

Продолжение. Начало в №5'2010

Мощные высоковольтные источники питания

Часть 2

Настоящая часть цикла посвящена особенностям высоковольтных блоков и модулей источников высокого напряжения. Приводятся основные характеристики входящих в них высоковольтных компонентов, а также принципы и элементы технологии изготовления блоков и модулей, в том числе и параметры некоторых изоляционных материалов.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

**Евгений Владимиров,
К. Т. Н.**

envlad@list.ru

В предыдущей работе [1] были приведены сведения об областях применения мощных высоковольтных источников питания (ВВИП) и их классификация. Рассмотрены отличия ВВИП от низковольтных источников питания, в том числе необходимость повышенного внимания:

- к процессам включения /выключения (алгоритм, скорость);
- к обеспечению устойчивости работы при существенно нелинейном характере нагрузки (рентгеновские трубки (РТ), лазеры);
- к устройству защиты от различных перегрузок и штатных ситуаций (аварий);
- к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) ВВИП не только с сетью электропитания, но и с электронными устройствами в составе аппаратуры и т. д.

Был дан обзор структур построения мощных ВВИП в аспекте их развития:

- с регулированием на стороне переменного (сетевое) напряжения низкой частоты (50/60 Гц, 400/500 Гц и более) и/или с регулированием на стороне выпрямленного высокого напряжения — посредством высоковольтных линейных стабилизаторов;
- с использованием регулируемых преобразователей (инверторов) с высоковольтным выходом, работающих на повышенной частоте (десятки кГц).

Продолжая начатую тематику, рассмотрим собственно высоковольтные блоки, модули и составляющие их компоненты.

Высоковольтные блоки, модули и их компоненты

В работах [2–4] при рассмотрении структур и схем ВВИП приводятся основные характеристики и особенности входящих в них высоковольтных (ВВ) блоков и модулей, а также некоторые сведения о параметрах высоковольтных компонентов. Указанные работы опубликованы достаточно давно. Хотя они

не потеряли определенного значения и в наши дни, тем не менее в них не учтены современные достижения в этой сфере. В этой связи авторы дают как информацию обобщающего характера, так и примеры технических решений конкретных ВВ-блоков, модулей и использованных в них компонентов, в том числе зарубежного производства. Как указывалось в [1], в основном анализ проводится применительно к ВВ-блокам ВВИП с мощностью от 100 Вт до 3–5 кВт и напряжением до 60 кВ, которые наиболее широко распространены, а также на основе практического опыта авторов.

В общем случае в высоковольтный блок входят:

- высоковольтный (ВВ) трансформатор,
- высоковольтный выпрямитель или ВВ выпрямитель-умножитель (ВВУ),
- защитные компоненты (токоограничительные резисторы, разрядники, реле),
- делитель высокого напряжения (ДВН),
- высокопотенциальные трансформаторы питания цепи накала или сеток (например, для РТ).

В ВВИП с импульсным выходом дополнительно имеются высоковольтные формирующие цепи (формирующие линии, управляемые и неуправляемые разрядники и т. п.) [5–7]. Высоковольтные компоненты и модули производят многие компании, однако в России, по имеющейся у авторов информации, нет фирм, которые целенаправленно производили бы достаточно широкую номенклатуру высоковольтных модулей и компонентов. Большинство производителей в числе прочих выпускают отдельные виды высоковольтных компонентов: диоды, выпрямительные столбы, сборки, конденсаторы, резисторы и др. Кроме того, многие из них являются дистрибьюторами иностранных компаний. За рубежом положение лучше. Так, группа компаний Dean technology [8] благодаря деятельности своих дочерних компаний — HVCA (High Voltage Component Associates), СКЕ и HVPSI (High Voltage Power Solutions) — выпускает широкую номенклатуру высоковольтных компонентов. HVCA специализируется на проектировании и производ-

стве высоковольтных диодов, умножителей напряжения, выпрямителей, выпрямительных мостов. СКЕ — производитель кремниевых выпрямителей на большие напряжения и токи, металло-оксидных варисторов, селеновых супрессоров, варисторов на основе карбида кремния, дисковых высоковольтных керамических конденсаторов. Компания Spellman [9], наряду с выпуском широкой гаммы ВВИП, производит также некоторые ВВ-модули, моноблоки и принадлежности.

Высоковольтные трансформаторы

Специфика ВВ-трансформатора заключается, прежде всего, в особом выполнении вторичной высоковольтной обмотки: секционирование, трапециевидная намотка каждой секции, разделение секций изолирующими шайбами и т. д. Величина высокого напряжения на одной обмотке трансформатора для ВВИП с выходным напряжением до 50–60 кВ чаще всего выбирается в пределах 2–8 кВ. Это связано с тем, что дальнейшее повышение напряжения на обмотке приводит к усложнению конструкции трансформатора. Кроме того, значительно увеличивается паразитная емкость C_s обмотки. Для обеспечения необходимой величины высокого напряжения ВВИП используются различные методы, например, несколько обмоток трансформатора комплексируются с каскадным последовательным включением выпрямительных модулей в высоковольтном блоке [1]. При наличии одной высоковольтной обмотки применяются умножители напряжения [1]. Некоторое повышение напряжения на выходе умножителя, без увеличения числа витков высоковольтной обмотки, также возможно при использовании схем резонансных или квазирезонансных инверторов.

В отличие от низковольтных, в ВВ-трансформаторах гораздо труднее обеспечить качественную изоляцию по поверхности (исключение поверхностных пробоев, «перекрытий»), чем по объему (толщине и качеству изоляционного слоя). В самих ВВ-трансформаторах или, чаще всего, в комплекте со всем ВВ-блоком используются следующие виды изоляции: масляная (маслобарьерная), газовая и твердотельная.

Масляная изоляция

В данном случае первичная изоляция слоев и самой обмотки мощного трансформатора выполняется тонкой кабельной (конденсаторной) бумагой (толщина 0,08–0,1 мм). Вторичная (основная) изоляция производится помещением трансформатора в специальный бак с трансформаторным маслом высокой степени очистки.

Наиболее применяемые в России марки масел: ТКп (ТУ 38.101890-81), масло селективной очистки (ГОСТ 10121-76), Т-1500У (ТУ 38.401-58-107-97), ГК (ТУ 38.1011025-85), ВГ (ТУ 38.401978-98), АГК (ТУ 38.1011271-89), МВТ (ТУ 38.401927-92). У этих марок масел тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 2,2 \rightarrow 0,5$ (при $T = 90^\circ\text{C}$). Так, трансформаторное масло МВТ вырабатывают из парафинистых нефтей с применением гидрокаталитических

процессов. Оно содержит присадку ионов, удовлетворяет требованиям стандарта МЭК 296 к маслам класса IIIA, обладает уникальными низкотемпературными свойствами, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и высокой стабильностью против окисления. Рекомендовано к применению в масляных выключателях и трансформаторах арктического исполнения.

Диэлектрическая прочность трансформаторных масел определяется в основном наличием волокон и воды, поэтому механические примеси и вода в маслах должны полностью отсутствовать. Низкая температура застывания масел (-45°C и ниже) необходима для сохранения их подвижности в условиях низких температур. Для обеспечения эффективного отвода тепла трансформаторные масла должны обладать наименьшей вязкостью при температуре вспышки не ниже $+95, +125, +135$ и $+150^\circ\text{C}$ для разных марок. Наиболее важное свойство трансформаторных масел — стабильность против окисления, то есть способность масла сохранять параметры при длительной работе. В России все сорта применяемых трансформаторных масел ингибированы антиокислительной присадкой, в качестве которой используется 2,6-дигретичный бутилпаракрезол (известный также под названиями ионол, агидол-1 и др.). Международная электротехническая комиссия разработала стандарт (Публикация 296) «Спецификация на свежие нефтяные изоляционные масла для трансформаторов и выключателей». Стандарт предусматривает три класса трансформаторных масел:

- для южных районов (с температурой застывания не выше -30°C),
- для северных районов (с температурой застывания не выше -45°C),
- для арктических районов (с температурой застывания -60°C).

Буква «А» в обозначении класса указывает на то, что масло содержит ингибитор окисления, отсутствие буквы означает, что масло не ингибировано.

Трансформаторные масла работают в сравнительно «мягких» условиях. Температура их верхних слоев в трансформаторах при кратковременных перегрузках не должна превышать $+95^\circ\text{C}$. Многие мощные трансформаторы оборудованы пленочными диафрагмами или азотной защитой, изолирующими масло от кислорода (воздуха). При удалении продуктов окисления срок службы масла увеличивается во много раз. Этой цели служат адсорберы, заполненные силикагелем, подключаемые к трансформаторам при эксплуатации. Перед заполнением электроаппаратов трансформаторное масло подвергают глубокой термовакuumной обработке. Содержание механических примесей, определяемое как класс чистоты, должно быть не хуже 11-го для оборудования напряжением до 220 кВ и не хуже 9-го для оборудования напряжением выше 220 кВ. При этом показатели пробивного напряжения трансформаторных масел в зависимости от рабочего напряжения оборудования должны быть:

- до 15 кВ — 30 кВ;
- 15–35 кВ — 35 кВ;
- 60–150 кВ — 55 кВ;
- 220–500 кВ — 60 кВ;
- 750 кВ — 65 кВ.

Непосредственно после заливки трансформаторных масел в оборудование допустимые значения пробивного напряжения на 5 кВ ниже, чем у масла до заливки. Допускается ухудшение класса чистоты на единицу и увеличение содержания воздуха на 0,5 %.

Недостаток масляной (маслобарьерной) изоляции в том, что на практике во время эксплуатации ВВИП периодически приходится масло выкачивать и очищать на специальной установке (например, на центрифуге). При этом отметим, что и кабельная бумага должна быть высокого качества, то есть она не должна шелушиться, быть влагостойкой, не иметь загрязнений и проходить проверку по электроизоляционным свойствам. В работе [10] приведен пример из практики одного из петербургских предприятий, на котором работали авторы. При очередном выпуске одной из партий ВВ-блоков осенью 1998 г. при испытаниях на электропрочность было зафиксировано снижение испытательного напряжения в два раза (25 кВ вместо 50 кВ). Анализ показал, что кабельная бумага хранилась с грубым нарушением правил хранения: не в герметичной упаковке, а в неотапливаемом помещении при повышенной влажности. В результате она «насосала» влагу, что снизило параметры электропрочности трансформаторного масла. Были приняты меры по улучшению упаковки бумаги и ее хранения, а также введено обязательное просушивание бумаги перед намоткой катушек трансформаторов. В дальнейшем проблем в этом аспекте не возникало.

Газовая изоляция

В качестве газовой изоляции использовались, например, элегаз, хладон. В технологическом отношении выполнение такой изоляции еще более сложно, чем масляной. Необходимо, во-первых, обеспечить технологичность и безопасность производственных процессов. Во-вторых, гарантировать герметичность корпусов трансформаторов и ВВ-блоков, в которых газ находится под избыточным давлением в течение длительного периода эксплуатации. Поэтому этот вид изоляции не получил широкого распространения в отечественных ВВ-блоках.

Твердотельная изоляция

Твердотельная изоляция на основе заливки эпоксидными компаундами и другими материалами (например, «Виксинтом») широко применяется при конструировании ВВ-трансформаторов и вообще ВВ-блоков. Эпоксидные компаунды изготавливаются на основе эпоксидных смол, наполнителей и отвердителей. Отвержденные смолы характеризуются высокой адгезией к металлам, стеклу и другим материалам, механической прочностью, химической и водостойкостью, хорошими диэлектрическими показателями. Эпоксидные смолы способны отверждаться в обычных

условиях, а также при пониженных (до $-15\text{ }^\circ\text{C}$) или повышенных ($+60\dots+125\text{ }^\circ\text{C}$) температурах. В качестве отвердителей используются полиамины, многоосновные кислоты и их ангидриды, многоатомные фенолы, третичные амины. Отличительная особенность эпоксидных смол при отверждении — отсутствие выделения летучих веществ и малая усадка (0,1–3%). Эпоксидно-диановые литые компаунды применяются с наполнителями, улучшающими пожаробезопасность и снижающими себестоимость продукции. Герметическая или литая изоляция хорошо цементирует витки обмотки, обеспечивая высокие механическую и электрическую прочность, влагостойкость, малые термические коэффициенты расширения и теплопроводности. Слабым местом эпоксидно-диановых компаундов является плохая устойчивость к ультрафиолетовому излучению, что имеет значение только при наружном применении ВВ-блоков. Например, самозатухающий эпоксидный компаунд «ЭКС» (патент РФ № 2056452) предназначен для пропитки и заливки ВВ и НВ многослойных моточных изделий пожаробезопасного исполнения с диаметром провода до 0,025 мм. Его основные характеристики: электрическая прочность — $U^* = 30\text{ кВ/мм}$; удельное объемное электрическое сопротивление $\rho = 1 \times 10^{15}\text{ Ом}\cdot\text{см}$; $\text{tg}\delta = 0,014$ (при $f = 1\text{ МГц}$ и $T = +20\text{ }^\circ\text{C}$); интервал рабочих температур $T = -60\dots+125\text{ }^\circ\text{C}$. Время отверждения — 16 ч (при $T = +90\text{ }^\circ\text{C}$). В среднем электрическая прочность эпоксидных компаундов порядка $U^* = 25\text{--}35\text{ кВ/мм}$. Основные достоинства этих компаундов: слабая чувствительность к механическим перегрузкам, достаточно хорошо освоенные техпроцессы, что очень важно для ВВИП в продукции военного назначения.

Другой компаунд «Виксинт» — заливочный кремнийорганический, мягкий и эластичный. Он применяется для защиты моточных и других радиоэлектронных изделий. Прозрачность компаунда позволяет легко производить дефектацию и ремонт изделий. Имеется несколько марок «Виксинта». Так, «Виксинт ПК-68» (ТУ 38.103508-81) имеет следующие характеристики: $U^* \geq 15\text{ кВ/мм}$ ($T = +20\dots+25\text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность — не более 65%); $\rho = 10^{13}\text{ Ом}\cdot\text{см}$; $\text{tg}\delta \leq 0,025$ ($f = 106\text{ Гц}$); температурный режим $T = -60\dots+200\text{ }^\circ\text{C}$.

Конструктивное исполнение ВВ-трансформаторов

Оно более разнообразно, чем низковольтных трансформаторов. В ВВ-трансформаторах часто свободное пространство в «габаритном объеме» используется для размещения высоковольтных выпрямительных модулей и компонентов. Это связано со стремлением не только выполнить ВВ-блок более компактным, но и в не меньшей степени — минимизировать внешние высокопотенциальные соединения. Важное требование высоковольтной техники и ВВ-трансформаторов в частности — исключение «острых», «незаглаженных» контуров деталей, компонентов и модулей, находящихся под высоким по-

тенциалом. В качестве примера конструктивного выполнения трехфазного ВВ-трансформатора ($3 \times 200\text{ В/400 Гц}$) и ВВ-блока в целом можно указать на трансформаторно-выпрямительный модуль (ТВМ) в ВВИП на 12 кВ/14 кВТ [3].

В [3] приведен пример расчета ВВ-трансформатора мощностью $10\text{ кВ}\cdot\text{А}$ с выходным напряжением 24 кВ , работающего на частоте порядка 40 кГц . При расчете принято значение рабочей индукции в сердечнике $\Delta B = 0,15\text{ Тл}$. С учетом минимизации потерь выбран ферритовый сердечник из материала 2000НМ1-17 (но в принципе подойдет и 1500НМ3 или 2000НМ3). В результате дальнейшего расчета определен магнитопровод типа ПК 72×28 с окном $7,2 \times 8\text{ см}$ и площадью сечения 6 см^2 . Объем сердечника $V_c = 250\text{ см}^3$, масса $G_c = 1125\text{ г}$ (при плотности феррита $4,5\text{ г/см}^3$). Расчетные потери: в сердечнике $P_c = 31,5\text{ Вт}$, в меди обмоток — $P_m = 16,74\text{ Вт}$ (с учетом коэффициента поверхностного эффекта $K_s = 1,1$ для 40 кГц). Таким образом, величина расчетного КПД $\eta = 0,99$. Общий вес трансформатора порядка $4,3\text{ кг}$. Ориентировочные габариты — $210 \times 120 \times 175\text{ мм}$.

Высоковольтные выпрямители

Общие сведения о проектировании ВВ-выпрямителей приведены, например, в работах [2, 3, 11]. ВВ-выпрямители выполняются на специальных высоковольтных диодах (столбах) и конденсаторах. В отличие от низковольтных выпрямителей, в мощных ВВ-выпрямителях при напряжениях выше $8\text{--}10\text{ кВ}$ гораздо чаще применяется последовательно-параллельное включение ВВ-диодов. Это связано, во-первых, со стремлением использовать широкую номенклатуру выпускаемых и поставляемых диодов средней «высоковольтности», особенно в аппаратуре военного назначения. Во-вторых, так сравнительно легче обеспечить большую мощность ВВ-блоков и ВВИП в целом. При определении количества последовательно соединенных диодов необходимо соблюдение следующих условий:

- величина допустимого максимального обратного повторяющегося напряжения U_{RRM} каждого из диодов (по техническим условиям) должна в $1,7\text{--}2$ раза превышать возможное максимальное рабочее напряжение на диоде (столбе);
 - диоды (столбы) с аномально большими или, наоборот, малыми значениями тока утечки I_R должны отбраковываться и не использоваться в выпрямительных модулях этого типа.
- При параллельном соединении диодов должны соблюдаться условия:
- величина допустимого максимального среднего прямого тока $I_{F(AV)}$ каждого из диодов должна в $1,7\text{--}2$ раза превышать возможный максимальный рабочий ток диода;
 - диоды с аномально большими или, наоборот, малыми значениями прямого падения напряжения U_{FM} должны отбраковываться и не использоваться в выпрямительных модулях этого типа.

Такие меры позволяют обойтись без использования шунтирующих высоковольтных резисторов при последовательном включении (до напряжений $25\text{--}30\text{ кВ}$) диодов и без последовательных симметрирующих резисторов при параллельном. При выходных напряжениях ВВ-выпрямителей более 30 кВ диоды необходимо шунтировать конденсаторами во избежание возникновения опасных перенапряжений при переходных процессах и в других нештатных ситуациях. Рассмотрим основные компоненты ВВ-выпрямителей: ВВ-диоды и конденсаторы.

Высоковольтные диоды и столбы

Для обычного ВВ-выпрямителя (не выпрямителя-умножителя) максимальное напряжение диода U_{RRM} и максимальный прямой ток $I_{F(AV)}$ должны с запасом превышать максимально возможные значения выходного высокого напряжения и тока нагрузки. Кроме того, важно, чтобы максимальная частота f_{max} диодов (с учетом времени восстановления обратного сопротивления t_{tr}) была больше максимальной рабочей частоты ВВ-выпрямителя. Строго говоря, ВВ-диодами по определению можно считать все диоды, у которых величина напряжения U_{RRM} превышает 1000 В . Диодов с $U_{RRM} = 1200; 1400; 1800\text{ В}$ — великое множество. В работе [12] приведены параметры мощных диодов отечественного и зарубежного производства. Так, отечественные низкочастотные диоды типа Д122-40-(12-18) имеют следующие параметры: $U_{RRM} = 1200\text{--}1800\text{ В}$, $I_{F(AV)} = 40\text{ А}$, $U_{FM} = 1,35\text{ В}$, $f_{max} = 1,5\text{ кГц}$ ($t_{tr} = 7,2\text{ мкс}$). Среди быстродействующих (fast) диодов укажем, для примера, на диод HFA30PB120 фирмы International Rectifier с параметрами: $U_{RRM} = 1200\text{ В}$, $I_{F(AV)} = 30\text{ А}$, $U_{FM} = 3\text{ В}$, $t_{tr} = 37\text{ нс}$. У диода Шоттки из карбида кремния (SiC-диод Шоттки) типа SCD10120 фирмы Cree следующие параметры: $U_{RRM} = 1200\text{ В}$, $I_{F(AV)} = 10\text{ А}$, $U_{FM} = 1,8\text{ В}$, заряд восстановления $Q_R = 61\text{ нКл}$. Далее будем рассматривать только специальные ВВ-диоды и столбы с обратными напряжениями U_{RRM} не менее 2 кВ .

В России основным производителем высоковольтных диодов и выпрямительных столбов в рассматриваемом диапазоне мощностей и напряжений является ОАО «ТЭЗ» («Томилинский электронный завод», г. Томино) [13]. В выпускаемой им номенклатуре — выпрямительные столбы КЦ106А-Г, 2Ц106А-Г/ТЭ (АЕЯР.432120.490ТУ), 2Ц108А-В (аА0.339.044ТУ), 2Ц202А-Е/ТЭ (АЕЯР.432120.396ТУ), 2Ц203А-В (ТРО.336.024ТУ). В таблице 1 представлены основные параметры высоковольтных столбов указанных типов. За рубежом гораздо больше фирм выпускают высоковольтные диоды, и их номенклатура значительно шире. В таблице 1 представлены основные параметры некоторых быстродействующих ВВ-диодов, производимых фирмами Philips (Нидерланды) [14], Diotec (Германия) [15] и Rectron (Тайвань) [16]. Из зарубежных диодов отметим ВУХ(101...104)G (Philips) и ВУ(4...16) (Diotec).

Таблица 1. Основные параметры высоковольтных диодов и выпрямительных столбов отечественного и зарубежного производства

Наименование (производитель)	U_{RRM} , кВ	$I_{F(AV)}$, А	I_{FSM} , А	U_{FM} , В	I_R , мкА	t_{rr} , нс	f_{max} , кГц	Примечание
2Ц106А-Г/ТЭ (ОАО «ТЭЗ»)	4; 6; 8; 10	0,02	–	25	3,5	100	–	Выпрямительный столб АЕЯР.432120.490ТУ. $T = -60...+125$ °С; габариты 7,5×7,5×22 мм
КЦ106А-Г (ОАО «ТЭЗ»)	4; 6; 8; 10	0,01	–	25	3,5	–	20	Выпрямительный столб $T = -20...+85$ °С; габариты 7,5×7,5×22 мм
2Ц108А-В (ОАО «ТЭЗ»)	2; 4; 6	0,1	–	6; 6; 10	5	200	–	Выпрямительный столб аАО.339.044ТУ
2Ц202А-Е/ТЭ (ОАО «ТЭЗ»)	2; 4; 6; 8; 10; 15	0,5	–	3,5; 7; 12	–	750	1*	Выпрямительный столб АЕЯР.432120.396ТУ
2Ц203А-В (ОАО «ТЭЗ»)	6; 8; 10	1,0	–	10	–	–	1	Выпрямительный столб ТРО.336.024ТУ
ВУХ(101...104)G (Philips)	10	0,4...0,225	20...14	17,5...31	15	600...50	–	Диод, корпус SOD88А
BV4, BV6 (Diotec)	4; 6	0,1	15,0	5	3	–	–	Диод, корпус DO-15
ВУ(4; 6; 8; 12; 16) (Diotec)	4; 6; 8; 12; 16	1,0; 1,0; 0,5; 0,3	100,0	4	1	–	–	Диод, корпус DO-201
DD1000...1800 (Diotec)	10; 12; 14; 16; 18	0,02	10,0	40	5	150	–	Диод, корпус D3x12
R2500[F]...R5000[F] (Rectron)	2,5; 3*; 4*; 5*	0,2	30,0	4; 5*	5	[500]	–	Диод, корпус DO-15
HVM5**...HVM15 (Rectron)	5**; 8; 10; 12; 14; 15	0,35	50,0	8**; 14	5	–	–	Диод, корпус HVM

Высоковольтные конденсаторы

Согласно нормативной документации, высоковольтные конденсаторы — это конденсаторы с номинальным напряжением 1600 В и выше. К ВВ-конденсаторам, используемым в высоковольтных выпрямителях, предъявляются в основном те же требования, что и к низковольтным [17]. Отличия состоят, прежде всего, в высоком рабочем напряжении U_{max} и практической невозможности использования электролитических конденсаторов. В России основным разработчиком всех конденсаторов является ОАО «НИИ Гириконд» (Санкт-Петербург), на долю которого приходится примерно 90% всех конденсаторов, разработанных в СНГ [12]. В настоящее время это предприятие выпускает керамические высоковольтные конденсаторы типа К15-10 с параметрами: $C_{ном} = 2200-15000$ пФ, группа по ТКЕ — Н30, $U_{max} = 31,5-63$ кВ и типа К15-25: $C_{ном} = 100-4700$ пФ, группа по ТКЕ — Н50, $U_{max} = 30, 40$ кВ. Широкую номенклатуру высоковольтных конденсаторов с комбинированным диэлектриком (от К75-15 до К75-101) изготавливает ЗАО «Элкод» (Санкт-Петербург) [12]; $C_{ном} = 5100$ пФ–200 мкФ; $U_{max} = 2,5-40$ кВ. Основными производителями керамических дисковых высоковольтных конденсаторов типа К15-5 являются ОАО «Псковский завод радиодеталей» (ОАО «ПЗР Плескава») [18]; типа К73-14, К75-25 — ООО «Новосибирский

завод конденсаторов» [19]. Основные параметры некоторых отечественных конденсаторов представлены в таблице 2.

За рубежом ВВ-конденсаторы выпускаются, в частности, такими фирмами, как Murata Manufacturing (Япония) [20], Hitano Enterprise Corp. (Тайвань) [21], EPCOS (Германия) [22]. Основные параметры конденсаторов этих фирм также представлены в таблице 2. Несколько слов о компании Hitano Enterprise. Она была основана в 1980 г., специализируется на производстве широкой номенклатуры конденсаторов, в том числе и керамических высоковольтных с напряжением до 15 кВ, а также металлооксидных варисторов. Группа компаний «Симметрон» [23] является эксклюзивным дистрибьютором этой компании на территории России.

Трансформаторно-выпрямительные модули (ТВМ)

В ТВМ для достижения необходимой величины выходного высокого напряжения используется последовательное (каскадное) соединение выпрямительных модулей, каждый из которых соединен со «своей» (отдельной) обмоткой или обмотками ВВ-трансформатора, например [1]. При этом надо помнить, что к «более высокопотенциальным» («верхним») модулям предъявляются более жесткие требования по электроизоляции. В принципе

возможно использование ТВМ со своими ВВ-трансформаторами, если не удастся подобрать подходящий по габаритной мощности магнитопровод единичного трансформатора. Однако в этом случае требования по электроизоляции ТВМ относительно друг друга и корпуса ВВ-блока еще более возрастают.

В качестве примера укажем на приведенный выше ВВИП на 12 кВ/14 кВт, в котором ТВМ выполнен с трехфазным ВВ-трансформатором (3×200 В/400 Гц) с размещением в его свободном пространстве двух трехфазных выпрямительных модулей на диодах 2Ц203В (табл. 1).

Высоковольтные умножители напряжения

В схемах выпрямителей повышенной высоковольтности (более 25–30 кВ) применяются выпрямители с умножением напряжения, или сокращенно выпрямители-умножители (ВВУ). Они представляют собой диодно-конденсаторные умножители напряжения. В литературе чаще используется название «умножитель напряжения». Но авторы полагают, что возможно также и название «выпрямитель-умножитель», поскольку вместе с умножением производится также и выпрямление напряжения. Распространение получили как несимметричные, так и симметричные схемы умножения напряжения [11, 24].

Таблица 2. Основные параметры высоковольтных конденсаторов отечественного и зарубежного производства

Тип (фирма)	Особенности	$C_{ном}$, пФ (%С, %)	ΔC_T , % (диапазон T, °С)	U_{max} , кВ/ U_{max-f} , кВ ампл	tgδ	$R_{с изоля}$, МОм	Примечание
К15-5 (ОАО «ПЗР Плескава»)	Керамические дисковые	68–15 000 (±5; ±10; +80, –20)	±5 (H50); ±20 (H20, H70)	1,6; 3; 5; 6,3	0,002 (H50); 0,0035 (H20, H50)	≥10 ⁴	ОЖО.460.147ТУ $T = -25...+85$ °С; габариты Ø9–40×6–9 мм
К73-14 (ООО Новосибирский з-д конденсаторов)	Пленочные полиэтилентерафталатные	470–100 000 (±5; ±10; ±20)	–	4; 10; 16; 25	0,008	≥10 ⁵	ОЖО.461.143ТУ (приемка «1»), [ОЖО.461.109ТУ — приемка «5»]. Ресурс Tr = 10000 ч; $T = -40 (60)...+85$ °С; габариты Ø9–25×25–65 мм
К75-25 (ООО «Новосибирский з-д конденсаторов»)	–	1000–2×10 ⁶ (±5; ±10; ±20)	–	1–50	0,0025 (≤0,25 мкФ), 0,005 (≥0,5 мкФ)	(5–30)×10 ³	ОЖО.464.002ТУ (приемка «1»), [ОЖО.464.108ТУ — приемка «5»]. Ресурс Tr = 1000 ч; $T = -60...+100$ °С; габариты Ø45–65×17–90×54–180 мм
DEBxx-серия (Murata)	Керамические дисковые	100–10 000 (±5; ±10; +80, –20)	B (Y5P), E (Z5U)	1; 2; 3; 15;	–	≥10 ⁴	$T = -25...+85$ °С; габариты Ø4,5–7,5 мм
DECxx-серия (Murata)	–	22–2200	SL, B (YF), E (Z5U)	6,3	–	–	$T = -25...+85$ °С; габариты Ø4,5–7,5 мм
DHS4 (D, E, F)xx (Murata)	Керамические цилиндрические	190–4800 (±10; +80, –20)	–	10–40	–	–	$T = -20...+85$ °С; габариты Ø20–60×16–39 мм; резьбовые выводы ISOM4
E5P (Z5)-серия (Hitano)	Керамические дисковые	100–1000–22000	SL, B (Y5P), E (Z5U)	2–15	–	≥10 ⁴	Аналог К15-5; габариты Ø7–24 мм; $T = -40...+85$ °С (SL); –25...+85 °С (Y5P)

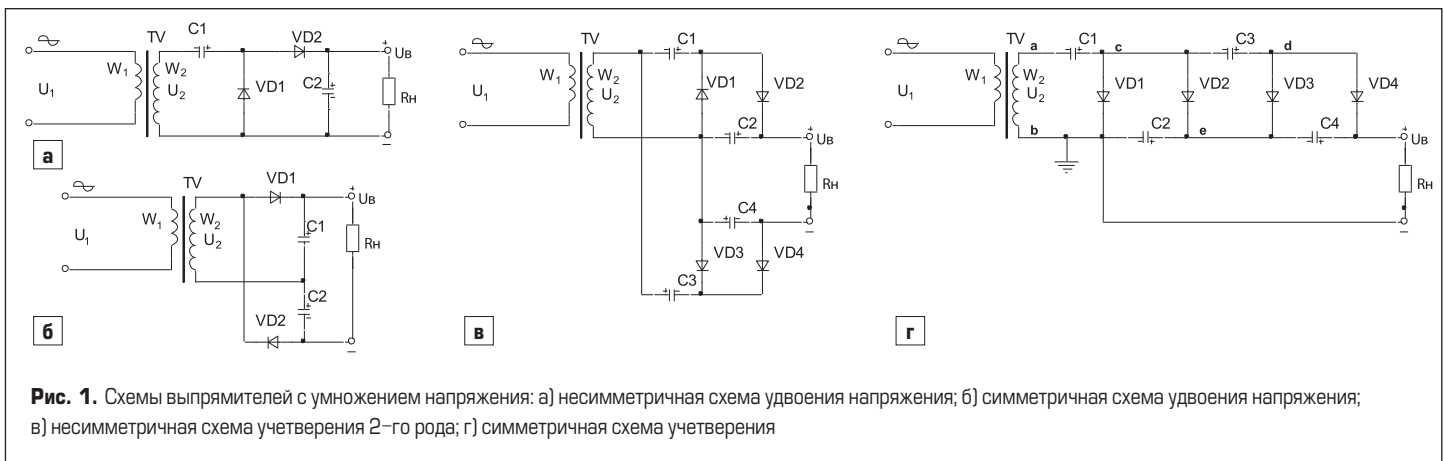


Рис. 1. Схемы выпрямителей с умножением напряжения: а) несимметричная схема удвоения напряжения; б) симметричная схема удвоения напряжения; в) несимметричная схема учетверения 2-го рода; г) симметричная схема учетверения

На рис. 1 показаны простейшие схемы таких выпрямителей.

В частности, на схеме (рис. 1а) приведена несимметричная схема удвоения напряжения. В первый полупериод питающего переменного напряжения (например, напряжения сети), когда открыт диод VD1, конденсатор C1 заряжается приблизительно до напряжения U_{2max} . Во второй полупериод, когда открыт диод VD2, заряжается уже конденсатор C2 — до напряжения $U_{C2} = U_{C1} + U_{2max} \approx 2U_{2max}$. На самом деле величина U_{C2} зависит от внутреннего сопротивления трансформатора, величины емкости конденсаторов C1, C2 и частоты питающего напряжения. Симметричная схема удвоения напряжения, изображенная на рис. 1б, представляет собой последовательное соединение двух однополупериодных схем, работающих попеременно через каждый полупериод питающего напряжения. В несимметричной схеме учетверения 2-го рода (рис. 1в) заряд всех конденсаторов в режиме холостого хода происходит за два периода питающего напряжения. В первый положительный период конденсатор C1 заряжается приблизительно до напряжения U_{2max} . Остальная часть схемы шунтирована диодом VD1, и на ней нет напряжения. В следующий полупериод заряжается конденсатор C2 — примерно до напряжения $2U_{2max}$ по цепи *bace* (сумма напряжений на вторичной обмотке w_2 трансформатора TV и на конденсаторе C1). В третий полупериод заряжается конденсатор C3 до напряжения $2U_{2max}$ по цепи *abcd* (алгебраическая сумма напряжений на обмотке w_2 трансформатора, на C1 и C2). В четвертый полупериод конденсатор C4 заряжается до напряжения $2U_{2max}$ по цепи *bacdf*. Таким образом, выходное напряжение $U_{\delta} = U_{C2} + U_{C4} \approx 4U_{2max}$. При включенной нагрузке полный заряд всех конденсаторов происходит за большее число периодов. В рассмотренной схеме на конденсаторах C2–C4 напряжение близко к $2U_{2max}$, а на конденсаторе C1 напряжение равно U_{2max} . Обратное напряжение на всех диодах равно $2U_{2max}$. Симметричная схема учетверения на рис. 1г представляет собой последовательное соединение двух несимметричных схем удвоения, работа которых сдвинута относительно друг друга на полпериода питающего напряжения.

В несимметричных схемах умножения один вывод (полюс) обмотки трансформатора соединяется с заземленным полюсом нагрузки. Это позволяет уменьшить рабочий потенциал и требования к изоляции между обмотками, а также влияние тока утечки трансформатора на измерительные цепи выпрямителя, поскольку они обычно соединены с «землей». К недостаткам несимметричных схем умножения относятся подмагничивание магнитопровода трансформатора и равенство значений частоты пульсаций и частоты питающего напряжения. В симметричных схемах принципиально отсутствует подмагничивание трансформатора, а частота пульсаций равна удвоенной частоте питающего напряжения. Благодаря этому, при прочих равных условиях, уменьшить в 2–4 раза емкости конденсаторов по сравнению с несимметричными схемами.

Защитные компоненты

К их числу относятся токоограничительные резисторы, реле, управляемые или неуправляемые разрядники. В качестве токоограничительных резисторов в отечественных высоковольтных блоках использовались и продолжают использоваться объемные резисторы типа ТВО различной мощности (1–60 Вт). Резисторы устойчивы к импульсным перегрузкам, в первую очередь к импульсным перенапряжениям 0,4–25 кВ (в зависимости от мощности). Конструктивно они имеют прямоугольное сечение и значительную длину. Так, резистор ТВО-10 Вт имеет габаритные размеры (без выводов): 10,5×15×112 мм [25]. Отношение суммарного сопротивления цепочки таких резисторов к сопротивлению нагрузки ВВИП обычно составляет 2–5%. Электромагнитные реле могут иногда применяться в узлах защиты от токовых перегрузок [1]. При этом, если реле не являются высокопотенциальными, должны быть приняты меры по их изоляции и защите от импульсных перенапряжений.

Неуправляемые разрядники используются как для защиты от перенапряжений высоковольтного выхода, так и для защиты цепей обратной связи (ОС), изменения напряжения или тока. При большой мощности ВВИП и значительной величине высокого напряжения прямое включение разрядников параллельно выходу обычно не применяется.

Если же выходная низкопотенциальная шина изолирована от корпуса (например, на передвижных объектах), то разрядник может включаться относительно корпуса объекта. Применение разрядника для защиты входа цепи ОС от перенапряжений при пробое высоковольтного выхода ВВИП показано, например, на схеме ВВИП [1]. Приведем параметры некоторых зарубежных разрядников. Так, фирма EPCOS [22] выпускает двухэлектродные миниатюрные разрядники серии EM с параметрами:

- напряжения пробоя (на постоянном токе) $U_{пр} = (90, 230, 300, 350, 400) В \pm 20\%$;
- разрядный ток $I_{разр} \leq 2,5$ кА (за время 8/20 мкс);
- сопротивление изоляции $R_{исол} > 10$ ГОм;
- емкость $C < 1$ пф;
- габаритные размеры $\varnothing 8,5 \times 6$ мм.

Также эта фирма выпускает и более мощные разрядники, например серии N8 и Ф8, практически на те же напряжения, но с разрядным током соответственно 10 и 20 кА при размерах $\varnothing 8 \times 6$ мм.

Варисторы, наряду с разрядниками, могут применяться для защиты цепей ОС по напряжению и току [1]. Варистор подключается параллельно низковольтному плечу $R_{НВ}$ в делителе высокого напряжения (ДВН). В работе [10] один из авторов описал этот вариант. Например, отечественный низковольтный разрядник Р-63 имеет следующие параметры: напряжение пробоя 200–300 В; время запаздывания пробоя не более 0,5 мкс; сопротивление изоляции не менее 500 МОм (т. е. ток утечки менее 500 нА). Таким образом, предлагаемый на замену варистор должен иметь параметры не хуже, а по величине пробивного напряжения — даже меньше. С учетом этого были исследованы несколько образцов варисторов типа 594-30 (Philips) [14]. Данные варисторов этого типа: напряжение ограничения (пробоя) равно $U_{пр} = 38$ В; постоянная рассеиваемая мощность $P_{max} = 0,4$ Вт; максимально допустимая энергия поглощения $E_{max} \geq 9,2$ Дж (за время 10–100 мкс). В процессе исследования выяснилось, что у 70–80% варисторов ток утечки был не более 5–10 нА (при напряжениях ± 12 В), то есть сопротивление изоляции $R_{исол} > 1$ ГОм. При испытаниях нескольких опытных и серийных образцов ВВИП с выходным напряжением 30–45 кВ (всего 16 образцов) результаты применения варисторов

были положительны, что подтвердилось и при эксплуатации аппаратуры у потребителей.

Высоковольтные резисторы и делители высокого напряжения

Среди высоковольтных резисторов, производимых в России и странах СНГ, укажем на выпускаемые в течение многих лет лакопленочные композиционные типа С3-9 и С3-14, а также на высоковольтные проволочные резисторы типа С5-24, С5-50, С5-51, С5-58. Приведем для иллюстрации основные параметры некоторых из них [25]:

- С3-9: $R = 0,47-3300 \text{ МОм} \pm 5(10; 20)\%$; $TKC \leq \pm 0,03-0,08\%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас. max} = 1 \text{ Вт}$ и 10 Вт ; $U_{max} = 4, 10$ и 25 кВ ;
- С5-24: $R = 1-51 \text{ МОм} \pm 5\%$; $TKC \leq \pm 0,003\%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас. max} = 0,5 \text{ Вт}$; $U_{max} = 5-6,1 \text{ кВ}$.

В 2001 г. в России было налажено производство высоковольтных высокоомных резисторов типа P1-32, P1-32-1M (АВШК.434110.018ТУ), С2-33НВ (ОЖО.467.173/доп.1). Они производятся на ОАО «НПО «Эркон» (Нижний Новгород) [26], в составе которого находится ООО «Резистор-НН» (также Нижний Новгород) [27]. Освоение выпуска резисторов P1-32, P1-32-1M, С2-33НВ происходило наряду с расширением номенклатуры и увеличением объемов выпуска резисторов прецизионных С2-29, С2-36, С2-29С, высокочастотных С2-10, чип-резисторов. Это стало возможным в результате сотрудничества с компаниями Max-Quality Electric (Тайвань) и Western Electronics (Сингапур), известными производителями радиоэлектронных компонентов. Зарубежные специалисты не только помогли с наладкой оборудования, но и провели необходимые консультации и обучение персонала. Новые резисторы соответствуют международному габаритному ряду и имеют цветную кольцевую маркировку.

За рубежом высоковольтные резисторы выпускают многие фирмы: Philips [14], Vishay BCcomponents [28], Mullard (Великобритания) [29], Murata [20] и другие. В качестве примеров приведем параметры широко применяемых в России высоковольтных резисторов типа VR-37 фирмы Vishay BCcomponents и VR-68 фирмы Philips [14]:

- VR-37: $R = 1-33 \text{ МОм} \pm 1(5)\%$; $TKC \leq \pm 0,02 \%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас. max} = 0,5 \text{ Вт}$; $U_{max} = 2,5 \text{ кВ} \text{ эф}/3,5 \text{ кВ}_{-}$;
- VR-68: $R = 68 \text{ МОм} \pm 5(1)\%$; $TKC \leq \pm 0,02 \%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас. max} = 1 \text{ Вт}$; $U_{max} = 7 \text{ кВ} \text{ эф}/10 \text{ кВ}_{-}$.

В таблице 3 приведены основные параметры высоковольтных резисторов отечественного и зарубежного производства.

В последнее время стала доступной информация по высоковольтным резисторам многих зарубежных фирм. В частности, отметим крупного производителя резисторов, выпускаемых по различным технологиям, — фирму Riedon [30], образованную в 1960 г. Фирма выпускает высоковольтные резисторы в основном в Германии. Их номенклатура включает в себя металлопленочные (HV37) и толстопленочные (все остальные) резисторы с параметрами:

- HV37: $R_{ном} = 0,1-33 \text{ МОм} (\pm 1\%)$; $TKC (\alpha_{TR}) \leq \pm 0,0025 \%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас} = 0,5 \text{ Вт}$; $U_{max} = 3,5 \text{ кВ}$;
- TF2000: $R_{ном} = 100-2 \times 10^4 \text{ МОм} (\pm 1\%)$; $TKC \leq \pm 0,01 \%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас} = 0,125-3 \text{ Вт}$; $U_{max} = 20 \text{ кВ}$;
- НТЕ: $R_{ном} = 200-700 \text{ МОм} (\pm 1\%)$; $TKC \leq \pm 0,01 \%/^{\circ}\text{C}$; $P_{рас} = 0,7-1,7 \text{ Вт}$; $U_{max} = 48 \text{ кВ}$.

Представляет несомненный интерес информация о зарубежных резисторах, изготавливаемых на основе военных стандартов MIL-STD. Резисторы серии CMH фирмы IRC [31] выпускаются с рабочими напряжениями 0,75–20 кВ, сопротивлением 330 кОм–1 ГОм, мощностью 0,25–5 Вт (при +70 °С), с допуском $\pm 1\%$ и TKC не более $\pm 0,0001 \%/^{\circ}\text{C}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$). Все резисторы удовлетворяют требованиям военного стандарта MIL-PRE-49462. Поскольку резисторы серии CMH предназначены для использования в военной аппаратуре, то на них не распространяются требования RoHS. Однако компания по своей инициативе выпускает также и коммерческую разновидность этих резисторов под маркой CGH, совместимую с бессвинцовой пайкой.

Отметим, что по основным параметрам отечественные высоковольтные резисторы пока еще существенно хуже зарубежных (таблица 3). В первую очередь, по величине $TKC (\alpha_{TR})$, из-

менению (уходу) номинального сопротивления (δR_r) за 1000 ч и в период эксплуатации, по допустимой величине максимального рабочего напряжения (U_{max}).

Делитель высокого напряжения состоит, как правило, из цепочки стабильных высоковольтных резисторов высокопотенциального («верхнего») плеча — $R_{ВВ}$ и низковольтных резисторов «нижнего» плеча — $R_{НВ}$. ДВН находится в ВВ-блоке или модуле, а усилитель обратной связи (УОС) находится в низкочастотном устройстве управления ВВИП, вследствие чего на входе УОС присутствуют электромагнитные помехи («наводки») значительного уровня. Для их устранения плечо $R_{НВ}$ выполняют в виде параллельного соединения, например двух резисторов $R_{НВ1}$ и $R_{НВ2}$, из которых $R_{НВ1}$ находится в ВВ-блоке, а $R_{НВ2}$ размещен в непосредственной близости от УОС. Для высокостабильных и прецизионных ВВИП должны выбираться резисторы достаточно высокого класса точности (не хуже $\pm 5\%$), обладающие малыми значениями $TKC (\alpha_{TR} \leq \pm 0,02 \%/^{\circ}\text{C})$ и временной нестабильности (дрейфа), например, $\delta R_r \leq \pm 1,5\%$ за 1000 ч работы. Кроме того, сопротивление изоляции должно быть не менее $1000 \times R_v$. Если резисторов с указанными или лучшими параметрами нет, то возможно несколько вариантов. В России еще недавно не выпускались высоковольтные прецизионные резисторы с приемкой заказчика (приемка «5»). Поэтому вместо высоковольтных резисторов в схеме ВВИП для подвижной РЛС [3], описанной также в [1], делитель ДВН на 12 кВ выполнен из прецизионных резисторов С2-23 2 Вт/100 кОм ($TKC \leq \pm 0,005-0,015\%/^{\circ}\text{C}$; $U_{max} = 750 \text{ В}$), всего 44 шт., и С2-29 1 Вт/82,5 кОм ($TKC \leq \pm 0,0025-0,0075\%/^{\circ}\text{C}$; $U_{max} = 700 \text{ В}$), всего 44 шт. Другой вариант — выполнить ДВН из резисторов одной партии, когда параметры их стабильности находятся «ближе» друг к другу. Еще один, более трудоемкий вариант связан с разбраковкой резисторов по точности и величине TKC . При этом также важно, чтобы коэффициенты электрической нагрузки $K_{нл}$ резисторов были в пределах (с учетом температуры): по мощности $K_{нл} = 0,15-0,35$; по напряжению $K_{нл} = 0,25-0,4$. (Под коэффициентом электрической нагрузки $K_{нл}$ понимаем

Таблица 3. Основные параметры высоковольтных резисторов отечественного и зарубежного производства

Тип (производитель)	Особенности	$R_{ном}, \text{МОм}$ (допуск $\pm/R, \%$)	$TKC (\alpha_{TR}), \pm\%/^{\circ}\text{C}$	$P_{рас}, \text{Вт}$	$U_{max} = U_{max-г} \text{ кВ}/\text{кВ} \text{ эф}$	Примечание
С3-9 (Россия)	лакопленочные композиционные	0,47–3300 (5; 10; 20)	0,03 – 0,08	1; 10	4; 10; 25	$T = -60...+100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; ресурс $T_p = 10000 \text{ ч}$; габариты $\varnothing 6,0-12 \times 30-124 \text{ мм}$
С5-24 (Россия, СНГ)	проволочные	1–51 (5%)	0,003	0,5	5–6,1	$T = -60...+70 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_{из} = 500 \text{ ГОм}$; габариты $\varnothing 16 \times 54 \text{ мм}$
P1-32, P1-32-1M* (ОАО «НПО Эркон»)	тонкопленочные	1–2000 (0,25; 0,5 Вт); 0,01–1000 (1 Вт); 0,01–100 (1 Вт*) (все 5; 10)	0,025–0,05 (до 75 МОм)	0,25; 0,5; 1 (1*)	1; 2; 10	АВШК.434110.018ТУ (доп. 1). Ресурс $T_p = 15000 \text{ ч}$; $T = -60...+125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (P1-32) и $-60...+155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (P1-32-1M); габариты $\varnothing 4,2-8,6 \times 10,8-20 \text{ мм}$
С2-33НВ (ОАО «НПО Эркон»)	тонкопленочные	1–200 (5; 10)	0,1–0,4	0,25; 0,5; 1,0	1 (0,25; 0,5 Вт); 10 (1 Вт)	ОЖО.467.173ТУ (доп. 1). $T_p = 15000 \text{ ч}$; $T = -60...+125 \text{ }^{\circ}\text{C}$; габариты $\varnothing 4,0-8,6 \times 10,8-28 \text{ мм}$
VR-37 (Vishay)	металлопленочные	0,1–33 (1; 5)	0,02	0,5	3,5/2,5	$\delta R = 1,5\%$ (1000 ч; +70 °С); $T = -55...+125 \text{ }^{\circ}\text{C}$; габариты $\varnothing 4,0 \times 10 \text{ мм}$
VR-68 (Philips, Vishay)	металлопленочные/металлофольговые	0,1–68 (1; 5)	0,02	1	10/7	$T = -55...+125 \text{ }^{\circ}\text{C}$; габариты $\varnothing 6,8 \times 18 \text{ мм}$ (1 Вт)
MHROXXXSA (Murata)	–	1–1000 (2; 5; 10; 20)	–	0,6–1,5	3–8* (6–16)**	Выходы радиальные: * — прямые, ** — формованные; плоские, покрыты эпоксидной смолой
Серия SGT: SGT26...SGT154 (EBC)	–	0,1–1000 (0,1–1)	0,025 (–15...+85 °С)	1; 1,25; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6	4; 5; 6; 10; 15; 20; 25; 30	Патент US 4.859.981 MIL-STD-202: $\delta R_r \leq 0,25\%/1000 \text{ ч}$ (+125 °С); $K_e(U) \leq 2 \times 10^{-5} \%/B$; $R_{из} \geq 10000 \text{ ГОм}$; $T_{max} = +225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (со снижением $P_{рас}$); габариты $\varnothing 8,2 \times 26,0-153,7 \text{ мм}$
Серия CMH: CMH-1/4...CMH-5,0 (IRC)	Толстопленочные	0,33–1000 (1; 2; 5)	0,01	0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5	0,75; 1,5; 3; 5; 10; 20	MIL-R-49462; MIL-STD-202: $\delta R_r \leq \pm 1\%/1000 \text{ ч}$ (+25 °С); $KR(U)$ до $-5 \times 10^{-4} \%/B$; $R_{из}$ до 5000 ГОм; $T_{max} = +155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (снижение $P_{рас}$ на 80%); габариты $\varnothing 2,2-7,5 \times 7-78 \text{ мм}$

отношение максимально возможного значения электрического параметра в рабочем режиме к его предельно допустимой величине по техническим условиям или спецификации.) Собранные ДВН должны подвергаться технологической приработке в течение не менее 24 ч отдельно и потом в составе ВВ блока и ВВИП в целом.

Для фильтрации помех параллельно резисторам низковольтного плеча ДВН ($R_{НВ1}$ и $R_{НВ2}$) включаются помехоподавляющие конденсаторы ($C_{НВ}$). Основные требования к ним: рабочее напряжение — не менее напряжения «поджига» защитных разрядников или варисторов, сопротивление изоляции — не менее $1000 \times R_{НВ}$, низкий импеданс в частотном диапазоне помех.

Особые требования при хранении и сборке ДВН

Необходимо соблюдать особые правила хранения высоковольтных резисторов до сборки ДВН в целом и при сборке. Чем выше «высоковольтность» и требования по стабильности высокого напряжения, тем более жестко должны соблюдаться эти правила. Один из авторов в 2002 г. принимал активное участие в отладке техпроцесса изготовления ВВИП-45кВ. При технологической тренировке (прогоне) собранного ВВИП на 45 кВ было зафиксировано, что величина временного дрейфа выходного напряжения в несколько раз больше, чем требовалось по инструкции. Анализ показал, что причина заключается в ненадлежащих условиях хранения высоковольтных резисторов типа VR-68 (наличие пыли и повышенная влажность в помещении) [27]. Для исключения негативного явления пришлось ввести в процесс сборки ДВН несколько подготовительных операций. Так, перед сборкой резисторы VR-68 промывались спиртовой смесью, высушивались при температуре +50 °С и помещались в технологический герметичный контейнер (эксикатор). Сама сборка стала производиться в беспылевой зоне.

Особенности конструктивного выполнения высоковольтных блоков

Конструктивное выполнение ВВ-блоков и модулей зависит от их мощности, величины высокого напряжения и традиций предприятия-изготовителя. Так, для изоляции ВВ блоков и модулей небольшой мощности может применяться «Виксинт» или капролон. Капролон (иначе полиамид-6, ПА-6) — полимер, устойчивый к воздействию масел, спиртов, щелочей, слабых кислот. Его электрическая прочность — 30–35 кВ/мм, температура плавления — +220...+225 °С, рабочая температура — +40...+70 °С. Для более мощных блоков и модулей отечественного производства используются эпоксидные компаунды, газовая или масляная (маслобарьерная) изоляция. При любом типе изоляции ВВ-блок или модуль помещается в металлический корпус, обеспечивающий механическую прочность конструкции и локализацию электромагнитных помех излучения внутри объема. При этом корпус заземляется. В случае использо-

вания масляной (маслобарьерной) изоляции корпус одновременно является и емкостью, которая наполняется трансформаторным маслом. Между верхней крышкой корпуса и уровнем масла должен быть воздушный зазор для обеспечения возможности расширения масла при его нагреве. В мощных ВВ-блоках необходимо иметь невозвратный воздушный клапан для удаления возможных вредных газов, выделяющихся из масла при эксплуатации. Обычно на верхней крышке таких блоков располагаются высоковольтный вывод (разъем) и низковольтный герметичный разъем цепей обратной связи по высокому напряжению $U_{\delta oc}$ и току нагрузки $I_{н oc}$. Охлаждение мощных ВВ-блоков производится или посредством мощных вентиляторов большой производительности, или водой, проходящей через теплообменник типа «змеевик». Наиболее простой, но малонадежный способ — это прямоточное протекание воды из водопроводной сети (через очистительные фильтры). Более «продвинутый» способ — охлаждение водой, циркулирующей в замкнутом контуре под действием компрессора. Простейший контроль температуры нагрева масла осуществляется биметаллическим термодатчиком (термореле), который срабатывает при превышении температуры (например, +55...+60 °С) и отключает, в частности, низкочастотную цепь питания ВВ-блока. Корпус может иметь цилиндрическую или прямоугольную форму, причем первая предпочтительнее с точки зрения равномерности внутреннего электрического поля. Но на практике это не всегда возможно по технологическим соображениям.

В ряде исполнений осуществляется «бескабельное» конструктивное объединение высоковольтного блока вместе с нагрузкой, например рентгеновской трубкой, в так называемом моноблоке. Например, моноблоки с объединением ВВ-блока с РТ имеются в номенклатуре продукции фирмы Spellman (США) [9], в некоторых типах рентгеновских аппаратов ОАО НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург).

Специальные меры по электробезопасности

Дополнительно укажем на повышенные меры по электробезопасности, подразумевающие:

- надежность электроизоляции всех высокопотенциальных модулей, узлов и компонентов;
- периодический контроль надежности заземления;
- обязательное наличие надежной блокировки при снятии защитных кожухов с ВВ-блока или нагрузки, например РТ.

При этом предусматривается отключение ВВИП от сети электропитания. Иногда при отключении дополнительно автоматическим силовым выключателем (тиристором, реле) производится разряд конденсатора большой емкости в сетевом выпрямителе преобразовательного ВВИП.

Завершая изложение особенностей ВВ-блоков, приведем некоторые требования к технологии производства высоковольтной техники. Производственные помещения должны быть оборудованы установками климат-контроля, обеспечивающими в любое время года поддержание постоянной температуры (не хуже +20±5 °С), низкой влажности (не более 60%). Также важны мероприятия по поддержанию и контролю уровня вредных примесей в воздухе.

Пример реализации высоковольтного блока

Рассмотрим схему ВВ-блока преобразовательного ВВИП мощностью до 200 Вт с напряжением –30 кВ. Этот ВВИП был использован для питания рентгеновской трубки БСВ-33 [1] в дифрактометре-разбраковщике кристаллов типа АДР-7, разработанном в НПП «Буревестник» в начале 2000 г. Схема высоковольтного блока представлена на рис. 2.

Для упрощения на схеме не показан контур регулирования анодного тока РТ посредством изменения ее тока накала. Выходные стабилизированные параметры ВВ-блока: высокое напряжение равно –30 кВ (–5%) при анодных токах 6 мА ±10% (рабочий режим) и 3 мА ±10% (режим тренировки РТ).

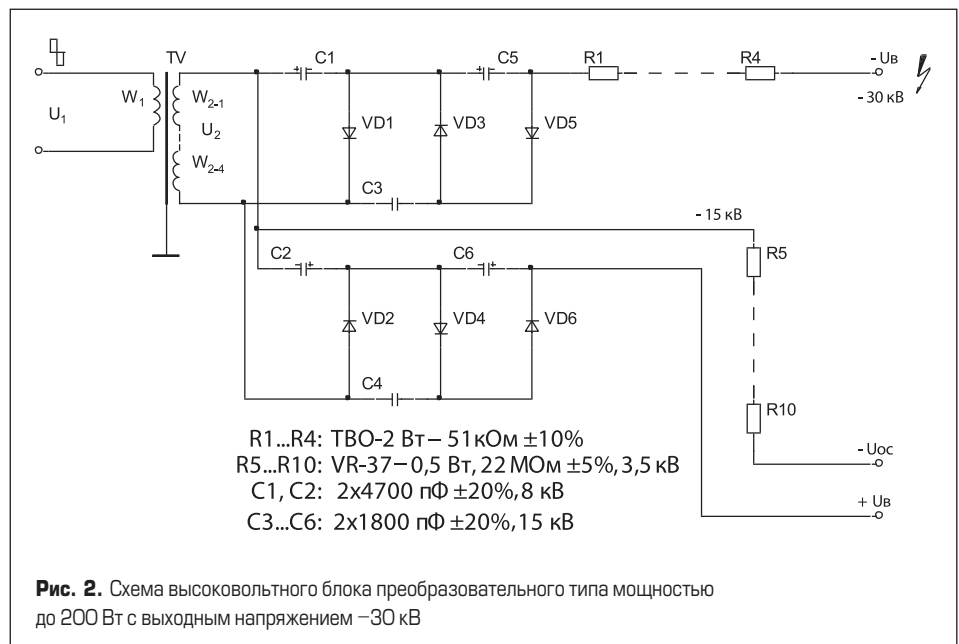


Рис. 2. Схема высоковольтного блока преобразовательного типа мощностью до 200 Вт с выходным напряжением –30 кВ

Питание высоковольтного (анодного) трансформатора TV и ВВ-блока в целом осуществляется от мостового инвертора с амплитудой $U_1 = 300$ В (+30 В, -45 В) основной частоты 22 ± 3 кГц. Для стабилизации высокого напряжения используется частотное регулирование благодаря резонансным свойствам трансформаторного контура. ВВ-трансформатор выполнен на магнитопроводе оригинальной конструкции из ферритовых сердечников (фирменный секрет предприятия-поставщика). Число витков: первичной обмотки $w_1 = 155$ ($\varnothing 0,62$ мм), вторичной — $w_2 = 2100$ ($\varnothing 0,2$ мм), причем вторичная обмотка состоит из 4 секций $W_{2-1} - W_{2-4}$. Следовательно, коэффициент трансформации $K_{mp TV} = 2100/155 = 13,55$, а напряжение на вторичной высоковольтной обмотке $U_2 = 300 \times 13,55 = 4065$ В. Выпрямитель-умножитель напряжения -30 кВ собран по симметричной схеме умножения на двух утроителях напряжения: VD1, VD3, VD5-C1, C3, C5 и VD2, VD4, VD6-C2, C4, C6. Параметры конденсаторов указаны на рис. 2. В качестве диодов VD1-VD6 использовались сначала отечественные столбы КЦ106Г, потом быстродействующие диоды DD1000 фирмы Diotec (таблица 1). Таким образом, величина номинального выходного напряжения U_{θ} с учетом коэффициента трансформации $K_{mp TV}$ и коэффициента умножения K_y ВВУ равна: $U_{\theta} = K_y \times U_2 = K_{mp TV} \times K_y \times U_1 = 13,55 \times (2 \times 3) \times 300 = 24400$ В.

Дальнейшее повышение высокого напряжения U_{θ} до необходимой величины (30 кВ) осуществляется за счет использования резонансных свойств трансформаторного контура и ВВУ в целом при настройке блока. (При этом, конечно, увеличивается приблизительно на 20% запас по мощности.)

Для ограничения токовых перегрузок при КЗ и спонтанных импульсных пробоях РТ («гажение») [1] в выходную ВВ-цепь включены четыре объемных резистора R1-R4 (по 51 кОм) типа ТВО-2, устойчивых к импульсным ВВ-перенапряжениям.

Высоковольтное (верхнее) плечо $R_{вв}$ ДВН образовано шестью резисторами R5-R10 (22 МОм/3,5 кВ) типа VR-37 (табл. 3), подключенными к «половине» U_{θ} (-15 кВ). Резисторы низковольтного плеча $R_{нв}$ (не показаны на схеме) подключены к низкопотенциальному выводу «- U_{OC} » и «земле» и находятся в устройстве управления мостовым инвертором ВВИП. То есть ОС по высокому напряжению является не прямой, а косвенной и требует адекватного подбора обоих утроителей напряжения [1]. Поэтому рассматриваемый ВВИП не обладает высокой стабильностью, что и не требовалось по условиям работы прибора АДР-7 в целом. Резистивный датчик анодного тока I_a РТ (не показан на схеме) подключен к низкопотенциальному выводу «+ $U_{в}$ » и «земле» и находится также в устройстве управления мостовым инвертором ВВИП.

ВВ-блок (рис. 2) конструктивно представляет собой маслонаполненный цилиндр, в котором находятся высоковольтный (анодный) трансформатор, ВВУ, защитные резисторы R1-R4 и резисторы R5-R10 верхнего плеча ДВН. Вывод ДВН («- U_{OC} ») и положительный вывод высокого напряжения «+ $U_{в}$ » через проходные изоляторы подключены к устройству управления мостовым инвертором, а первичная обмотка анодного трансформатора TV — непосредственно к мостовому инвертору. Отрицательный вывод ВВУ («- $U_{в}$ ») через защитные резисторы R1-R4 подключен к высоковольтному разъему ВВИП.

Авторы признательны известному специалисту по средствам электропитания к. т. н. Эраносяну Саркису Аветисовичу за ценные советы при написании статьи и ее редактировании. Также авторы выражают благодарность Романовскому Юрию Александровичу за помощь в оформлении графических материалов.

Продолжение следует

Литература

1. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 5.
2. Костиков В. Г., Никитин И. Е. Источники электропитания высокого напряжения. М.: Радио и связь. 1986.
3. Березин О. К., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Три Л. 2000.
4. Владимиров Е. Н., Ланцов В. В., Лебедева О. К. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора // Современная электроника. 2007. №7.
5. Блинов Н. Н. Рентгеновские питающие устройства. М.: Энергия. 1980.

6. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Авертс В., Болен Р., Меестр П. и др. Рентгено-техника: Справочник в 2-х книгах. Кн. 1. М.: Машиностроение. 1992.
7. Акимов А. В. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования (38). 2001. № 3.
8. www.deantechnology.com
9. www.spellmanhv.com
10. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 5. Импульсные источники питания // Силовая электроника. 2009. № 3.
11. Гольдина Р. А., Девонский В. Ю. Высоковольтные выпрямители малой мощности. М.: Энергия. 1976.
12. Ланцов В. В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
13. www.nppte.ru
14. www.philips semiconductor.com
15. www.diotec semiconductor.com
16. www.rectron.com
17. Ланцов В. В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 4.1 // Силовая электроника. 2009. № 5.
18. www.pzr.ru
19. www.po-nzr.ru
20. www.murata.com
21. www.hitano.com
22. www.epcos.com
23. www.symmetrongroup.com
24. Краус Л. А., Гейман Г. В., Лапиров-Скобло М. М., Тихонов В. И. Проектирование стабилизированных источников питания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия. 1980.
25. Дубровский В. В., Иванов В. М., Пратусевич Н. Я. и др. Резисторы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1991.
26. www.erkon-nn.ru
27. www.tic-pr.com
28. www.vishay bccomponents.com
29. www.mullard.com
30. www.riedon.com
31. www.irc.com