

Окончание. Начало в № 5'2010

# Мощные высоковольтные источники питания

Часть 5

**В заключительной статье цикла рассмотрены некоторые общие проблемы, важные для создания высоковольтных источников питания различных видов и классов. К их числу относятся: задачи упрочнения и комплексирования, оптимизация и автоматизация управления, достижение приемлемой электромагнитной совместимости, обеспечение надежности, измерение выходных параметров и др.**

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Евгений Владимиров,  
к. т. н.

envlad@list.ru

В статьях [1, 2] цикла приводятся сведения об областях применения мощных высоковольтных источников питания (ВВИП), их классификация и рассмотрены существенные отличия от низковольтных источников питания (ИВЭ). Дан обзор структур построения мощных ВВИП в аспекте их развития. Отмечены особенности высоковольтных (ВВ) блоков и модулей, приводятся основные характеристики входящих в них высоковольтных компонентов. В работе [3] рассмотрены некоторые ВВИП большой мощности с импульсным выходом («импульсные ВВИП», или «высоковольтные импульсные генераторы или модуляторы»). Приведены характерные области их применения и основные схемы формирования высоковольтных импульсов. Даны сведения об основных узлах и компонентах импульсных ВВИП, включая рентгеновские импульсные трубки, высоковольтные коммутаторы, импульсные ВВ-трансформаторы. Конкретно описаны схема и особенности работы высоковольтного импульсного источника питания рентгеновской трубки мощностью порядка 9 кВт в импульсе (30 кВ/300 мА) и с управлением на основе микроконтроллеров типа PIC16F877 фирмы Microchip.

В статье [4] рассмотрены источники высокого напряжения с выходом на постоянном токе на основе высокочастотных преобразователей для питания мощных электровакуумных приборов, в основном рентгеновских трубок. Приведены схемы двух реальных моделей ВВИП: типа Kristalloflex 710H (Siemens) мощностью 3,5 кВт (55 кВт/60 мА) и высокостабильного ВВИП-50/5 мощностью 250 Вт (50 кВ/5 мА), разработанного при участии авторов.

В заключительной статье цикла анализируются некоторые общие проблемы ВВИП, важные для их создания. В их числе: упрочнение и комплексирование, оптимизация и автоматизация управления, достижение приемлемой электромагнитной совместимости, обеспечение надежности, измерение выходных параметров. В основном эти проблемы будут рассмотрены применительно к преобразовательным источникам высокого напряжения с выходом на постоянном токе, как наиболее сложным.

## Увеличение мощности и комплексирование ВВИП

Иногда возникает практическая необходимость в увеличении мощности модернизируемых ВВИП при новых заказах на источники высокого напряжения, аналогичные по классу ранее разработанным, для создания различных испытательных установок и т. д. В таких случаях целесообразно воспользоваться отработанными схемно-конструктивными решениями и попытаться с наименьшими затратами создать более мощный ВВИП. Решение подобных задач для низковольтных ИВЭ разной мощности описано во многих работах, например в [5, 6]. Для сверхмощных (супермощных) ИВЭ (10–2000 кВт) такая задача концептуально рассмотрена в статье [7]. Проанализируем известные способы применительно, например, к удвоению мощности источников высокого напряжения ( $U_v$ ). При этом возможны следующие варианты: последовательное, параллельное или комбинированное включение различных составных частей или источников в целом, например для ВВИП с выходом на постоянном токе.

1. Непосредственное параллельное соединение модулей инверторов (или силовых ключей в них) с общим управлением, при этом ВВ-блоки также соединяются параллельно по высокому напряжению, но через разделительные ВВ-диоды (параметры диодов должны быть:  $U_{RRM} > U_{v \max}$ ,  $I_{FAV} > I_{v \max}$ ).
2. Непосредственное параллельное соединение модулей инверторов (или силовых ключей в них) с общим управлением при последовательном соединении двух ВВ-блоков, но с доработкой цепей обратной связи (ОС) по высокому напряжению/току нагрузки и дополнительных цепей (например, накала) в случае необходимости.
3. Параллельное соединение двух однотипных ВВИП при добавлении разделительных ВВ-диодов по выходам и организации общего управления.

Понятно, что в описанных вариантах возникают и другие дополнительные задачи, которые надо решать. Первый метод наиболее легко реализуется, однако необходимо предусматривать соответствующее

умощнение силового питания инвертора, а также питание цепей управления. Второй наиболее труден для реализации, поскольку:

- требуется дополнительное усиление электроизоляции ВВ-блоков как относительно общего металлического корпуса, так и между собой;
- необходимо реконфигурировать цепи ОС по высокому напряжению и току нагрузки в ВВ-блоках и дополнительно «развязать» их с общим устройством управления;
- требуется доработка защиты от перегрузок и т. д.

Третий вариант сравнительно несложен, так как низкопотенциальные выводы обоих источников чаще всего заземляются в целях безопасности. Он пригоден для использования в испытательной высоковольтной установке, и в нем, кроме упомянутого выше, необходимо предусмотреть узел общего включения/выключения такой системы.

### Оптимизация и автоматизация управления источников высокого напряжения

#### О взаимосвязи регулирования высокого напряжения и тока нагрузки

Некоторые нагрузки высоковольтных источников, например рентгеновские трубки (РТ), лазеры и другие, имеют нелинейную вольт-амперную характеристику. В том числе на определенных участках ВАХ динамическое сопротивление может быть отрицательным —  $R_{дин} = -\Delta U_v / \Delta I_a$ . В работе [8] показано, что РТ, как объект регулирования, является общим для двух каналов стабилизации: стабилизатора высокого (анодного) напряжения (СВН) —  $U_v$  (или  $U_a$ ) и стабилизатора анодного тока (САТ) —  $I_a$ . Там же приведен график зависимости  $U_a = F(I_a)$  для аппарата типа АРТВА-5,0 (рентгеновская трубка с вращающимся анодом с максимальной мощностью 5 кВт). Так, при изменении анодного тока  $I_a$  от 10 до 100 мА анодное напряжение  $U_a$  изменяется в пределах:  $R_{РТ} = 34 \text{ кВ}/10 \text{ мА} = 3,4 \text{ МОм} \rightarrow 24 \text{ кВ}/100 \text{ мА} = 240 \text{ кОм}$ , то есть на порядок. Из теории систем автоматического управления, например [9], известно, что для обеспечения устойчивости взаимосвязанных систем автоматического управления (регулирования) необходимо, чтобы, во-первых, каждая из систем была абсолютно устойчива как в «малом» (для малых сигналов), так и в «большом» (для сигналов значительного уровня, превышающих линейный диапазон работы системы). Во-вторых, между двумя системами регулирования параметров одного объекта не должно возникать конкурентного состояния, то есть системы не должны иметь близкие по величине показатели быстродействия. В противном случае возможен переход таких систем в режим автоколебаний или на работу в непредусмотренном (нештатном) режиме. На практике, например для ВВИП РТ, основная постоянная времени канала САТ должна быть не менее чем в два раза больше, чем в канале СВН [4]. Кроме того, авторы на практике убе-

дились, что при работе ВВИП РТ в широком диапазоне изменения высокого напряжения и тока устройство управления должно выдавать сигнал на увеличение анодного тока РТ только после того, как выходное высокое напряжение достигнет некоторой минимальной величины.

#### О предпочтительных структурах и законах управления ИВН

В современных мощных преобразовательных ИВН при питании от однофазной сети переменного тока применяются активные корректоры коэффициента мощности (ККМ). Они позволяют не только избежать искажений формы кривой потребляемого тока, но и осуществить предварительную стабилизацию напряжения питания инвертора на уровне 350–400 В. (Подробнее о ККМ далее в статье.) В качестве инверторов в подавляющем большинстве используются двухтактные структуры: полумостовые (обычно до 500 Вт) и мостовые (более 500 Вт), одинарные или сдвоенные (многоячейные) — для увеличения мощности. По принципу действия различается управление на основе резонанса, частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) или широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При резонансном управлении используются резонансные свойства высоковольтных трансформаторов (большая величина паразитной индуктивности рассеяния  $L_s$ ) с добавлением внешнего конденсатора (конденсаторов), чаще всего последовательно или параллельно первичной обмотке ВВ-трансформатора или же параллельно силовым ключам инвертора. Достоинство метода заключается в отсутствии или минимизации коммутационных потерь мощности в силовых ключах и, соответственно, уменьшении электромагнитных помех переключения. Трудность — дефицит конденсаторов с большой допускаемой реактивной мощностью (кВАР), нормированной емкостью с малыми значениями допуска и ТКЕ, большим значением рабочего напряжения. Кроме того, при уменьшении частоты (при повышении напряжения питания или уменьшении тока нагрузки) возрастают пульсации выходного высокого напряжения. Регулирование происходит благодаря изменению частоты «справа» и «слева» от резонансного пика. Резонансная кривая для удобства регулирования не должна быть «острой». При ЧИМ-регулировании также используется явление резонанса, но рабочая точка выбирается существенно «левее» резонансного пика — так, чтобы весь диапазон регулирования частоты также находился левее него. Переключение силовых ключей чаще всего происходит в режиме нулевого напряжения (ZVS) на ключах, что и обеспечивает минимум коммутационных потерь мощности. Здесь сложности те же самые, что при резонансном управлении. Управление на основе ШИМ с жестким циклом коммутации подразумевает наличие коммутационных потерь на ключах, но проще и понятнее разработчикам. На рынке компонентов имеется много микросхем ШИМ-контроллеров,

не требуются дефицитные резонансные конденсаторы. Вместе с тем наличие значительной индуктивности рассеяния  $L_s$  у ВВ-трансформатора порождает определенные трудности. В частности, из-за затягивания процесса выключения тока при действии  $L_s$  длительность гарантированной паузы («мертвое время») между двумя импульсами в такте при максимальных значениях выходного напряжения и тока должна быть увеличена (с 5 до 10–15 %). Иными словами, это приводит к уменьшению максимального значения коэффициента заполнения  $K_3$  (увеличению скважности) и, следовательно, к уменьшению глубины регулирования и некоторому увеличению уровня пульсаций.

Отметим дополнительные особенности управления применительно к высокостабильным ВВИП, работающим в широком диапазоне выходных напряжений и токов нагрузки [4]. В отличие от устройств управления низковольтными преобразовательными ИВЭ, в преобразовательных ВВИП с выходом на постоянном токе не удается непосредственно использовать микросхемы ШИМ-/ЧИМ- и резонансных контроллеров как из-за очень больших значений коэффициента деления  $K_d$  высокоомного ДВН (1:1000, 1:30 000 и более), так и по требованиям высокой стабильности СВН. Встроенные усилители сигнала ошибки имеют сравнительно небольшие значения коэффициента усиления ( $K_u = 2000\text{--}90\,000$ ), значительную величину смещения нуля  $\Delta U_{вх} = 2\text{--}10 \text{ мВ}$  и невысокое входное сопротивление  $R_{вх} \leq 1 \text{ МОм}$ . Оставляют желать лучшего и параметры встроенного источника опорного напряжения (ИОН), и т. д. В этой связи в устройствах управления ВВИП для питания, например РТ, предусматривается:

- применение в цепях обратной связи (ОС) операционных усилителей (ОУ) с очень большим  $K_u (\geq 2 \times 10^5)$ , малыми величинами смещения нуля ( $\leq 0,5 \text{ мВ}$ ) и температурного дрейфа ( $\leq 20 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ), большим входным сопротивлением ( $>1 \text{ МОм}$ );
- использование ИОН с низкими значениями ТКН и временного дрейфа на основе или прецизионных стабилитронов, или интегральных микросхем, регулируемых ИОН;
- обеспечение большой величины основных постоянных времени (сотни миллисекунд) в цепи ОС СВН и САТ и определенных соотношений между ними.

#### Микропроцессоры — основа оптимального управления

Широкое применение микропроцессорной (МП) техники в различных устройствах затронуло и источники питания. В работе [10] перечислены основные функции системы управления транзисторных преобразователей, которые с успехом могут быть выполнены МП-системой. В статье авторов [11] описан ВВИП-30-300 с импульсным выходом с максимальной мощностью 9 кВт (10–30 кВ/300 мА max). Питание непосредственно инвертора осуществлено от управляемого источника типа GEN300-5 (300В/5А) фирмы Nemic-Lambda (подразделение Lambda Group) [12].

Оптимальным решением управления ВВИП РТ, позволяющим «вписать» ВВИП в систему АСУ технологическим оборудованием, явилось включение в его состав двух микропроцессоров типа PIC16F877 фирмы Microchip [13]. Один МП встроено в контур управления СВН, другой — в схему управления САТ. МП в контуре управления напряжением выполняет функцию ведущего. Через него осуществляется связь с внешним устройством управления по интерфейсу RS232. Второй порт RS232 этого МП предназначается для управления источником GEN300-5 в соответствии с уставками напряжения, которые поступают через первый порт. Порт SPI использован для связи с МП контура тока. Возбуждение (модуляция) ВВИП подается от внешнего источника на МП контура управления напряжением, который запускает СК через устройство управления УУСК. Синхронно с запуском оба МП с помощью встроенных АЦП выполняют цифровое измерение амплитуды импульсов выходного напряжения и тока. МП в контуре тока выполняет как функцию регулировки (установки) тока РТ, так и функцию стабилизации заданного тока при изменении выходного напряжения источника. Схемы контроллеров для контура тока и напряжения различаются мало. Параметры МП типа PIC16F877: частота процессора 20 МГц; флэш-ПЗУ 14 кбайт; ОЗУ 368 байт; EEPROM 256 байт. Последняя очень удобна для хранения параметров настройки.

В статье авторов [14] описаны основные проблемы и особенности проектирования современных преобразовательных ИВЭ большой мощности. Приведена обобщенная структура мощного преобразовательного ИВЭ (AC/DC-преобразователя) с МП-управлением. Алгоритм управления и встраивание выбранного микроконтроллера (С8051F120) проиллюстрированы на примере источника мощностью 1200 Вт (27 В/45 А).

Рассмотрим основные функции, выполняемые микроконтроллером в современных преобразовательных источниках высокого напряжения:

- Устойчивая стабилизация выходного напряжения и тока в заданных пределах изменения входного сетевого напряжения частотой 50 Гц.
- Генерация повышенной частоты преобразования —  $f_{пр} = 15-50$  кГц.
- Формирование закона (метода) управления силовыми ключами: резонансный, ШИМ или ЧИМ.
- Плавное включение/выключение источника как в штатных, так и в нештатных режимах работы; ограничение скорости изменения высокого напряжения.
- Организация выполнения всего комплекса защитных мер при возникновении различных аварийных ситуаций как вне, так и внутри самого источника:
  - защита от значительных токовых перегрузок на выходе источника, а также ККМ (если он имеется в составе источника);
  - защита от КЗ на выходе источника; ввиду большой мощности источника защита

осуществляется с устойчивым запирающим силовых ключей и отключением источника от питающей сети входным устройством включения (пускателем);

- защита потребителя от перенапряжений на выходе источника, которые могут возникнуть при сбоях в работе источника или при его повреждении;
- тепловая защита от перегрева силовых ключей (транзисторов) и ВВ-блока;
- защита от: обрыва цепи накала ЭВП (РТ); пропадания высокого напряжения; нарушения или обрыва высоковольтного кабеля; превышения максимально допустимой мощности на выходе; недопустимого снижения/повышения питающего напряжения.
- Возможность дистанционного управления.
- В ряде случаев — запись и индикация некоторых режимов и параметров работы. Например, иногда требуется запись состояния сети питания (стабильность напряжения, наличие скачков и провалов напряжения) в целях диагностики.

Для иллюстрации на рисунке представлена упрощенная схема мощного преобразовательного ВВИП с питанием от однофазной сети переменного тока и с МП-управлением. Такая схема при соответствующем выборе компонентов может обеспечить выходную мощность ВВИП до 3–5 кВт.

В устройстве включения (УВкл) объединены: силовой автоматический выключатель; детектор контроля напряжения сети; элементы ограничения пускового тока; а также сетевой фильтр помех. В схеме использован активный ККМ с выходным напряжением 350–400 В, который может работать на частотах 100–200 кГц. ККМ обеспечивает практически синусоидальную форму потребляемого из сети тока. Основные элементы ККМ: силовой ключ VT1 — для определенности выбран на MOSFET ( $U_{DSS} \geq 600$  В) со встроенным антипараллельным диодом; быстросветящийся бустерный диод ( $U_{RRM} \geq 600$  В), например SiC-диод Шоттки. Также имеются накопительный ВЧ-дрессель L1 и выходной буферный конденсатор C1 ( $U_C \geq 450$  В, малый импеданс  $z_C$  на высоких частотах). Регулируемый инвертор (Инв) мостового типа выполнен на транзисторах VT2–VT5 (также MOSFET с  $U_{DSS} \geq 600$  В), хотя в настоящее время для ВВИП чаще применяются IGBT. Применение IGBT облегчается сравнительно невысокой частотой коммутации ключей (не более 50 кГц), обусловленной ограниченными частотными свойствами высоковольтных компонентов (трансформаторов, диодов, конденсаторов). Конденсатор C2 используется для исключения подмагничивания трансформатора, что характерно для мостовой схемы инвертора. Высоковольтный трансформатор TV3 (на ферритовом сердечнике) вместе с ВВ-выпрямителем/умножителем (ВВУ) по двухтактной (симметричной) схеме на диодах VD2–VD8 и конденсаторах C3–C6 (изображен условно) образуют силовую часть ВВ-

блока. Делитель высокого напряжения (ДВН) выполнен на резисторах высоковольтного  $R_{вв}$  ( $R_{в1}-R_{вn}$ ) и низковольтного плеча  $R_{нв}$ , зашунтированного варистором  $R_{у1}$  для защиты от перенапряжений. Датчик выходного тока (резистор  $R_i$ ) также зашунтирован варистором  $R_{у2}$ . Токоограничительные резисторы  $R_{п1}$  включены последовательно в выходную высокопотенциальную цепь и служат для защиты от кратковременных (импульсных) КЗ выхода. Терморезистор  $R_t$  предназначен для формирования сигнала выключения блока при его перегреве.

Управление источником высокого напряжения осуществляется микроконтроллером С8051F120. Его параметры: частота процессора 100 МГц, флэш-ПЗУ 64 кбайт, энергонезависимая память ППЗУ (флэш) — 4 кбайт. Высокая собственная частота МП-контроллера (100 МГц) позволяет на одном контроллере организовать управление ККМ и регулируемым Инв. При этом напряжения и токи каждого из этих устройств измеряются с помощью многоканального АЦП (12 бит) с последовательным опросом каналов. Входные каналы аналогового порта AIN0.0–AIN0.7 соединены с датчиками напряжения/тока ККМ и Инв через устройства гальванической развязки (УГР). УГР могут быть выполнены на основе высокоточных аналоговых оптронов HCNR200/201 фирмы Avago Technologies [14]. УГР ВВ-блока (УГР ВВБ) дополнительно должно иметь операционные усилители для усиления сигнала ОС по высокому напряжению. В МП производится сравнение текущих значений напряжения и тока с уставками, вводимыми либо от панели управления, либо через порт P0.0/P0.1 (UART) и типовой конвертер RS232 (например, MAX232) или RS485 (MAX483). На основании этого программа микроконтроллера вырабатывает (порт P0.2, P0.3) ШИМ-сигналы переменной скважности, которая определяет величину выходного воздействия, влияющую на регулируемый параметр. ШИМ-сигнал с рабочей частотой в диапазоне 15–50 кГц поступает на силовые транзисторы ККМ и Инв через согласующие устройства СУ1 и СУ2 соответственно. Для обеспечения устойчивости работы цифрового стабилизатора дискретность (разрешение) входного АЦП должна быть не менее чем в два-четыре раза выше, чем ШИМ. Так, например, если разрешение ШИМ-регулятора 8 бит, то у АЦП оно должно быть не менее 10 бит. Частота преобразования АЦП и частота регулирования ШИМ подбираются программно, поскольку зависят от постоянных времени выходных цепей.

Через порты CP0 и CP1 в контроллер вводятся сигналы датчиков температуры нагрева (перегрева). Цифровые порты P3.0–P3.2 принимают через устройства гальванической развязки УГР «аварийные» сигналы «Защита», в ответ на которые происходит отключение ВВИП от сети переменного тока посредством УВкл. Микроконтроллер предусматривает возможность отладки и перезаписи программы (режим «программирование в схеме», ICP) через специальный порт JTAG.

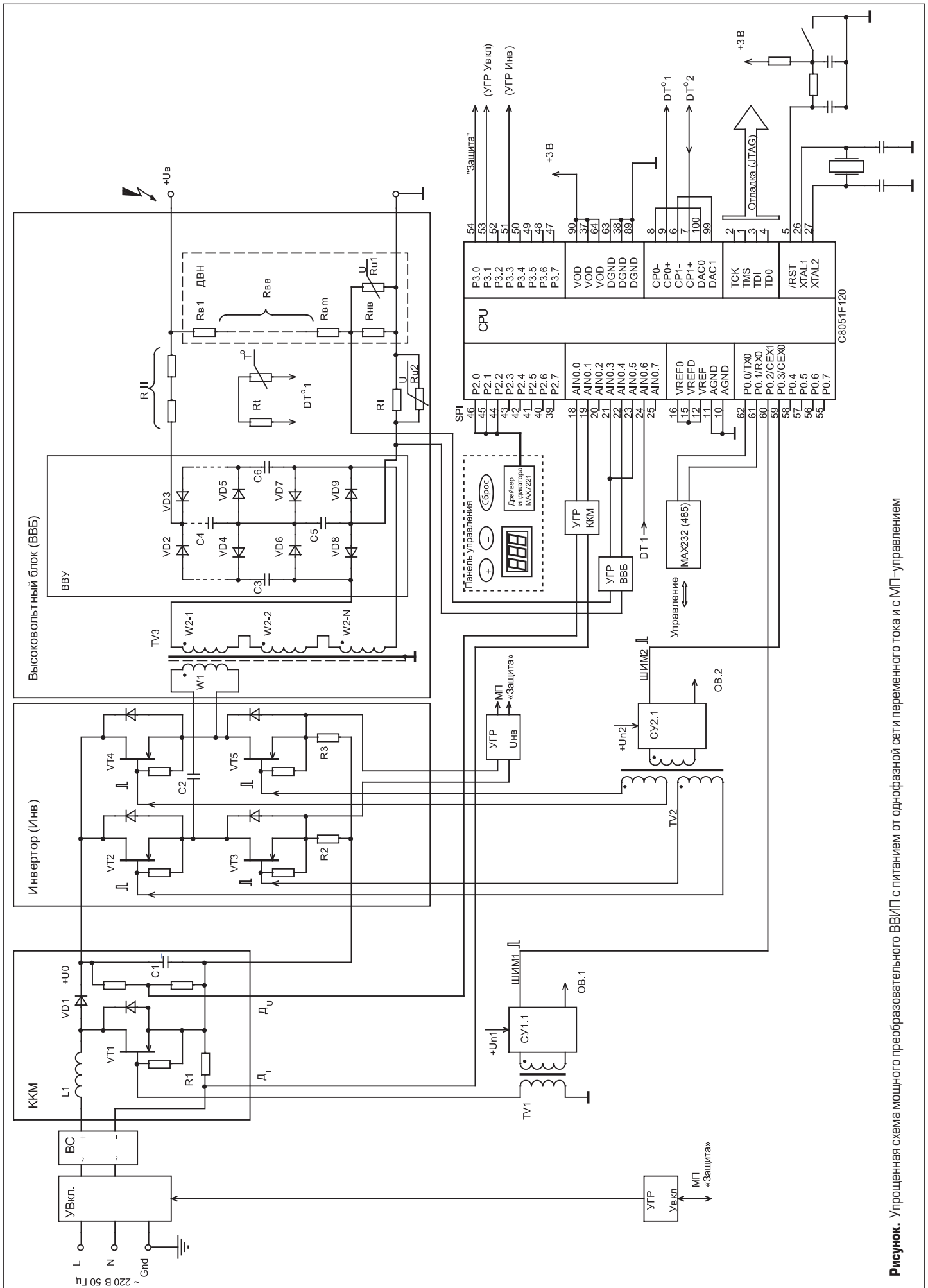


Рисунок. Упрощенная схема мощного преобразователя ВВБ/П с питанием от однофазной сети переменного тока и с МП-управлением



### Электромагнитная совместимость ВВИП

Источники высокого напряжения подвержены действию электромагнитных помех (ЭМП) кондуктивного характера со стороны сети переменного тока. Воздействие ЭМП проявляется в виде импульсных перенапряжений и гармонических помех, хотя по происхождению реально все помехи имеют форму импульсов разной формы и длительности. Импульсные перенапряжения могут иметь амплитуду от 0,5–1 до 2–4 кВ и длительность от десятков наносекунд до сотен микросекунд. Импульсы проходят по электросети, в большинстве случаев, относительно шины заземления (несимметричные помехи). Гармонические помехи (симметричные по проводам сети и несимметричные) имеют амплитуды 30–50 В, реже 100–200 В, и частоту десятки килогерц–десятки/сотни мегагерц [15].

С другой стороны, сами мощные ВВИП с импульсным регулированием являются генераторами ЭМП большой интенсивности в широком диапазоне частот. Такие помехи проявляются в виде кондуктивных помех на сетевом входе источника, внутри него и на его выходе. Помехи могут быть одиночными (при пуске или выключении) и регулярными (в рабочем режиме). При пуске мощных ВВИП, в составе сетевых выпрямителей которых имеются конденсаторы большой емкости, возникают пусковые токи большой величины (экстратоки), которые могут в десятки раз превосходить установившиеся значения токов в рабочем режиме. Вследствие этого в сети (на ее эквивалентном импедансе) образуются значительные импульсные перенапряжения. Регулярные низкочастотные (НЧ) помехи образуются при работе сетевого выпрямителя на емкостной фильтр. При этом возрастает реактивная составляющая потребляемого из сети тока и, соответственно, появляются высшие гармоники (обычно нечетные — 3, 5, 7, ..., 15). То есть происходит снижение коэффициента мощности (КМ/PF), называемого также фактором cosφ.

В Европе с 1992 г. для источников питания с импульсным регулированием любого вида введено требование коррекции КМ. В частности, в соответствии с рекомендациями МЭК введены стандарты EN61000-3-2-95; IEC 6100-3-2. Они включают в себя требования обязательной коррекции КМ систем электропитания, в том числе для источников с мощностью более 80 Вт [16]. Такое положение привело к появлению аналогичных стандартов в России, в частности ГОСТа Р 51317.3-2-99, в котором определены нормы эмиссии гармонических токов для оборудования с потреблением тока не более 16 А в одной фазе [17].

Меры, применяемые в ВВИП для ограничения пусковых токов и коррекции КМ, аналогичны мероприятиям при проектировании мощных низковольтных ИВЭ. В том числе используются мощные терморезисторы с отрицательным ТКС (NTC), мощные постоянные резисторы с их последующим автоматическим выключением силовым электромеханическим реле (или тиристором) и специальные дрос-

Таблица 1. Основные характеристики варисторов фирмы Epcos

	SIOV-B722xxS	SIOV-LS40K275OP (B72240L0271K100)
Максимальное постоянное напряжение $U_{max}$ , В ( $\pm 10\%$ )	18–750	430
Максимальное переменное напряжение $U_{max}$ , Вэф	11–460	275
Максимальный импульсный ток $I_{max}$ , Аимп (длительность импульса $t_i = 8/20$ мкс)	100–40 000	40 000
Максимальная энергия в импульсе $E_{max}$ , Дж ( $t_i$ до 10 мс)	0,3–195	550

сели. Кроме того, применяются схемы пуска при прохождении напряжения сети через ноль. При выключении источников высокого напряжения (тем более внезапном) из-за накопленной энергии силовых реактивных компонентов (конденсаторов, индуктивностей) также возникают перенапряжения и на входе, и на выходе. Для их уменьшения устройство управления должно производить плавное выключение ВВИП, например уменьшением длительности импульсов (ШИМ) или уменьшением частоты импульсов (ЧИМ).

В ВВИП с мощностью примерно до 3–5 кВт с питанием от однофазной сети переменного тока применяются активные ККМ, которые могут обеспечить КМ порядка 0,97–0,99, то есть практически синусоидальную форму потребляемого из сети тока. Схема ВВИП с указанной структурой представлена на рисунке. При большей мощности и снижении требований к величине КМ используется пассивная коррекция с помощью НЧ-дросселя, включаемого до сетевого выпрямителя (после сетевого фильтра помех). Такие дроссели выпускают, например, фирмы Epcos [18] и Elhand [19]. В источниках высокого напряжения с питанием от трехфазной сети чаще всего используют дроссели — трехобмоточные (без зазора) до сетевого выпрямителя или однообмоточные (с зазором) на выходе сетевого выпрямителя.

Регулярные гармонические ВЧ-помехи возникают при переключении силовых ключей. Так, в структуре одноступенчатого ВВИП с регулированием на стороне сетевого переменного напряжения [1] основным источником ВЧ-помех являются симисторы или тиристоры. Для ВВИП с импульсным выходом [3], дополнительно к указанному, помехи создают высоковольтные коммутаторы (разрядники, импульсные водородные тиратроны, высоковольтные IGBT, импульсные рентгеновские трубки) и высоковольтные импульсные трансформаторы. В структуре двухступенчатого преобразовательного ВВИП, то есть с импульсным предрегулятором-стабилизатором и регулируемым инвертором с повышенной частотой преобразования, основные ВЧ-помехи создают силовые ключи обеих ступеней. Кроме того, свой вклад в спектр помех вносят высоковольтный трансформатор и диоды (столбы) выпрямителей-умножителей.

#### Устройства и компоненты для защиты от помех

Для защиты от кондуктивных помех на сетевом входе, как со стороны сети, так и от помех, генерируемых мощными ВВИП, используются:

- разрядники и варисторы — от воздействия импульсных перенапряжений;
- сетевые фильтры — для ослабления широкого спектра гармонических ВЧ-помех (обычно в диапазоне 0,15–10/30 МГц).

В таблице 1 приведены основные характеристики некоторых типов зарубежных варисторов на примере продукции фирмы Epcos [20].

Сетевые однофазные фильтры помех схемотехнически реализуются чаще всего в виде следующих основных конфигураций [21]:

- Однозвенный П-образный фильтр типа  $C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$ .

В таком фильтре L — режекторный дроссель (двухобмоточный трансформатор), обмотки которого включены последовательно в провода сети;  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$  — конденсаторы для подавления дифференциальной помехи, включенные между фазными проводами (прямым и обратным);  $C_y$  — конденсаторы между проводами и корпусом фильтра («землей») для подавления несимметричной помехи.

- Двухзвенный П-образный фильтр типа  $C_{x1}-L_1-C_{x2}-2C_y$  (1)  $-L_2-C_{x3}$ , где  $L_1$ ,  $L_2$  — режекторные дроссели первого и второго звеньев фильтра;  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ,  $C_{x3}$  и  $C_y$  — аналогично предыдущему.

Однозвенный П-образный фильтр типа  $C_{x1}-L-C_{x2}-2C_y$  применяется при мощности до 300–400 Вт, поскольку имеет минимальное количество компонентов и вместе с тем обладает достаточным коэффициентом подавления помех  $K_d$ . Он позволяет обеспечить  $K_d$  порядка 30–80 дБ в диапазоне частот 0,15–10(30) МГц. Режекторный дроссель L выбирается с максимально возможным значением индуктивности — 5–22 мГн. Необходимые соотношения по определению величины емкостей конденсаторов  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ,  $C_y$  рассматриваемых типов фильтра приведены в работе [21]. В частности, для импульсных источников питания с мощностью 300–3000 Вт значения емкости конденсаторов могут составлять:

- $C_{x1} = 0,68-4,7$  (10) мкФ — на напряжение ~220 Вэф (постоянное 630 В<sub>н</sub>/1000 В<sub>н</sub>);
- $C_{x2} = 0,47-2,2$  (4,7) мкФ — на напряжение ~220 Вэф (постоянное 630 В<sub>н</sub>/1000 В<sub>н</sub>);
- $C_y = 2200-10\ 000$  пФ — на рабочее напряжение не менее 3000 В.

Конденсаторы помехоподавляющих фильтров должны иметь малый импеданс  $Z_C$  в широком диапазоне частот.

В качестве трехфазных сетевых фильтров чаще всего применяются однозвенные П-образные фильтры. В них обмотки многообмоточного дросселя включены как в фазные провода (А, В, С), так и в нейтраль (N). Конденсаторы  $C_{xi}$  включены между фазами и нейтралью на входе и выходе фильтра. Конденсаторы  $C_{yi}$  включены между корпусом

Таблица 2. Основные технические характеристики сетевых фильтров фирмы Schaffner

	Однофазные фильтры FN2070	Трехфазные фильтры (с нейтралью)
Коэффициент подавления помех ( $K_n$ ), дБ/МГц	30/0,15 80-90/1-3 50/30	45/0,15 50/1 40/10 30/30
Допускаемые токи ( $I_{max}$ ), А	1-36	8-36-160
Токи утечки на корпус ( $I_{r1}$ ), mA	не более 0,87	3,4-6,8

(«землей») и, соответственно, входом и выходом нейтрали. Если по массо-габаритным критериям не удастся увеличить параметры компонентов фильтра для достижения необходимого коэффициента подавления, то целесообразно применить помехоподавляющие компоненты ( $L$ ,  $C_x$ ,  $C_y$ ) на выходе сетевого выпрямителя. В этом случае количество и суммарные габариты компонентов минимизированы.

Для иллюстрации основные технические данные сетевых фильтров помех серий FNxxx фирмы Schaffner [22] приведены в таблице 2.

#### Особые виды помех в источниках высокого напряжения

Нагрузки ВВИП в виде ЭВП имеют, кроме рассмотренных ранее, и другие особенности. Так, в РТ между электродами могут возникать микрозаряды (сила тока от нескольких миллиампер до десятков и сотен миллиампер продолжительностью 0,1-100 мс) ввиду несовершенства вакуумной изоляции. Эти явления в литературе описываются жаргонным термином «лампа или трубка «газит» и связаны с газовыделением в них при прогреве. Такие заряды не вызывают необратимых пробоев с повреждениями компонентов и не нарушают нормальное функционирование ВВИП. Но они создают помехи значительной интенсивности, достаточные для возникновения сбоев электронной аппаратуры [23]. Наиболее опасными являются искровые пробои, амплитуда токов которых может достигать многих килоампер при большой крутизне нарастания, определяемой временем перекрытия разрядного промежутка 10-100 нс/см. Амплитуда тока пробоя растет с увеличением ударной емкости  $C^*$ . Другая важная особенность искрового пробоя — понижение напряжения его возникновения при увеличении  $C^*$ . В рентгеновских аппаратах, например, происходит значительное снижение пробивного напряжения при увеличении длины ВВ-кабеля. Так, при использовании ВВ-кабеля длиной 15 м пробивное напряжение трубки БХВ-8 (номинальное напряжение  $U_{RT\text{ ном}} = 70$  кВ) снижалось не менее чем на 15 кВ. Аналогичная ситуация была с трубкой РХВ-15 ( $U_{RT\text{ ном}} = 60$  кВ). При эксплуатации ее в многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-2 с кабелем 9 м при напряжениях 15-25 кВ происходили пробои, носившие характер мощных микрозарядов, со сбоями и даже повреждениями ЭВМ. В этой связи, во-первых, приходилось критически относиться к выбору типа ВВ-кабеля и его длины. Во-вторых, опытным путем устанавливались оптимальные требова-

ния к конструктивному исполнению кожуха РТ и выбору материала его электроизоляции, что уменьшало влияние разрядного промежутка трубки. В-третьих, были приняты меры по уменьшению величины разрядного тока РТ при его протекании по контуру ВВ-жилы — обратные провода заземления, что создавало сильные ЭМП. В частности, авторы статьи [23] встраивали в наконечники ВВ-кабелей два последовательно включенных объемных токоограничительных резистора типа ТВО (2 Вт/27 кОм), что позволяло как ограничить разрядный ток, так и исключить возникновение искровых пробоев. Другой способ состоял в установке защитных дросселей, но уже в цепи накала РТ в ее защитном кожухе. Так, использование дросселя индуктивностью 200 мкГн (сердечник М400НН С8×40, обмотка 80 витков провода ПЭТВ-2 Ø1,25 мм) привело к снижению уровня помех и устранению сбоев в ЭВМ.

#### Обеспечение надежности ВВИП

Надежность источников высокого напряжения в несколько раз ниже, чем низковольтных источников питания такой же мощности. Это связано с наличием высоковольтного блока, в котором компоненты имеют меньшую надежность, а конструкция и технология изготовления более сложные.

#### Отказы в мощных ВВИП

Внезапные (катастрофические) отказы силовых устройств, низковольтных ИВЭ в частности, описаны в работе [24]. В общем случае такие отказы характерны и для высоковольтных источников. Их можно разбить на три группы:

- отказы узлов и компонентов на стороне первичного электропитания (сети переменного тока);
- отказы узлов и компонентов на стороне нагрузки (вторичной стороне);
- отказы устройств в системах управления и защиты.

В первых двух группах наиболее часто ходят из строя силовые ключи и их модули: (опто)тиристоры и симисторы, транзисторы (биполярные, IGBT, MOSFET), выпрямительные диоды и мосты. Отказы ключей носят характер потенциальных и/или токовых пробоев вследствие сверхнормативных превышений максимальнодопустимых значений, в том числе при перегрузке по мощности в динамических и нештатных режимах. Реже происходят отказы у коммутирующих компонентов (выключателей, пускателей, силовых реле, автоматов включения и защиты), у элек-

тролитических конденсаторов сглаживающих фильтров, а также у силовых трансформаторов. В третьей группе наиболее вероятны отказы драйверов силовых ключей, вызванные выходом из строя силовых ключей.

Высоковольтные трансформаторы и конденсаторы менее надежны, чем их низковольтные аналоги. Определенное количество отказов происходит из-за несовершенства изоляции высокопотенциальных компонентов и узлов относительно друг друга и корпуса («земли»). Параметры электроизоляции снижаются при повышенной температуре и влажности, с течением времени (старение), а в ряде случаев — при повышенной частоте работы. Уменьшению количества постепенных отказов (ухудшение стабильности и увеличение уровня пульсаций) у ВВИП придется большее значение, поскольку они используются для питания мощных ЭВП (клинтронов, рентгеновских трубок), от стабильности которых зависят параметры приборов и систем (радары, радиостанции, рентгеновские аппараты, томографы и т. д.).

#### Методы повышения надежности ВВИП при проектировании

Как и для низковольтных ИВЭ, в общем контексте обеспечения надежности при проектировании ВВИП необходимо осуществить [25]:

- Выбор рациональной структуры предрегулятора или ККМ (активный или пассивный) при двухступенчатой структуре.
- Выбор схемы силовой части инвертора в зависимости от мощности проектируемого ВВИП.
- Выбор быстродействующих силовых ключей (транзисторов, диодов), а также других компонентов (магнитных элементов, конденсаторов), способных обеспечить приемлемый КПД и эффективную работу при повышенных частотах преобразования. Для ВВИП с импульсным выходом дополнительно важен выбор высоковольтных коммутаторов (управляемые разрядники, тиратроны, импульсные трансформаторы и РТ).
- Выбор схемы ограничения пусковых токов соответственно мощности импульсного ИВЭ, его особенностям и типу питающей сети переменного тока.
- Выбор рационального устройства управления силовыми ключами (резонансный, ЧИМ-/ШИМ-контроллеры, микропроцессоры, управляющие драйверы) соответственно выбранной структуре предрегулятора (ККМ), инвертора, а также частоте преобразования.
- Определение оптимального алгоритма функционирования и схемы комплексной защиты ВВИП от различных аварийных ситуаций.
- Выполнение мероприятий по обеспечению ЭМС на сетевом входе и высоковольтном выходе.
- Выбор разгруженных режимов работы компонентов, особенно силовых и высоковольтных, то есть оптимальных коэф-

фициентов электрической нагрузки  $K_{нп}$ . В статье [25] приведены определение  $K_{нп}$ , рекомендуемые значения  $K_{нп}$  для всех типов силовых полупроводниковых приборов.

- Особые мероприятия при конструировании собственно ВВ-блоков и модулей.
- Особые мероприятия при производстве источников высокого напряжения.

Рассмотрим подробнее последние две группы мероприятий.

### **Особые мероприятия при проектировании ВВ-блоков и модулей**

#### **Высоковольтные трансформаторы.**

В ВВ-трансформаторах, в отличие от низковольтных, большее внимание должно уделяться качественной изоляции по поверхности (исключение поверхностных пробоев, «перекрытий»), чем по объему (толщине и качеству изоляционного слоя). С этой целью, кроме особого вида намотки (трапецеидальная), между высоковольтной и низковольтной обмотками, а также элементами сердечника трансформатора необходимо соблюдать рекомендуемые критические расстояния и устанавливать защитные изоляционные экраны. Типы применяемой изоляции трансформаторов (масляная/маслобарьерная, газовая и твердотельная) подробно описаны в [2].

#### **Высоковольтные выпрямители/умножители**

В мощных ВВ-выпрямителях при напряжениях выше 8–10 кВ часто применяется последовательно-параллельное включение высоковольтных диодов.

При определении количества последовательно соединенных диодов необходимо соблюдение следующих условий [2]:

- величина  $U_{RRM}$  должна в 1,7–2 раза превышать рабочее напряжение  $U_{VDmax}$ ;
- не использовать диоды с аномально большими или малыми значениями  $I_R$ .

При параллельном соединении диодов необходимо, чтобы:

- величина тока  $I_{F(AV)}$  каждого из диодов должна в 1,7–2 раза превышать  $I_{VDmax}$ ;
- не использовать диоды с аномально большими или малыми значениями  $U_{FM}$ .

Такие меры позволяют обойтись без использования шунтирующих ВВ-резисторов при последовательном включении (до напряжений 25–30 кВ) и без последовательных симметрирующих резисторов при параллельном включении диодов. При выходных напряжениях более 30 кВ диоды необходимо шунтировать конденсаторами во избежание возникновения опасных перенапряжений при переходных процессах.

#### **Защитные компоненты**

На высоковольтном выходе в большинстве случаев необходимо устанавливать токоограничительные резисторы для ограничения импульсного разрядного тока при пробое высоковольтного выхода источника или его ином коротком замыкании. В отече-

ственных высоковольтных блоках с успехом использовались и продолжают использоваться объемные резисторы типа ТВО различной мощности (1–60 Вт). Резисторы устойчивы к импульсным перегрузкам, в первую очередь к импульсным перенапряжениям от 400 В до 25 кВ (по мощности).

Применение неуправляемых разрядников или варисторов для защиты цепей обратной связи, измерения напряжения или тока является типовым приемом. В работе [2] приведены сведения об основных параметрах двухэлектродных миниатюрных разрядников серии EM фирмы Ersos. Сведения о варисторах той же фирмы были приведены в таблице 1. При сравнительно небольшой мощности и напряжении до 10–15 кВ для защиты от перенапряжений на высоковольтном выходе можно использовать последовательное соединение разрядников. При большой мощности ВВИП и значительной величине высокого напряжения (более 10–15 кВ) прямое включение разрядников параллельно выходу обычно не применяется. Если же выходная низковольтная шина изолирована от корпуса (например, на передвижных объектах), то разрядник может включаться относительно корпуса объекта.

#### **Особенности конструктивной реализации ВВ-блоков и модулей**

Важное условие надежной работы высоковольтной техники — исключить в ВВ-трансформаторах, и ВВ-выпрямителях/умножителях в частности, «острые», «незаглаженные» контуры деталей, компонентов и модулей, находящихся под высоким потенциалом. Для этого на печатные проводники должны дополнительно напаиваться проводники круглого сечения и тщательно «заглаживаться» края стыков. На тонкие выводы ВВ-диодов и конденсаторов должны быть надеты изоляционные трубки. Так, для изоляции ВВ-блоков и модулей сравнительно небольшой мощности может применяться твердотельная изоляция — викинт или капролон. Для более мощных блоков и модулей отечественного производства используются эпоксидные компаунды, газовая или масляная (маслобарьерная) изоляция. При любом типе изоляции ВВ-блок или модуль должен быть помещен в металлический корпус, обеспечивающий механическую прочность конструкции и локализацию электромагнитных помех излучения внутри объема. При этом корпус обязательно заземляется. При использовании масляной (маслобарьерной) изоляции корпус одновременно является и емкостью, которая наполняется трансформаторным маслом. В этом случае между верхней крышкой корпуса и уровнем масла должен быть воздушный зазор для обеспечения возможности его расширения при нагреве. В мощных ВВ-блоках необходимо иметь невозвратный воздушный клапан для удаления возможных вредных газов, выделяющихся из масла при эксплуатации. Необходимо обеспечить эффективное охлаждение мощных ВВ-блоков посредством мощных вентиляторов боль-

шой производительности или водой, проходящей через теплообменник-«змеевик». Обязательным является требование контроля температуры нагрева масла. Простейший способ контроля — применение биметаллического термодатчика (термореле), который срабатывает при превышении температуры, например в пределах +(55–60) °С, и отключает, в частности, низковольтную цепь управления/питания ВВ-блока. Также можно использовать термометры или термометры сопротивления, которые являются более точным средством измерения температуры, но требуют дополнительной измерительной схемы. Внутри блока высоковольтные компоненты и проводники должны не только быть удалены на рекомендуемые расстояния от низковольтных компонентов и корпуса, но и дополнительно изолированы посредством экранов, например маслобарьерных.

В ряде исполнений в последнее время практикуется «бескабельное» конструктивное объединение высоковольтного блока вместе с нагрузкой, например РТ, в так называемом моноблоке. Так, моноблоки с объединением ВВ-блока с РТ имеются в номенклатуре продукции фирмы Spellman [26], в некоторых типах рентгеновских аппаратов «НПП «Буревестник» [27].

#### **Мероприятия при производстве источников высокого напряжения**

В статье [28] приведен перечень необходимых мероприятий, способствующих повышению надежности при производстве низковольтных ИВЭ, в частности:

- входной контроль компонентов, покупных узлов и материалов;
- пооперационный контроль компонентов и узлов собственного производства;
- выходной контроль компонентов и узлов собственного производства;
- оптимизация настройки (регулировки) источников питания в целом;
- технологическая тренировка изделий.

Все они используются и при производстве ВВИП, но с некоторыми дополнительными особенностями.

#### **Входной контроль компонентов, покупных узлов и материалов**

Объем и глубина входного контроля зависят от назначения источников: коммерческого (обычно выборка 10–20%), промышленного (30–40%) или военного (100%). Входному контролю в первую очередь должны подвергаться компоненты с повышенной интенсивностью отказов; высоковольтные компоненты; вновь применяемые компоненты, для которых нет достоверных сведений о качестве и надежности.

Перечень минимально контролируемых параметров силовых полупроводниковых приборов приведен в статье [28]. 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 компонентов, тем более в ненадлежащих условиях, возможны как повреждения компонентов и материалов, так и ухудшение их параметров. Авторам неоднократно приходилось сталкиваться с такими явлениями [29]. Так, в «НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург) при изготовлении мощных ВВ-трансформаторов импульсных ВВИП использовалась кабельная бумага для электроизоляции слоев высоковольтной обмотки. В дальнейшем готовый трансформатор помещался в бак с трансформаторным маслом. При очередном (конец сентября 1998 г.) выпуске одной из партий ВВ-блоков при испытаниях на электропрочность было зафиксировано снижение испытательного напряжения в два раза (25 вместо 50 кВ). Анализ показал, что кабельная бумага хранилась не в герметичной упаковке, а в неотапливаемом помещении с повышенной влажностью (в тот период времени). 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.

Материалы, подвергающиеся входному контролю: обмоточные провода (на соответствие сертификату и визуально); стеклотекстолит для ВВ-модулей (сертификат, визуально, иногда контроль изоляции). Трансформаторное масло обычно проверяется по вязкости и по параметрам электропроводности (в стандартном сосуде).

#### **Пооперационный контроль компонентов и узлов собственного производства**

Отметим важность пооперационного контроля ВВ-трансформаторов, при котором осуществляются проверки сердечников, обмоточных проводов, намотанных катушек (на отсутствие короткозамкнутых витков). Трансформаторное масло необходимо очищать от влаги и примесей при помощи специальных установок.

#### **Выходной контроль компонентов и узлов собственного производства**

Выходной контроль параметров должны проходить все компоненты и узлы собственного производства. Чаще всего производится контроль параметров моточных изделий (высокочастотных дросселей и трансформаторов), сетевых фильтров электромагнитных помех, микроплат управления и защиты, ВВ-трансформаторов, высоковольтных выпрямителей/умножителей.

В дополнение к обычно контролируемым параметрам (омические сопротивления обмоток, индуктивность намагничивания  $L_{\mu 1}$  первичной обмотки, напряжения холостого хода на обмотках трансформатора), для ВВ-трансформаторов обязателен контроль сопротивления и электропрочности изоляции (между обмотками и между высоковольтной обмоткой и сердечником).

Высоковольтные выпрямители/умножители проходят 100%-ную проверку в комплекте

со своим ВВ-трансформатором от специального генератора или в составе ВВИП, временно выбранного в качестве технологического оборудования. Как правило, при проверке добиваются превышения выходного напряжения на 15% над рабочим.

#### **Оптимизация комплексной настройки источников высокого напряжения**

При комплексной (финишной) настройке ИВН необходимо придерживаться оптимального алгоритма и использовать специальные настроечные стенды, которые позволяют обеспечить «электробезопасную» правильную регулировку и избежать использования необоснованных процедур, приводящих к отказам. В общем случае настроечный стенд должен иметь в своем составе: регулятор переменного напряжения соответствующей мощности; защитное устройство от токовых перегрузок и КЗ с выключением по сети. Кроме того, необходим набор мощных объемных резисторов (типа ТВО), позволяющих осуществлять нагрузку ВВИП, снабженных вентиляторным блоком для обдува. Также необходимы киловольтметр и/или высоковольтный измерительный делитель напряжения в комплекте с цифровым вольтметром и осциллографом. Обязательно обеспечение надежного заземления.

Производственные помещения должны быть оборудованы установками климат-контроля, обеспечивающими в любое время года нормальные условия: постоянную температуру  $+20(\pm 5)^\circ\text{C}$  и низкую влажность (60–80%). Также важны мероприятия по контролю уровня вредных примесей в воздухе.

#### **Технологическая тренировка**

Общая продолжительность технологической тренировки (прогона) ВВИП обычно составляет для источников коммерческого исполнения 8 (12) ч, а для источников индустриального исполнения — минимум 12, максимум 24 ч. Прогон происходит в нормальных условиях. Во время прогона контролируется выходное напряжение и ток нагрузки, например через один-два часа после установленного времени прогрева (30 или 60 мин.). Кроме того, ВВИП дополнительно может проходить технологическую тренировку (до 100 ч) в составе аппаратуры, выпускаемой предприятием.

#### **Особенности измерения параметров высокого напряжения**

Измерение значений высокого напряжения требует не только соблюдения необходимых мер предосторожности, но и применения специальных измерительных средств, к которым относятся:

- калиброванные прецизионные высоковольтные резисторы или наборы резисторов;
- высоковольтные прецизионные калиброванные делители напряжения, позволяющие использовать стандартные измерительные приборы высокой точности, например цифровые вольтметры или осциллографы;
- киловольтметры;
- шаровые разрядники (в основном на напряжения более 100 кВ).

#### **Калиброванные измерительные высоковольтные резисторы**

Наиболее простым способом измерения высокого напряжения постоянного тока, часто применяемым на практике (первичная настройка, контроль при эксплуатации), является использование калиброванных измерительных ВВ-резисторов. Они применяются совместно с точными измерителями тока (мультиметрами или стрелочными приборами класса 0,1 или 0,2). Поскольку сопротивление измерителя тока мало (сотни Ом), то необходимая величина последовательного резистора равна:  $R_{\text{изм}} = U_{\text{в max}} / I_{\text{изм max}}$ , где  $U_{\text{в max}}$  — максимальное значение высокого напряжения;  $I_{\text{изм max}}$  — максимальный ток приемлемого диапазона измерительного прибора (миллиамперметра или микроамперметра). Например, при  $U_{\text{в max}} = 50$  кВ и  $I_{\text{изм max}} = 0,1$  мА величина  $R_{\text{изм}} = 500$  МОм. Конечно, такой резистор с учетом напряжения 50 кВ и рассеиваемой мощности на резисторе 5 Вт на самом деле представляет собой набор резисторов, например из 10 высоковольтных ( $\geq 8$  кВ) прецизионных (допуск не хуже  $\pm 1\%$ ) мощностью 1 Вт (лучше 2 Вт).

#### **Высоковольтные прецизионные калиброванные делители напряжения**

Такие делители напряжения (ДНВ) обычно выпускаются малыми сериями, производятся по заказам или изготавливаются самим производителем ВВИП или высоковольтных испытательных установок. Значения коэффициента деления  $K_d$  у ДНВ находятся в диапазоне от 1:500 до 1:10 000. При изготовлении высокостабильных делителей для технологических целей на самом производстве ВВИП должны выбираться резисторы достаточно высокого класса точности (не хуже  $\pm 1\%$ ), обладающие малыми значениями ТКС ( $\alpha_{T R} \leq \pm 0,02\%/^\circ\text{C}$ ) и временной нестабильности/дрейфа (например,  $\delta R_t \leq \pm 1,5\%$  за 1000 ч работы). Кроме того, сопротивление изоляции должно быть не менее  $1000 \times R_{\text{ВВ}}$ . При этом важно, чтобы расчетные значения коэффициентов электрической нагрузки  $K_{\text{н}}$  каждого из резисторов находились в пределах (с учетом температуры): по мощности —  $K_{\text{нр}} = 0,15-0,2$ ; по напряжению —  $K_{\text{нU}} = 0,25-0,35$ . Такой резистивный набор должен быть конструктивно оформлен: снабжен подборными резисторами, заключен в металлический корпус, для исключения влияния влажности воздуха залит изоляционным компаундом или заполнен сухим инертным газом. Собранный ДНВ должен пройти технологическую приработку в течение не менее 24 ч при повышенной температуре (не менее  $0,85-0,9T_{\text{max}}^\circ$ ), а затем старение в течение не менее 100–150 ч. Периодически ДНВ должны проходить проверку на стабильность коэффициента деления  $K_d$ . По технологии делители могут производиться из дискретных резисторов (как описано выше), на основе гибриднопленочной технологии или из литого микропровода.

При больших значениях сопротивления делителя (сотни и тысячи мегаом) существенную роль играет величина индуктивности резисторов делителя и наличие паразитной емкости между резисторами делителя на корпус («землю»). Делители, разработанные без учета этого фактора, имеют неудовлетворительную переход-



ную характеристику и пригодны лишь для измерения установившихся значений выходного напряжения. Уменьшение влияния индуктивности достигается использованием специально ВВ-резисторов с уменьшенной индуктивностью. Уменьшение влияния паразитной емкости ДВН на «землю» достигается применением комбинированного емкостно-резистивного делителя напряжения. Такой делитель позволяет получить приемлемую переходную характеристику ВВИП до напряжений 100 кВ и более.

В России номенклатура серийно выпускаемых и заказных ВВ-делителей невелика. Рассмотрим ДНВ-5, ДНВ-25, разработанные НИИКИ ОЭП (г. Сосновый Бор Ленинградской области) [30]. Упомянутые ДНВ — компенсированные RC-делители с внешним заземленным экраном. Основные параметры ДНВ-5 и ДНВ-25 соответственно:

- рабочее напряжение — 5 и 25 кВ;
- коэффициент деления  $K_d$  — 1:1000 и 1:3000;
- погрешность измерения — 0,5–3%;
- входное сопротивление  $R_{вх}$  — 8 и 40 МОм;
- входная емкость  $C_{вх}$  (приблизительно) — 4 и 6 пФ;
- полоса пропускания  $\Delta f$  — 0–35 МГц;
- испытательное напряжение: постоянное — 7 и 30 кВ; импульсное — 15 и 40 кВ.

Линейка резистивно-емкостных высоковольтных делителей типа ДН-50, ДН-100, Д-100Э, ДН-200, ДН-200Э, ДН-300Э внесена в Госреестр 26544-08 [31]. Основные характеристики этих делителей:

- диапазон напряжений — 50/100/200/300 кВ;
- коэффициент деления  $K_d$  — 1:500, 1:1000, 1:2000;
- основная погрешность —  $\leq \pm 1,0\%$  ( $\leq \pm 0,5\%$  — для моделей с индексом «Э», «эталонный»);
- входная емкость — 90–430 пФ.

Делители могут использоваться совместно с цифровым вольтметром ИПН-2Э, цифровыми мультиметрами АРРА-207 и АРРА-207 USB.

В Республике Молдова институт ELIRI (г. Кишинев, бывший КНИИЭП) [32] выпускает высоковольтные делители напряжения на базе точных ВВ-резисторов с обмоткой из литого микропровода со стеклянной изоляцией. Их характеристики:

- рабочие напряжения 50/100/200/300/400/500 кВ;
- номинальное входное сопротивление соответственно 500/1000/2000/3000/4000/5000 МОм;
- выходное напряжение 10 и 100 В;
- основная погрешность — не более  $\pm 0,05\%$  (для делителей на 50 и 100 кВ),  $\pm 0,1\%$  (200 кВ) и  $\pm 0,2\%$  (300–500 кВ);
- температурная нестабильность  $K_d \pm (0,1–0,5)\%$ .

### Киловольтметры

#### Электростатические киловольтметры

Физический принцип их работы основан на перемещении подвижной части прибора под действием механических сил электрического поля. Неподвижный электрод укреплен на опорном изоляторе, подвижный электрод выполнен, например, в виде экрана с отверстием, внутри которого на растяжках расположена подвижная часть. Под влиянием электрическо-

го поля подвижный электрод поворачивается, и отсчет показаний производится с помощью светового указателя. Электростатическими киловольтметрами можно измерять напряжения от единиц до сотен киловольт. Их преимущества: высокое внутреннее сопротивление, как реактивное (емкостное), так и особенно активное; возможность измерения истинного среднеквадратического напряжения независимо от формы «диапазонность»; сравнительно невысокая точность, особенно при напряжениях выше 3 кВ. Выпускаемый много лет киловольтметр С100 имеет три диапазона (0–25 кВ, 0–50 кВ, 0–75 кВ) и предназначен для измерения высокого напряжения постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот (от 45 Гц до 0,5 МГц). Основная погрешность в рабочей части шкалы не превышает  $\pm 1,5\%$ . Заземленные приборы должны находиться на расстоянии не менее 1 м от электродов включенного прибора. Входная емкость киловольтметра на любом пределе измерения не более 18 пФ. Киловольтметры типа С502 выпускаются на напряжения 1/2/3 кВ с приведенной погрешностью не хуже  $\pm 0,5\%$  (на каждое напряжение — отдельный прибор). Киловольтметры С196, С197 позволяют измерять напряжение на пределах 7,5/15/30 кВ с приведенной погрешностью  $\pm 1\%$ . В частности, С196 предназначен для измерений постоянного и переменного тока в диапазоне напряжений 2–30 кВ в полосе частот от 20 Гц до 10 МГц (с расширением до 14 МГц), но в цепях с одним заземленным полюсом. Питание от сети переменного тока 220 В 50 Гц или от постоянного напряжения 6 В.

#### Электронные киловольтметры

Примером электронного киловольтметра может служить много лет выпускаемый в России прибор В7-40. Он состоит из ДНВ и электронного вольтметра. Коэффициент деления 1:1000 (погрешность 0,5%) и 1:2000 (0,6%). Входное сопротивление ДНВ (на постоянном токе)  $500 \pm 25$  МОм. Киловольтметр В7-40 обеспечивает измерение постоянного напряжения 1–30 кВ. Электропрочность изоляции ДНВ — 45 кВ напряжения переменного тока частотой 50 Гц.

Из сравнительно новых отечественных приборов укажем киловольтметр спектральный цифровой КВЦ-120 [31], состоящий из высоковольтного делителя, измерительного блока и соединительного кабеля. Киловольтметр позволяет измерять синусоидальное напряжение до 120 кВ, постоянное — до 200 кВ. Основная погрешность  $\pm 0,25\%$ , входное сопротивление 500 МОм  $\pm 0,1\%$ . Имеется возможность сделать до семи записей измеряемого напряжения длительностью не менее 0,75 с каждая, которые потом можно проанализировать с помощью персонального компьютера. Электропитание от сети 220 В 50 Гц или от аккумуляторов. Цифровой киловольтметр СКВ-100 разработан взамен статических киловольтметров С196 и С100.

#### Шаровые разрядники

Разряд между двумя шаровыми электродами в воздухе в слабо неоднородном элек-

трическом поле происходит при определенном напряжении с малым разбросом и малым запаздыванием. Разрядное напряжение зависит от расстояния между шарами, их диаметра, способа включения и определяется по специальным таблицам. С помощью шарового разрядника можно измерять напряжения от единиц киловольт до единиц мегавольт, но практически их применение удобно для напряжений более 100 кВ. Их преимущества: дешевизна; малые габариты и масса; отсутствие необходимости в калибровке по «исходным эталонам» — только линейка. Недостатком является погрешность  $\pm 5\%$ , а иногда и более. Это не совсем измерительные приборы, а скорее испытательное оборудование. Шаровый разрядник позволяет определять только амплитудные значения напряжений. Имеется повышенная зависимость от давления и температуры.

Авторы выражают благодарность Романовскому Юрию Александровичу за помощь в оформлении графических материалов.

### Литература

1. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 5.
2. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 2 // Силовая электроника. 2011. № 1.
3. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 3 // Силовая электроника. 2011. № 2.
4. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 4 // Силовая электроника. 2011. № 4.
5. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. М.: Радио и связь. 1985.
6. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания. // Силовая электроника. 2006. № 2.
7. Эраносян С., Ланцов В. Сверхмощные импульсные блоки питания: выбор концепции // Современная электроника. 2010. № 8.
8. Береза В. Рентгеновская трубка как объект взаимосвязанного регулирования двух параметров // Аппаратура и методы рентгеновского анализа (АМРА). 1978. № 21.
9. Бесекерский В., Попов Е. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, исправл. М: Наука. 1975.
10. Мелешин В., Овчинников Д. Применение микропроцессоров в системах управления транзисторных преобразователей напряжения. // Силовая электроника. 2005. № 4
11. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с питанием от микропроцессора. // Современная электроника. 2007. № 7; 2008. № 1.
12. [www.nemicambda.com](http://www.nemicambda.com)
13. [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

14. Владимиров Е., Ланцов В. Импульсные источники питания большой мощности с микропроцессорным управлением. // Современная электроника. 2009. № 1.
15. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2006. № 4.
16. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. Под ред. Кармашева В. С. М.: 2001.
17. ГОСТ Р 51317. 3.2-99. «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3. Нормы»
18. [www.epcos.com](http://www.epcos.com)
19. [www.elhand.com](http://www.elhand.com)
20. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.1 // Силовая электроника. 2010. № 3.
21. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2007. № 1.
22. [www.schaffner.com](http://www.schaffner.com)
23. Покрывайло А. Д., Власов К. К., Магдин Ю. А., Старчиков А. Н. Об электромагнитной совместимости высоковольтных источников питания рентгеновских аналитических аппаратов в условиях высоковольтных разрядов // Аппаратура и методы рентгеновского анализа (АМРА). 1992. № 40.
24. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. № 1.
25. 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.
26. [www.spellmanhv.com](http://www.spellmanhv.com)
27. [www.bourestnik.com](http://www.bourestnik.com), [www.bourestnik.spb.ru](http://www.bourestnik.spb.ru)
28. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 4. Импульсные источники питания // Силовая электроника. 2009. № 3.
29. Ланцов В., Эраносян С. Контрактная разработка силовых устройств: один из путей генерирования новых идей // Силовая электроника. 2007. № 2.
30. [www.niiki.ru](http://www.niiki.ru)
31. [www.electronpribor.ru](http://www.electronpribor.ru)
32. [www.eliri.com/md](http://www.eliri.com/md)