

# Мощные высоковольтные источники питания

## Часть 1

**Владимир Ланцов**

vvlantsov@list.ru

**Евгений Владимиров,**  
к. т. н.

envlad@list.ru

В первой статье цикла приводятся сведения об областях применения мощных высоковольтных источников питания (ВВИП) и их классификация. Рассмотрены отличия ВВИП от низковольтных ИП. Дается обзор структур построения мощных ВВИП в аспекте их развития. В последующих частях данного цикла будут отмечены особенности реализации собственно высоковольтных блоков, модулей, блоков и их компонентов. В большей степени на примере ВВИП для питания рентгеновской аппаратуры, планируется рассмотреть источники: а) с импульсным выходом; б) преобразовательного типа с выходом на постоянном токе. Будут приведены схемы, особенности управления, в том числе с использованием микроконтроллеров. Также планируется привести технические характеристики отечественных и зарубежных источников высокого напряжения, а также особенности их проектирования, производства и эксплуатации.

Высоковольтными источниками питания (ВВИП) или источниками высокого напряжения (ИВН) считаются источники с выходным напряжением более 1000 В, например [1]. Такие источники, отвечая основным требованиям для низковольтных ИП (НИП), должны дополнительно соответствовать особым требованиям техники высоких напряжений. Тем более это относится к мощным ИВН, особо опасным для человека и требующим строгого соблюдения специальных правил техники безопасности и особого подхода к конструированию.

В отличие от низковольтных источников вторичного электропитания (ИВЭ), проблемы ВВИП, особенности их технических решений и высоковольтные компоненты освещены в научно-технической литературе менее подробно. Известные работы обобщающего характера в этой области [2–5] посвящены, в основном, тематике ВВИП специального (оборонного) назначения — для радиолокационной и радиопередающей аппаратуры. В работе [6] дается классификация рентгеновских питающих устройств (РПУ), называемых в комплексе с рентгеновской трубкой источниками рентгеновского излучения (ИРИ). Приведены в общем виде некоторые структуры и схемы отдельных их узлов, описаны особенности использования в исследо-

вательской, медицинской и промышленной аппаратуре различного назначения. Указанные работы опубликованы достаточно давно (10–25 лет назад). Хотя они не потеряли определенного значения и в наши дни, тем не менее не учитывают современных достижений в этой сфере. Это касается развития мощных преобразовательных ВВИП на повышенных частотах преобразования (до 50 кГц), особенно с применением современных и перспективных электронных компонентов. В частности, имеются в виду мощные высоковольтные полевые транзисторы с изолированным затвором (МОПТ или MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ или IGBT), интегральные силовые модули (ИСМ или IPM) на основе MOSFET и IGBT, быстродействующие высоковольтные диоды и другие компоненты. С другой стороны, в большинстве современных статей по системам и источникам высокого напряжения [7–10] рассматриваются примеры конкретных ВВИП в узкой области применения.

Вместе с тем в последнее время вырос интерес к высоковольтным источникам, особенно мощным, в связи с расширением использования их в различных областях. В этой связи, по нашему мнению, представляется полезным, с одной стороны, дать информацию обобщающего характера о развитии и состоянии ВВИП. С другой стороны, для иллюстрации рассмотренных тезисов необходимы конкретные примеры технических решений в этой области с указанием использованных современных компонентов, в том числе зарубежного производства.

В настоящей статье авторы с этих позиций попытались, на основе известной им информации, личного опыта проектирования и эксплуатации ВВИП для рентгеновской аппаратуры, в определенной степени выполнить эти требования.

Источники высокого напряжения широко применяются в следующих областях:

- рентгеновская аппаратура для медицины, исследовательских и промышленных целей, для контроля металлоконструкций и безопасности;
- радиопередающая и радиолокационная аппаратура для гражданских и военных целей;
- лазеры для медицины, промышленности, военного оборудования;

- электронные ускоряющие системы (ускорители) различных физико-исследовательских установок;
- испытательные высоковольтные установки для исследований и контроля электроизоляционных свойств различных материалов и т. д.

### Применение высоковольтных источников питания в рентгеновской аппаратуре

Мощные ВВИП используются в рентгеновских аппаратах для питания рентгеновских трубок (РТ). В РТ электроны, испускаемые катодом, ускоряются под действием высокого напряжения между анодом и катодом. Электроны ударяются об анод, где происходит их резкое торможение с испусканием рентгеновского излучения. При этом фотоны рентгеновского излучения имеют энергию от 100 эВ до 250 кэВ, с частотой  $3 \times 10^{16} - 6 \times 10^{19}$  Гц и длиной волны 0,005–10 нм. Мягкий рентген характеризуется наименьшей энергией фотона и частотой излучения (и наибольшей длиной волны), а жесткий рентген обладает наибольшей энергией фотона и частотой излучения (и наименьшей длиной волны). Жесткий рентген используется преимущественно в промышленных целях. В России основным разработчиком и производителем РТ является ЗАО «Светлана-Рентген» (С.-Петербург), в прошлом НПО «Светлана» (Ленинград) [11]. В таблице 1 приведены для примера основные характеристики некоторых отечественных РТ для структурного и спектрального анализа производства ЗАО «Светлана-Рентген» для промышленного применения [11, 12].

Отечественные мощные РТ для промышленных применений исторически в большинстве типов выпускаются с заземленным анодом. Это позволяет не изолировать электрически от корпуса радиатор с проточной водой, с помощью которого осуществляется охлаждение анода и трубки в целом. Поэтому в таких трубках катод (нить накала) оказывается под высоким потенциалом, в связи с чем вторичная обмотка накального трансформатора должна иметь соответствующую изоляцию относительно первичной обмотки и магнитопровода трансформатора. К сожалению, надо признать, что по долговечности (гарантийная наработка или ресурс  $T_p$ ) и по некоторым дру-

гим параметрам отечественные РТ существенно уступают зарубежным. По данным [11, 12] гарантийная наработка трубок типа БСВ не превышает 1000 ч. ЗАО «Светлана-Рентген» также выпускает рентгеновские трубки для медицинской аппаратуры как со стационарным (серия БДМ с мощностью до 15 кВт), так и с вращающимся анодом (серия БД с мощностью до 50 кВт).

За рубежом многие известные фирмы, среди прочей продукции, выпускают РТ для применения в медицине, для исследований и промышленных применений. В их числе можно указать Philips, Siemens, General Electric (GE), Varian, Shimadzu, Toshiba, Picker и др.

Источники рентгеновского излучения (ИРИ), т. е. ВВИП и рентгеновские трубки, используются в обычных рентгеновских медицинских приборах (рентгенодиагностика и флюорография), компьютерных томографах [6, 12]. Кроме того, укажем на применение рентгеновских дифрактометров в материаловедении, кристаллографии и биохимии для выяснения структуры веществ на атомном уровне (рентгеноструктурный анализ). При помощи рентгеновских спектрометров определяется химический состав вещества (рентгеноспектральный анализ). Также давно используются рентгенодефектоскопы и рентгенотелевизионные интроскопы (обнаружение опасных предметов в аэропортах).

Основные характеристики ВВИП для рентгеновской аппаратуры (на основании работ [6, 11]):

- диапазон мощностей — от единиц ватт до сотен киловатт;
- диапазон выходных высоких напряжений  $U_g$  — от единиц до сотен киловольт и более;
- допустимая общая (суммарная) нестабильность  $\delta U_{\Sigma} = 0,01 - 5\%$ ;
- коэффициент пульсаций высокого напряжения  $K_{n(U_g)} = 0,1 - 1\%$ ;
- режим работы: длительный (8–100 ч и более); повторно-кратковременный; импульсный.

Длительный (непрерывный) режим работы характерен для промышленных рентгенодефектоскопов, аппаратов для рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа, рентгенотерапии. В частности, ВВИП для аппаратов рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа в основном выполняются на напряжение 40–60 кВ, ток до 100 мА и мощность до 3–5 кВт.

Повторно-кратковременный режим используется в рентгенодиагностических аппаратах, у которых мощность при кратковременном включении может достигать 150 кВт и более при напряжениях до 150 кВ и времени экспозиции (снимка) 0,001–500 с. Импульсный режим работы характерен для аппаратуры промышленной дефектоскопии, исследований высокоскоростных динамических процессов в биофизике, медицине и т. д.

### Применение ВВИП в радиопередающей и радиолокационной аппаратуре

В радиопередающей и радиолокационной аппаратуре источники высокого напряжения применяются для питания СВЧ — электровакуумных приборов (ЭВП) типа клистронов, магнетронов, ламп с бегущей волной и др. В частности, клистрон — такой ЭВП, в котором преобразование постоянного потока электронов в переменный происходит путем модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ при пролете их сквозь зазор объемного резонатора. Клинтроны подразделяются на два класса: пролетные и отражательные. В пролетном клистроне электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объемных резонаторов. В простейшем случае есть два резонатора: входной и выходной. Пролетные клистроны, в отличие от отражательных, имеют гораздо более высокий КПД. Они являются основой всех мощных СВЧ-передатчиков когерентных радиосистем. К высоковольтным источникам для питания, в частности, мощным клистроном в передвижных радиолокационных станциях, предъявляются следующие требования [5]:

- мощность — до 30 кВт и более;
- высокое напряжение —  $U_g = 12 - 25$  кВ;
- допустимая общая (суммарная) нестабильность  $\delta U_{\Sigma}$  — не более 1%;
- допустимый коэффициент пульсаций  $K_{n(U_g)}$  — не более 0,0001% (или  $10^{-6}$ ).

Такое высокое требование к величине  $K_{n(U_g)}$  объясняется тем, что пульсации высокого (анодного) напряжения приводят к нежелательной модуляции амплитуды (амплитудные шумы) и фазы (фазовые шумы) выходных сигналов передающего устройства. Вместе с тем, в некоторых применениях клистронов в других видах передающей аппаратуры [5] и в установ-

Таблица 1. Основные характеристики рентгеновских трубок для структурного и спектрального анализа производства ЗАО «Светлана-Рентген»

Тип трубки	Рабочее анодное напряжение $U_{a,r}$ , кВ	Мощность, кВт	Максимальный анодный ток $I_{a,r}$ , мА	Параметры накала (макс)		Размеры фокус-пятна, мм (материал анода)	Примечание
				$U_{n,r}$ , В	$I_{n,r}$ , А		
БСВ27	60	2,5; 2,0; 1,6; 1,2	—	4	4,0	1,6×10,0 (W, Mo, Cu, Ag, Fe, Co, Ni, Cr, V)	Гарантийная наработка — ресурс $T_p = 1000$ ч; габариты — 236×255 мм
БСВ33	30	0,25; 0,18; 0,15	10,0 (20,0)	—	—	0,4×1,0 (Co, Fe, Cu, Mo)	$T_p = 1000$ ч
БСВ45	60	2,7; 2,2	—	12	4,0	2,0×12,0 (Mo, Cu, Co, Cr, V)	$T_p = 1000$ ч; габариты — 40×261 мм
БХВ6	10–50	3,0; 5,0	100,0	15	5,6	10,0×2,8 (W, Mo, Cu, Ag)	$T_p = 1200$ ч; габариты — 270×266 мм; нет управляющей сетки
БХВ18 (БХВ21)	35	3,5	100,0 (350,0 – в импульсе)	23	3,4	Re	$T_p = 1500$ (2000) ч; габариты — 345×261 мм (напряжение запирающей сетки-катод $U_{c-k} = -500$ В — только у БХВ-18)

как для физических исследований [7] не требуется выполнения таких высоких требований: вполне допустимы величины коэффициента пульсаций порядка  $K_{n(U_{\theta})} = 0,01-0,1\%$ .

**Применение ВВИП в лазерной технике**

Лазеры широко применяются во многих отраслях науки и техники. В промышленности они используются для резки, сварки и пайки деталей из различных материалов. Лазеры применяются в голографии. Известно об их применении и в военных целях, например, в качестве средств наведения и прицеливания. Имеются варианты создания на основе мощных лазеров боевых систем защиты. ВВИП в большинстве современных систем питания лазеров (например, гелий-неоновых, твердотельных) обеспечивают напряжение поджига, величина которого выше, чем рабочее напряжение. Напряжение поджига может составлять от 6–10 до 25 кВ и зависит от различных факторов. Величина рабочего напряжения лазера обычно менее 1000 В, амплитуда рабочего тока — от единиц до сотен ампер при частоте следования импульсов до 500 Гц и длительности 0,05–2 мс. Появились сведения о разработке лазеров с высоковольтной системой питания с рабочим напряжением более 1000 В.

**Классификация высоковольтных источников питания**

Все высоковольтные источники питания условно, по данным [2, 6], а также по мнению авторов, можно разделить на следующие классы и группы:

- По характеру выходного напряжения:
  - с выходом на постоянном токе;
  - с выходом на переменном токе;
  - с импульсным выходом;
  - комбинированные.
- По уровню выходного напряжения:

- «нормально высоковольтные» — 1–20 (25) кВ;
  - «повышенной высоковольтности» — 25–75 кВ;
  - «особовысоковольтные» («сверхвысоковольтные») — свыше 75 кВ.
- По уровню выходной мощности (аналогично классификации НИП, предложенной в [15]):
    - микромощные — до 1 Вт;
    - маломощные — 1–50 Вт;
    - средней мощности — 50–400(500) Вт;
    - большой мощности — 0,5–3(5) кВт;
    - сверхмощные (супермощные) — свыше 5 кВт.
  - По стабильности (точности) высокого напряжения:
    - общего назначения — суммарная (общая)\* нестабильность  $\delta U_{\Sigma} = 1-5\%$ ;
    - повышенной стабильности —  $\delta U_{\Sigma} = 0,3-1\%$ ;
    - высокостабильные —  $\delta U_{\Sigma} = 0,03-0,3\%$ ;
    - прецизионные —  $\delta U_{\Sigma} < 0,03\%$ .

\* Под суммарной (общей) нестабильностью  $\delta U_{\Sigma}$ , для определенности, будем понимать сумму частных нестабильностей  $\delta U_{\theta i}$  от воздействия дестабилизирующих факторов: изменений напряжения электропитания, выходного тока (нагрузки), температуры окружающего воздуха (среды) на 10 °С и кратковременного дрейфа, например за 8 (12) ч работы после штатного прогрева.

- По структурному построению:
  - по количеству выходных каналов — одно- и многоканальные (в том числе низковольтные, но высокопотенциальные);
  - по числу ступеней стабилизации — одно- и двухступенчатые;
  - по типу используемой структуры регулирования высокого напряжения  $U_{\theta}$ :
    - с регулированием на стороне переменного (сетового) напряжения низкой частоты (50/60 Гц, 400/500 Гц и более);
    - с регулированием на стороне выпрямленного высокого напряжения — по

- средством высоковольтных линейных стабилизаторов;
- с использованием регулируемых преобразователей (инверторов) с высоковольтным выходом, работающих на повышенной частоте (десятки килогерц);
- комбинированной — при двухступенчатой структуре стабилизации.

6. По функционально-схемному построению высоковольтных блоков или трансформаторно-выпрямительных модулей (ТВМ).

Дополнительно здесь можно указать и на принцип организации цепи обратной связи (ОС) по высокому напряжению:

- непосредственно с высоковольтного выхода ВВИП, то есть со всей величины  $U_{\theta}$ ;
- с части выходного высокого напряжения —  $kU_{\theta}$  ( $k < 1$ ), например с нижних ступеней ВВ-выпрямителя или ВВ-умножителя — по «электронной модели» (маломощного аналога силовой схемы) [16].

Реально конкретный высоковольтный источник питания может соответствовать нескольким классификационным признакам. В частности, современный мощный ВВИП типа DF3 [13], используемый для питания рентгеновских трубок, имеет следующие основные характеристики:  $P_{\text{вых}} = 3$  кВт;  $U_{\theta} = 0-60$  кВ; нестабильность по сети  $\delta U_{\theta(c)} \leq 0,005\%$ ;  $I_a = 0-80$  мА — с нестабильностью  $\delta I_{a(c)} \leq \pm 0,05\%$ . Эти характеристики обеспечиваются двухступенчатой структурой стабилизации высокого напряжения (один канал) и тока (второй канал), с регулируемым выходным высоковольтным преобразователем (на частоте порядка 40 кГц) по мостовой схеме, выполненным на IGBT. ВВ-выпрямитель собран по схеме с умножением напряжения, ВВ-делитель ОС подключен непосредственно к высоковольтному выходу.

**Отличительные особенности высоковольтных источников питания**

Принципиальное отличие ВВИП, по сравнению с НИП, обусловлено высоковольтным выходом (>1000 В). Другая важная особенность для многих приложений связана с особым характером нагрузки. Прежде всего, это нелинейный характер потребляемого тока в электровакуумных приборах — ЭВП (рентгеновские трубки, клистроны, лампы с бегущей волной) и лазерах. А кроме того — наличие дополнительных напряжений, например для питания высокопотенциальных цепей накала, сетки или поджига. Рассмотрим подробнее другие отличительные особенности ВВИП.

При одинаковой мощности у ВВИП, в отличие от НИП, за счет высокого напряжения  $U_{\theta}$  величина выходного тока на 2–4 порядка меньше. Например, при выходной мощности 2,4 кВт величина выходного тока составляет: 48 мА у ВВИП с  $U_{\theta} = 50$  кВ и 50 А у НИП с  $U_{\text{вых}} = 48$  В.

КПД у ВВИП с одноступенчатой структурой стабилизации высокого напряжения может быть существенно выше, в основном из-за меньшего относительного падения напряжения на выпрямительных диодах. Например,

**Таблица 2.** Примеры отечественных и зарубежных производителей ВВИП различного назначения

Производитель	Тип прибора, назначение	Параметры
<b>Отечественные</b>		
ООО «Синтез» (С.-Петербург)	Для источников рентгеновского излучения	$U_{\theta} = 30-250$ кВ; мощность до 1кВт
ОАО НПП «Буревестник» (С.-Петербург)	С импульсным выходом, для питания рентгеновской аппаратуры	$U_{\theta} = 10-35$ кВ, мощность до 10–15 кВт в импульсе
ЗАО «ОЭП ВЭИ» (Моск. обл., г. Истра)	Преобразователи электрической энергии (РПУ и ИП для лазеров)	мощные (до 70 кВт); высоковольтные (до 200 кВ); высокочастотные (до 70 кГц)
<b>Зарубежные</b>		
Spellman [13]	Модульные	мощность 1,5–1200 Вт
	Для питания РТ	$U_{\theta} = 20-450$ кВ; мощность 0,003–120 кВт
	Моноблоки * с РТ	$U_{\theta} = 75-200$ кВ; мощность 15–700 Вт
Группа компаний Dean technology [14]	ВВИП	$U_{\theta} = 3-150$ кВ
	АС/DC-преобразователи	$U_{\theta}$ до 100 кВ; ток нагрузки до 40 мА; мощность до 500 Вт
	DC/DC-преобразователи	$U_{\theta}$ до 30 кВ

\* В моноблок входят ИВН, источник питания накала, рентгеновская трубка и интегрированная электроника.

даже при использовании современных диодов Шоттки типа 83CNQ100A ( $U_{FM} < 0,67$  В при параллельном соединении четырех диодов) в НИП по одноканальной структуре преобразования с выходной мощностью 2,4 кВт (48 В/50 А) [15] отношение  $U_{FM}/U_{вых} \approx 0,014$ . В то же время в ВВИП на 2,4 кВт (50 кВ/48 мА) при использовании, например, последовательно/параллельного соединения (10/7 шт.) высоковольтных выпрямительных столбов КЦ1006Г ( $U_{FM} = 25$  В при  $U_{RRM} = 10\ 000$  В) отношение  $U_{FM}/U_{вых} \approx 0,005$ .

В структурах ВВИП редко применяются линейные стабилизаторы высокого напряжения, особенно при значениях  $U_{\beta} > 15-25$  кВ (одна из схем подобного вида приведена на рис. 2). Импульсные стабилизаторы высокого напряжения практически не применяются из-за ограничений по использованию полупроводниковых ключей и дросселей в сглаживающих LC-фильтрах. Применение же RC-фильтров ограничено существенным снижением КПД.

Режимы включения/выключения и регулирования выходного напряжения ВВИП характеризуются наличием ограничений по скорости его изменения (нарастания/спада). Это вызвано требованием исключения электрических пробоев в нагрузке и компонентах ВВИП из-за возникновения лавинных токов и наличия паразитных емкостей. На практике скорость изменения высокого напряжения лимитируется величиной не более 3–10 кВ/с. Кроме того, при питании ЭВП перед включением высокого напряжения необходимо подать электропитание (полное или частичное) на накал и дополнительные сетки (например, экранную), если ВВИП имеет фиксированное выходное напряжение. Выключение каналов питания ВВИП производится в обратном порядке. Если же ВВИП имеет регулировку высокого напря-

жения и выходного тока в широких пределах, то нарастание  $U_{\beta}$  во времени должно несколько опережать нарастание  $I_{\beta}$ .

Некоторые нагрузки высоковольтных источников, например рентгеновские трубки, лазеры и другие, имеют нелинейную ВАХ. В том числе на определенных участках характеристики динамическое сопротивление может быть отрицательным  $R_{дин} = -\Delta U_{\beta}/\Delta I_{\beta}$ . В работе [17] показано, что РТ как объект регулирования является общей для двух каналов стабилизации: стабилизатора высокого (анодного) напряжения (СВН)  $U_{\beta}$  (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. Как убедились на практике сами авторы, это означает, что необходимы нетрадиционные решения по обеспечению устойчивости СВН и САТ.

Комплексная защита мощных источников высокого напряжения от различных перегрузок и нештатных ситуаций (аварий) имеет ряд существенных отличий, которые заключаются как в характере исполнения защитных функций, так и дополнительно в наличии их специальных видов. Как и НИП, мощные ВВИП должны иметь защиту от таких перегрузок и аварий, как:

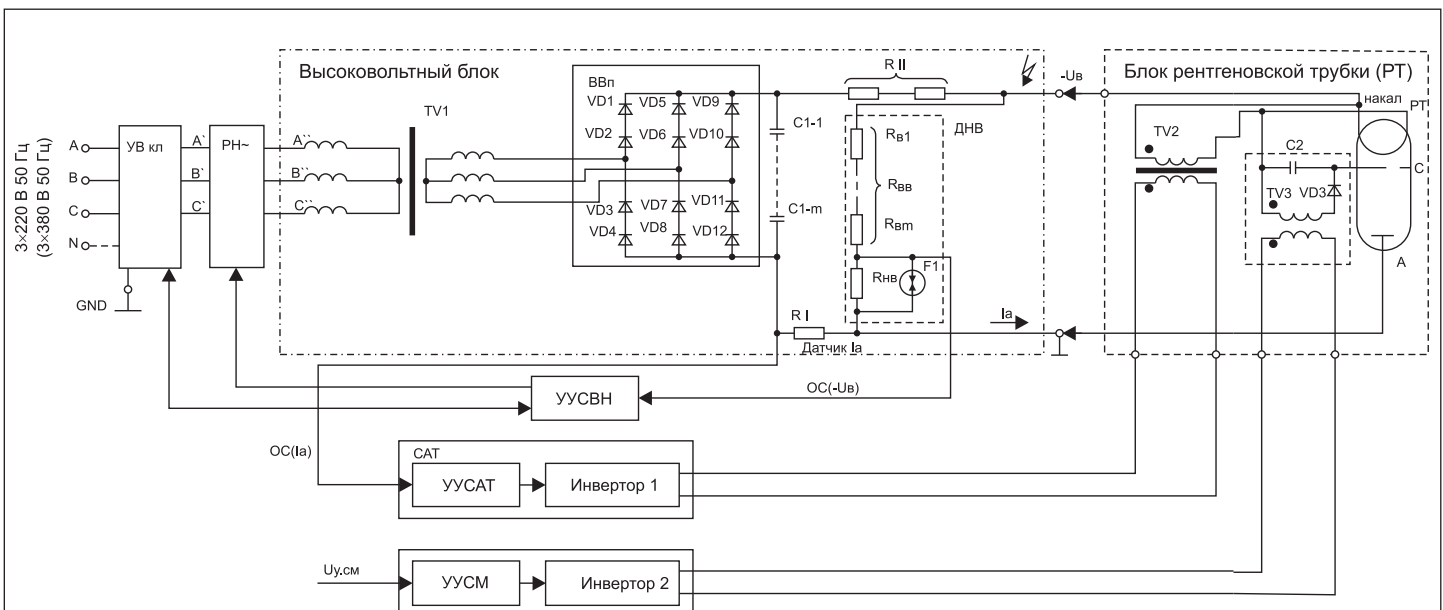
- недопустимые изменения питающего сетевого напряжения (выход за допуск, пропадание напряжения, перекоммутация фаз в трехфазной сети);
- токовые перегрузки и короткие замыкания (КЗ);
- перенапряжения на выходе (выходах);
- температурный перегрев регулирующих элементов (непрерывных или ключевых).

Защита ВВИП от токовых перегрузок и КЗ (в частности в ВВИП РТ) производится не только выключением электронного регулятора в соответствии с принятым алгоритмом. Дополнительно в выходную цепь источника часто последовательно включаются специальные токоограничительные резисторы определенной мощности и устойчивые к кратковременным перенапряжениям большой величины. При КЗ устройство защиты ВВИП не должно переходить в режим ограничения тока (как часто делается в НИП), а обязано произвести выключение источника. Это необходимо вследствие большого значения энергии выходного конденсатора ( $E_C = 0,5 \times C_{вых} \times U_{\beta}^2$ ) — порядка десятков–сотен джоулей и более.

Защита мощных ВВИП от перенапряжений по высоковольтному выходу осуществляется выключением регулирующих элементов. При этом может быть дополнительно установлен разрядник, который включается между высоковольтным выходом и корпусом ВВ-блока. Это возможно при условии, что низкопотенциальная выходная шина изолирована от корпуса (в частности, на передвижных объектах).

Применяются также дополнительные виды защиты, например в ИП для рентгеновских трубок:

- от обрыва цепи накала РТ, поскольку без такой защиты произойдет повреждение катода или нити накала за счет воздействия высокого напряжения при отсутствии анодного тока;
- от пропадания высокого напряжения, так как произойдет отказ всего измерительно-усилительного тракта рентгеновского аппарата;
- от превышения допустимой мощности на нагрузке, поскольку для РТ максимально допустимая мощность всегда меньше произведения максимальных значений  $U_{\beta}$  и  $I_a$ ;



**Рис. 1.** Схема мощного ВВИП с регулированием на стороне сетевого напряжения. УВ кл — устройство включения и контроля напряжения сети; РН~ — трехфазный регулятор переменного напряжения (силовой модуль); ТВ1 — трехфазный высоковольтный трансформатор; ВВп — высоковольтный выпрямитель; С1 — блок высоковольтных конденсаторов на выходе ВВп; R<sub>1</sub> и R<sub>II</sub> — датчик выходного (анодного) тока и токоограничительные резисторы соответственно; F1 — защитный газовый разрядник; ДНВ — делитель высокого напряжения (делитель ОС), с резисторами высоковольтного плеча R<sub>ВВ</sub> (R<sub>В1</sub>... R<sub>Вm</sub>) и низковольтного плеча R<sub>НВ</sub>; УУСВН, УУСАТ и УУСМ — устройства управления (УУ) СВН, САТ и сетевого модулятора (СМ) напряжения соответственно

- от нарушения или обрыва высоковольтного кабеля между источником и нагрузкой (при этом доступ к открытому ВВ-выходу на кабеле недопустим);
- от перегрева устройств-потребителей (например ЭВП) при прекращении принудительного охлаждения.

Особые требования предъявляются к схемотехнике и конструктивному выполнению высоковольтных блоков, иногда называемых генераторными устройствами. В ряде применений возникают особые требования по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) ВВИП не только с сетью электропитания, но и с электронными устройствами, входящими в состав аппаратуры. В частности, в работе [18] показано, что в РТ между электродами ввиду несовершенства вакуумной изоляции могут возникать микроразряды (сила тока от единиц до десятков миллиампер, продолжительность 0,1–100 мс), а также обратимые искровые пробои. Эти явления в литературе описываются жаргонным термином «лампа или трубка газит» и связаны с газовой выделением в них при прогреве. Кроме того, возможны разряды паразитной (погонной) емкости высоковольтного кабеля.

Измерение высокого напряжения требует применения специальных средств, поскольку диапазон стандартных измерительных приборов ограничен 1 кВ. К таким специальным измерительным средствам относятся:

- высоковольтные прецизионные калиброванные делители напряжения, позволяющие использовать стандартные измерительные приборы, например цифровые вольтметры;
- электростатические киловольтметры (в основном до 75–100 кВ);
- шаровые разрядники (в основном на напряжения более 100 кВ).

### Основные структуры высоковольтных источников питания

Рассмотрение будем вести для структур мощных источников высокого напряжения с питанием от сети переменного тока. В основном анализ проводится применительно к ВВИП РТ с мощностью 0,1–3(5) кВт и напряжением до 60 кВ, которые наиболее широко распространены, а также на основе практического опыта авторов. Но в принципе результаты анализа приемлемы и для ВВИП с другими показателями.

#### Высоковольтные источники питания с регулированием на стороне сетевого переменного напряжения

На рис. 1 представлена обобщенная схема мощного ВВИП с регулированием на стороне трехфазного сетевого напряжения  $3 \times 220$  В, 50 Гц («звезда») или  $3 \times 380$  В, 50 Гц («треугольник»). Для наглядности схема адаптирована для питания рентгеновской трубки.

В схеме, для общности, в УВкл объединены: силовой автоматический пускатель (или контактор), детектор контроля сетевого напряжения, элементы ограничения пусковых токов, а также сетевой фильтр помех. Высоковольтный блок образован высоковольтным трехфазным трансформатором TV1, высоковольтным выпрямителем ВВп на последовательно соединенных диодах в парах VD1–VD2, VD3–VD4, ..., VD11–VD12, резисторами  $R_1$  и  $R_{11}$ , делителем ДВН и защитным разрядником F1. В блоке РТ расположены высокопотенциальные элементы: накальный трансформатор TV2 для питания нити накала и сеточный трансформатор TV3 с выпрямителем на VD13 и конденсатором C2. Назначение остальных элементов на рис. 1 понятно без объяснений. Отметим, что РТ в описанной схеме может работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме — в зависимости от вида сеточной модуляции.

Развитие структур ВВИП с регулятором переменного напряжения РН\_ шло в зависимости от развития силовых компонентов. Исторически в качестве РН\_ первоначально использовался регулируемый автотрансформатор (вариатор), однофазный или трехфазный. Он приводился в действие исполнительным механизмом на основе маломощного электродвигателя со встроенным редуктором по сигналам с усилителя ОС. Достоинства такой структуры — универсальность, простота, отсутствие искажений формы кривой напряжения, возможность плавного пуска и регулирования высокого напряжения с любой заданной скоростью нарастания/спада. Основным недостатком, присущим всем электромеханическим регуляторам, — сравнительно быстрый износ контактных ламелей. Кроме того, автотрансформатор имеет неудовлетворительные массо-габаритные показатели. В ВВИП рентгеновских аппаратов промышленного назначения, например производства ОАО НПП «Буревестник», такие регуляторы с трехфазным автотрансформатором ( $3 \times 250$  В/ 20 А) использовались с 1950-х гг., и в меньшей степени — до середины 1990-х.

Регуляторы на магнитных усилителях в ВВИП применялись реже. Их достоинства: простота управления, отсутствие движущихся частей, незначительные искажения кривой напряжения, низкий уровень помех, высокая надежность и долговечность. Главный недостаток — большие величины габаритных размеров и массы (на частоте 400 Гц использование МУ более приемлемо).

Тиристорные регуляторы применялись со середины 1970-х гг. и применяются до сих пор. В однофазных сетях переменного тока используются тиристоры с  $U_{RRM} = 800–1000$  В, в трехфазных — тиристоры с  $U_{RRM} \geq 1000–1200$  В. Достоинства: сравнительная простота и универсальность, повышенный КПД, широкий диапазон мощностей. Основные недостатки — резкое искажение формы кри-

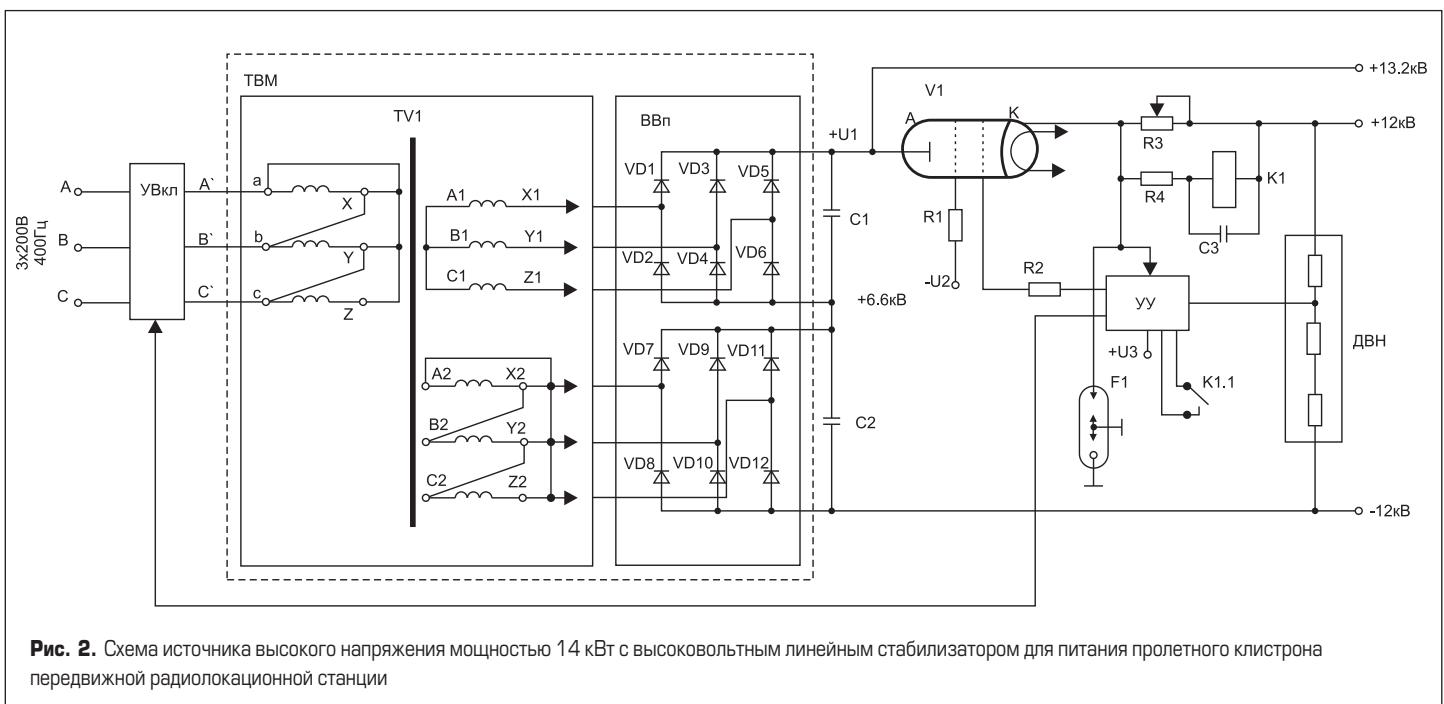


Рис. 2. Схема источника высокого напряжения мощностью 14 кВт с высоковольтным линейным стабилизатором для питания пролетного клистрона передвижной радиолокационной станции

вой напряжения, генерация существенных электромагнитных помех. Массо-габаритные показатели высоковольтного блока на частоте 50 (60 Гц) остаются по-прежнему низкими. Продолжающееся развитие и усовершенствование тиристорных структур — симисторов, оптотиристоров, оптосимисторов, запираемых тиристоров (GTO, GCT, IGCT, в том числе с оптическим управлением — фототиристоров) — способствует продлению «жизни» этого типа регуляторов, особенно в сверхмощных ВВИП. Основные параметры современных тиристорных структур приведены, например, в [19].

Отметим, что, если использовать описанные варианты регуляторов-стабилизаторов и добавить на выход ВВИП импульсные формирователи, то можно перейти от ВВИП с непрерывным выходным напряжением к ВВИП с импульсным выходом.

**Высоковольтные источники питания с регулированием на стороне высокого напряжения**

ВВИП с регулированием на стороне высокого напряжения встречаются гораздо реже. Принципиально в этой структуре возможно использование: а) высоковольтных линейных стабилизаторов после высоковольтного выпрямителя; б) регулируемых высоковольтных выпрямителей. И тот, и другой варианты ВВИП в настоящее время имеют ограничения по максимальному выходному напряжению и мощности, поскольку это связано с достигнутыми предельными значениями параметров приемно-усилительных ЭВП, транзисторов, тиристоров. В варианте б) дополнительно возникает сложная задача сглаживания НЧ-пульсаций значительной величины ввиду невозможности применения LC-фильтров. В то же время применение высоковольтных линейных стабилизаторов, несмотря на существенное снижение КПД, оправдано в тех случаях, когда имеются очень жесткие требо-

вания по величине коэффициента пульсаций  $K_{л(U\beta)}$  (до 0,0001% и менее) или/и по быстродействию.

В работе [5] описан ВВИП такого типа с мощностью 14 кВт, предназначенный для питания пролетного клистрона с сеточной кодоимпульсной модуляцией для передатчика РЛС. На рис. 2 изображена упрощенная схема такого ВВИП. Рассмотрим эту схему подробнее, поскольку в дальнейшем авторами данные источники анализироваться не будут.

Питание источника производится трехфазным переменным напряжением  $3 \times 200$  В, 400 Гц от системы автономного электропитания. Основной выход (+12 кВ) стабилизирован ламповым линейным стабилизатором. Другой выход (+13,2 кВ) нестабилизированный, с питанием непосредственно с выхода высоковольтного выпрямителя.

В трехфазном высоковольтном трансформаторе TV1 первичные обмотки А-Х, В-У, С-З соединены треугольником. Вторичные обмотки А1-Х1, В1-У1, С1-З1 и А2-Х2, В2-У2, А3-З3 соединены соответственно звездой и треугольником. Выбранная конфигурация включения обмоток позволяет в 12 раз повысить частоту пульсаций (до 4800 Гц) и тем самым облегчить их сглаживание. Выпрямление высокого напряжения производится двумя выпрямительными модулями, включенными последовательно (каскадно). «Верхний» модуль выполнен на выпрямительных столбах VD1-VD6 типа 2Ц203В ( $U_{RRM} = 10000$  В,  $I_{FM} = 1$  А,  $U_{FM} = 10$  В,  $f_{max} = 1$  кГц) и питается от обмоток А1-Х1, В1-У1, С1-З1. «Нижний» состоит из выпрямительных столбов VD7-VD12 того же типа и питается от обмоток А2-Х2, В2-У2, С2-З2. В сглаживающем С-фильтре высоковольтного выпрямителя конденсаторы C1, C2 включены последовательно и состоят из пяти параллельно соединенных конденсаторов по 0,047 мкФ.

В качестве регулирующего элемента применен импульсный модуляторный тетрод V1

типа ГМИ-32Б-1 ( $U_{a\max} = 40$  кВ,  $P_{a\max} = 2$  кВт,  $I_{a\max} = 100$  А — при  $t_{ui} = 10$  мкс). На экранную сетку V1 через резистор R1 подано стабилизированное напряжение +200 В (относительно катода). Усилитель ОС также ламповый на двойном триоде 6Н21Б, и с его выхода через резистор R2 напряжение подается на управляющую сетку триода. Устройство управления УУ (вся схема ОС) «подвешено» относительно выхода +12 кВ. Такой усилитель может обеспечить регулирование выходного напряжения в диапазоне 2–23 кВ постоянного тока. Защита стабилизированного выхода +12 кВ от превышения тока осуществляется посредством реле K1 типа РЭС-90 (ЯЛ4.550.000-36) с временем срабатывания не более 10 мс. Контакты реле переключают соответствующие цепи в устройстве управления, тем самым способствуя закрыванию регулирующего тетрода ГМИ-32Б-1. Ограничение выходного напряжения производится защитным неуправляемым разрядником F1 типа P-63. Охлаждение ВВИП РЛС воздушное и производится двумя вентиляторами (типа 2ДВО).

**Высоковольтные источники питания на основе регулируемых инверторов с повышенной частотой преобразования**

По сравнению с низкочастотными ВВИП с регулированием на стороне сетевого напряжения, источники на основе регулируемых инверторов с повышенной частотой преобразования имеют в несколько раз меньшие массо-габаритные показатели. В первую очередь, это объясняется значительным уменьшением размеров и массы высоковольтного блока. Сравним по этим показателям две конкретные модели источников, имеющие упомянутые структуры и одинаковые величины мощности и высокого напряжения. Отечественный низкочастотный (50 Гц) ВВИП типа ИРИС-М1 для питания РТ (начало 1990-х гг.) с симисторным регулятором, масляной изоляцией и водяным охлаждением ВВ-блока имеет выходные параметры:  $P_{вых} = 3$  кВт/3,5 кВт;

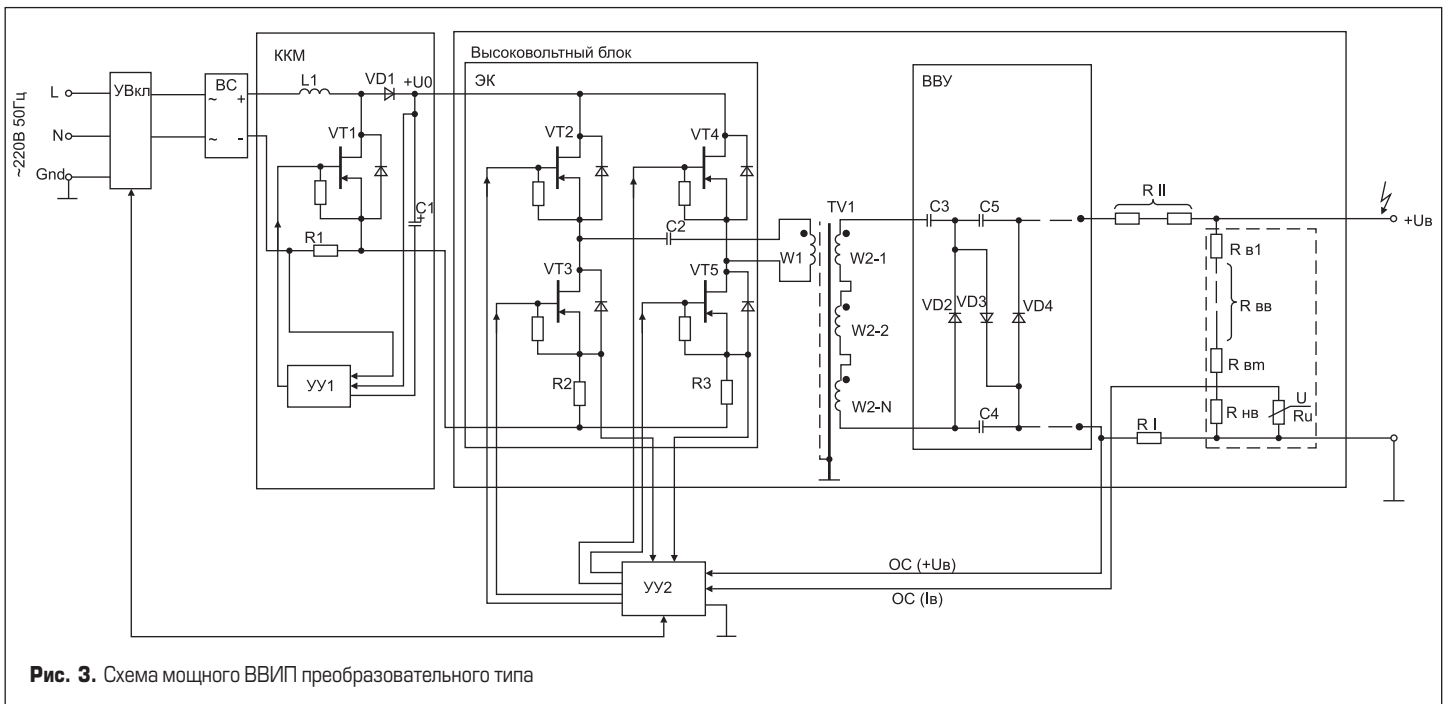


Рис. 3. Схема мощного ВВИП преобразовательного типа

$U_g = -2 \dots -60$  кВ;  $I_{g_{\text{вых}}} = I_a = 2-60$  мА. Его габаритные размеры —  $1200 \times 1130 \times 1000$  мм (объем  $V = 1360$  дм<sup>3</sup>), масса — 500 кг, т. е. удельные показатели составляют: по объему  $p_V = 2,6$  Вт/дм<sup>3</sup>, по массе —  $p_M \approx 6$  Вт/кг. В то же время зарубежный ВВИП типа Compact 3K5 фирмы Ital Structure (конец 1990-х гг.) [20] с импульсным регулируемым инвертором на повышенной частоте преобразования, твердотельной изоляцией и водяным охлаждением при тех же выходных параметрах имеет значительно лучшие показатели: размеры —  $483 \times 220 \times 600$  мм (объем  $V = 63,8$  дм<sup>3</sup>), масса — 45 кг. Удельные показатели: по объему —  $p_V = 55$  Вт/дм<sup>3</sup>, по массе —  $p_M \approx 78$  Вт/кг, т. е. разница огромна!

На рис. 3 приведена схема мощного ВВИП преобразовательного типа с питанием от однофазной сети переменного тока (для разнотипа). В схеме использован активный корректор коэффициента мощности (ККМ) и регулируемый мостовой инвертор. Такая схема при соответствующем выборе компонентов может обеспечить мощность ВВИП до 3–5 кВт.

Рассмотрим состав приведенного на схеме (рис. 3) источника высокого напряжения, взаимодействие его основных устройств и узлов. По-прежнему полагаем, что в УВкл объединены: силовой автоматический выключатель, детектор контроля напряжения сети, элементы ограничения пусковых токов, а также сетевой фильтр помех. Значение и параметры сетевого фильтра здесь существенно возрастают, поскольку расширяется частотный диапазон помех и их мощность. ККМ является повышающим (до напряжения  $U_0 = 375-400$  В) импульсным стабилизатором выпрямленного сетевого напряжения, который в ВВИП, так же как и в НИП, 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; величины  $I_D$ ,  $P_D$  и  $R_{DS_{on}}$  зависят от мощности ВВИП) со встроенным антипараллельным диодом; быстродействующий бустерный диод ( $U_{RRM} \geq 600$  В, например, 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). Заметим, что описанные устройства могут быть с успехом заменены готовым (покупным) блоком питания также преобразовательного типа, в который они уже встроены. Устройство управления УУ1 — обычно комбинация стандартной микросхемы ККМ-контроллера с буферным драйвером для управления мощным MOSFET (или IGBT).

Электронный коммутатор ЭК инвертора выполнен по мостовой схеме на транзисторах VT2–VT5 (также MOSFET с  $U_{DSS} \geq 600$  В), хотя в настоящее время 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 может использоваться для исключения

подмагничивания трансформатора, что характерно для мостовой схемы ЭК. Причина подмагничивания — наличие индуктивности рассеяния трансформатора  $L_S$  [21]. ВВ-трансформатор TV1 может быть выполнен на ферритовом сердечнике, способном эффективно работать в сильных магнитных полях. Высоковольтный выпрямитель-умножитель ВВУ для простоты представлен каскадным соединением несимметричных удвоителей напряжения [22]. Управление коммутатором, в зависимости от выбранной структуры и характера управления, может осуществляться методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для классических или резонансных схем, а также частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) для квазирезонансных схем преобразователей. Устройство управления УУ2, в отличие от УУ1, не удается выполнить целиком на стандартных микросхемах ШИМ- или ЧИМ-контроллеров с буферными драйверами. Это связано, во-первых, с необходимостью дополнительного усиления сигнала ОС ввиду значительного ослабления коэффициента передачи за счет коэффициента деления ДВН. Во-вторых, требуется формирование определенных величин постоянных времени усилительного тракта для СВН и САТ при работе, например, на рентгеновскую трубку. И, наконец, в-третьих, необходимо организовать некоторые специфические виды защиты ВВИП. Поэтому в УУ2 дополнительно входят: операционные усилители с формирующими цепями, триггеры, мультивибраторы, коммутаторы с различными уставками защиты: по мощности, температуре, обрыву цепей, (например, накала в ЭВП, ВВ-кабеля) и т. д. В принципе оба устройства УУ1 и УУ2 могут быть с успехом заменены одним УУ на основе современных микроконтроллеров (с дополнительными элементами), о чем сказано, например, в работах [10, 23].

ДВН в принципе аналогичен ранее рассмотренным делителям (схемы на рис. 1 и 2). Отличие состоит в том, что низковольтное плечо  $R_{НВ}$  делителя для защиты от перенапряжений зашунтировано не разрядником, а варистором  $R_U$ . О такой возможности подробнее, а также об особенностях построения высоковольтных блоков и их компонентов будет рассказано в продолжении статьи. Авторы признательны известному специалисту по средствам электропитания к. т. н. Эраносяну Саркису Аветисовичу за ценные советы при подготовке статьи и ее редактировании. Также авторы выражают благодарность Романовскому Юрию Александровичу за помощь в оформлении графических материалов.

*Продолжение следует*

## Литература

1. Разевиг Д. В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия. 1976.
2. Костиков В. Г., Никитин И. Е. Источники электропитания высокого напряжения. М.: Радио и связь. 1986.

3. Криштафович И. А. Транзисторные системы высоковольтного электропитания. Киев: Препринт. 1988.
4. Березин О. К., Костиков В. Г., Криштафович И. А. и др. Модульные системы высоковольтного вторичного электропитания. Киев: Препринт. 1989.
5. Березин О. К., Костиков В. Г., Шахнов В. А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: Три Л. 2000.
6. Блинов Н. Н. Рентгеновские питающие устройства. М.: Энергия. 1980.
7. Акимов А. В. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования (38). 2001. № 3.
8. Полищук А. Г. Вопросы разработки твердотельных импульсных модуляторов для электровакуумных приборов СВЧ // Современная электроника. 2005. № 3.
9. Гусев Н. С., Казанцев В. И., Млинник А. Ю., Мониин С. В. Твердотельная высоковольтная энергетическая система для электронно-лучевой сварки // Электрическое питание. 2006. № 3.
10. Владимиров Е. Н., Ланцов В. В., Лебедева О. К. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора // Современная электроника. 2007. № 7.
11. www.svetlana-x-ray.ru
12. Клюев В., Соснин Ф., Авертс В., Болен Р., Меестр П. и др. Рентгенотехника: Справочник в 2-х книгах. Кн.1. М.: Машиностроение. 1992.
13. www.spellmanhv.com
14. www.deantechnology.com
15. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
16. Гинзбург А. И. Критерии статического подбора выпрямителей с емкостной реакцией фильтров // Вопросы радиоэлектроники. Серия XII. Общетеchnическая. 1965. Вып. 26.
17. Береза В. Ш. Рентгеновская трубка как объект взаимосвязанного регулирования двух параметров // Аппаратура и методы рентгеновского анализа (АМРА). 1978. № 21.
18. Покрываило А. Д., Власов К. К., Магдин Ю. А., Старчиков А. Н. Об электромагнитной совместимости высоковольтных источников питания рентгеновских аналитических аппаратов в условиях высоковольтных разрядов // АМРА. 1992. № 40.
19. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 1.
20. www.italstructures.com
21. Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2007. № 1.
22. Гольдина Р. А., Девонисский В. Ю. Высоковольтные выпрямители малой мощности. М.: Энергия. 1976.
23. Владимиров Е., Ланцов В. Импульсные источники питания большой мощности с микропроцессорным управлением // Современная электроника. 2009. № 1.