которое входят импульсные ИВЭ, может составлять от 6–8 до 20–25 лет в аппаратуре военного или индустриального назначения, предназначенной для работы в редко обслуживаемом режиме, при жестких климатических условиях работы. В этом случае необходимо уделить повышенное

внимание снабжению потребителя достаточным комплектом ЗИП.

Иногда возникают проблемы с обеспечением компонентами, поскольку в современных условиях многие из них через 6–8 лет могут быть сняты с производства. Поэтому, кроме поставок таким постоянным потребителям увеличенного количества ЗИП вместе с аппаратурой, предприятие-изготовитель должно определенное время иметь и пополнять на своем складе в резерве некоторые компоненты ИВЭ. В частности, это такие компоненты, которые по результатам анализа эксплуатационной статистики наиболее часто отказываются. Конечно, они должны храниться в надлежащих условиях в стандартной упаковке. При поставке таких компонентов потребителю или при использовании их для ремонта источников на предприятии-изготовителе, из опыта авторов, должны соблюдаться следующие условия:

- Отбираются только те компоненты, у которых срок хранения не превышает половину срока службы и хранения по ТУ (спецификациям), если срок хранения указан отдельно.
- Все компоненты проходят входной контроль.

#### Заключение

1. Особое значение для обеспечения надежности импульсных ИВЭ [4] имеет оптимальное проектирование следующих устройств, узлов и компонентов:
  - схем ограничения пусковых токов соответственно особенностям структуры ИВЭ;
  - корректоров коэффициента мощности при питании от однофазной сети переменного тока;
  - преобразователей напряжения, выполненных в зависимости от мощности, при оптимальной частоте преобразования;
  - силовых ВЧ-трансформаторов, спроектированных по критериям минимума потерь мощности, с учетом требований по высокому качеству электроизоляции;
  - отработки комплексной защиты импульсных ИВЭ при различных аварийных ситуациях, как одно из главных условий надежной работы источников.
2. Выбор надежных компонентов, а также безопасных режимов их работы, которые определяются с учетом всех условий работы [3], является одним из главных условий безотказной работы импульсных ИВЭ при последующей их эксплуатации.
3. При производстве ИВЭ необходимо, в частности, осуществлять входной контроль компонентов и покупных узлов и проводить технологическую тренировку в режимах и при условиях, обоснованных с точки зрения функционального назначения изделия.
4. Приведены конкретные примеры организации входного контроля некоторых компонентов, в том числе оптоэлектронных, биполярных транзисторов и других. Описаны процедуры контроля точных изделий (ВЧ-трансформаторов и дросселей) и фильтров электромагнитных помех. При изло-

жении материала по оптимальной настройке ИВЭ особое внимание уделено стендовому оборудованию и оптимальному алгоритму настройки источников.

5. Указаны некоторые из основных мероприятий, необходимых для повышения надежности при эксплуатации источников питания. Речь идет о количестве и характере неисправностей и отказов, а также условиях их возникновения.

### 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. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 4. Импульсные источники питания // Силовая электроника. 2009. № 2.
5. Эраносян С., Ланцов В. Источники бесперебойного питания: новый подход к синтезу. Часть 2 // Силовая электроника. 2008. № 1.
6. Антонов С. Схемотехника промышленных сварочных инверторов // Современная электроника. 2007. № 8.
7. Петров С. Современная схемотехника сварочных инверторов. Часть 1 // Современная электроника. 2009. № 1.
8. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
9. Данилин Н., Белослудцев С. Проблемы применения современной индустриальной электронной компонентной базы иностранного производства в ракетно-космической технике // Современная электроника. 2007. № 7.
10. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2008. № 1.
11. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора // Современная электроника: 2007. № 6. 2008. № 1.
12. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2007. № 1.