

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 $K_{n(Ug)} = 0,1-1\%$;
- 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 δU_{Σ} — не более 1%;
- допустимый коэффициент пульсаций $K_{n(Ug)}$ — не более 0,0001% (или 10^{-6}).

Такое высокое требование к величине $K_{n(Ug)}$ 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 — 40×61 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.

3. 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.

4. 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 δU_{Σ} , 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.

5. 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_{θ} :
 - 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_{θ} ;
- с части выходного высокого напряжения — kU_{θ} ($k < 1$), 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_{θ} 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
Отечественные		
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)
Зарубежные		
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_{θ} до 100 кВ; ток нагрузки до 40 мА; мощность до 500 Вт
	DC/DC-преобразователи	U_{θ} 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_{β} во времени должно несколько опережать нарастание I_{β} .

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_{β} (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_{β} и I_a ;

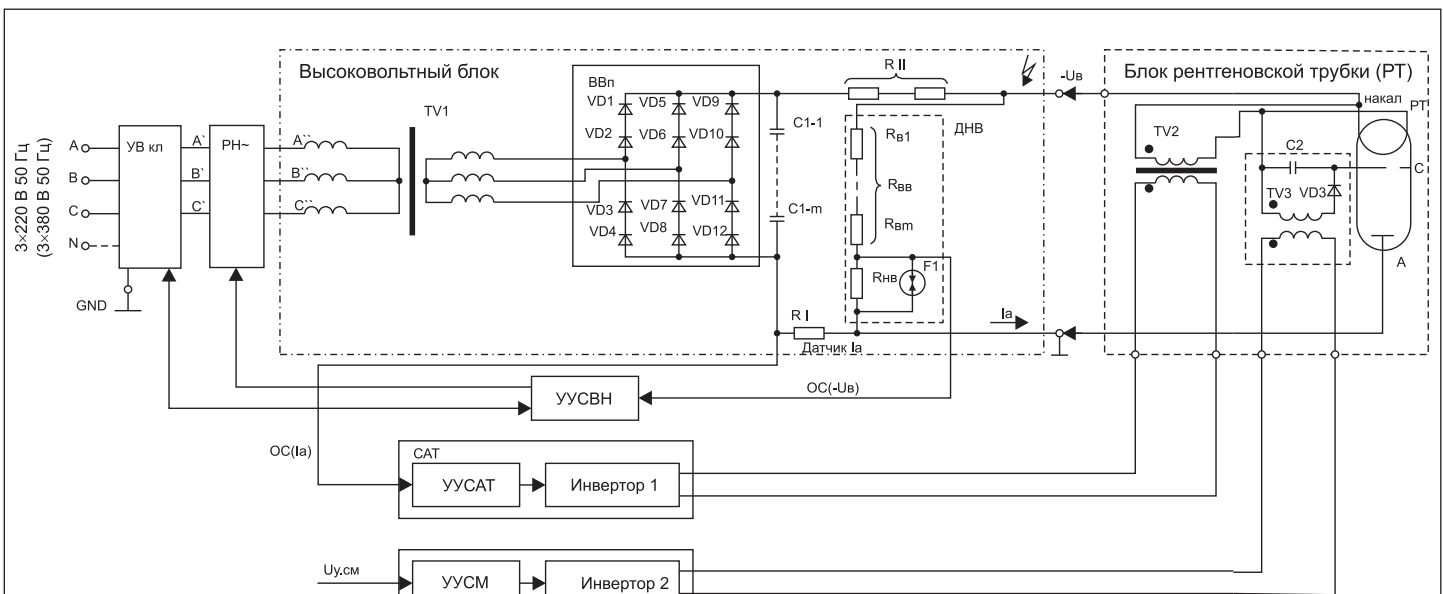


Рис. 1. Схема мощного ВВИП с регулированием на стороне сетевого напряжения. УВ кл — устройство включения и контроля напряжения сети; РН~ — трехфазный регулятор переменного напряжения (силовой модуль); ТВ1 — трехфазный высоковольтный трансформатор; ВВп — высоковольтный выпрямитель; С1 — блок высоковольтных конденсаторов на выходе ВВп; R_б и R_п — датчик выходного (анодного) тока и токоограничительные резисторы соответственно; F1 — защитный газовый разрядник; ДВН — делитель высокого напряжения (делитель ОС), с резисторами высоковольтного плеча R_{бВ} (R_{б1... R_{бМ}) и низковольтного плеча R_{нВ}; 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 3×220 В, 50 Гц («звезда») или 3×380 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_{12} , 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 (3×250 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-

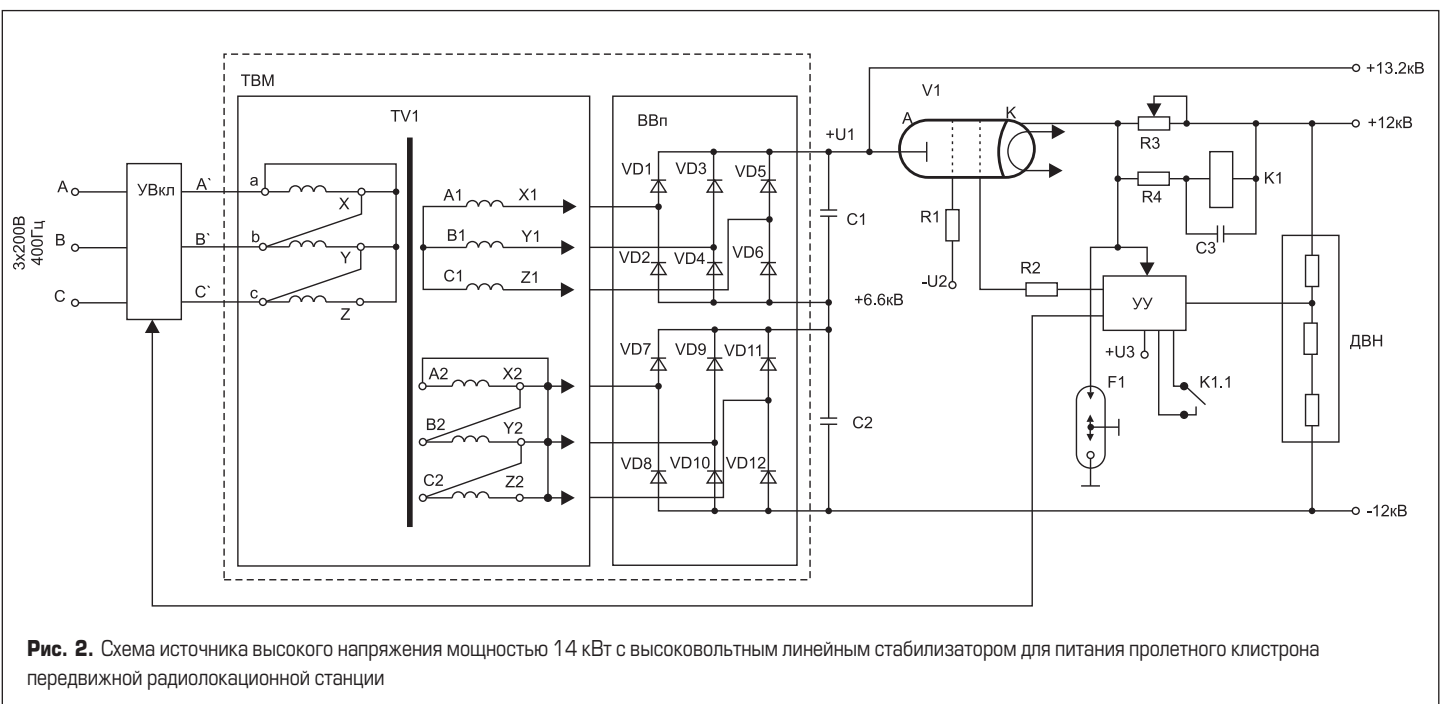


Рис. 2. Схема источника высокого напряжения мощностью 14 кВт с высоковольтным линейным стабилизатором для питания пролетного клистрона передвижной радиолокационной станции

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, оптоотиристоров, 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 $3 \times 200 \text{ В}$, 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–Z соединены треугольником. Вторичные обмотки А1–X1, В1–У1, С1–Z1 и А2–X2, В2–У2, А3–Z3 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 ($U_{RRM} = 10000 \text{ В}$, $I_{FM} = 1 \text{ А}$, $U_{FM} = 10 \text{ В}$, $f_{max} = 1 \text{ кГц}$) и питается от обмоток А1–X1, В1–У1, С1–Z1. «Нижний» состоит из выпрямительных столбов VD7–VD12 того же типа и питается от обмоток А2–X2, В2–У2, С2–Z2. 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 ($U_{a \max} = 40 \text{ кВ}$, $P_{a \max} = 2 \text{ кВт}$, $I_{a \max} = 100 \text{ А}$ — при $t_{ui} = 10 \text{ мкс}$). 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: $P_{вых} = 3 \text{ кВт}/3,5 \text{ кВт}$;

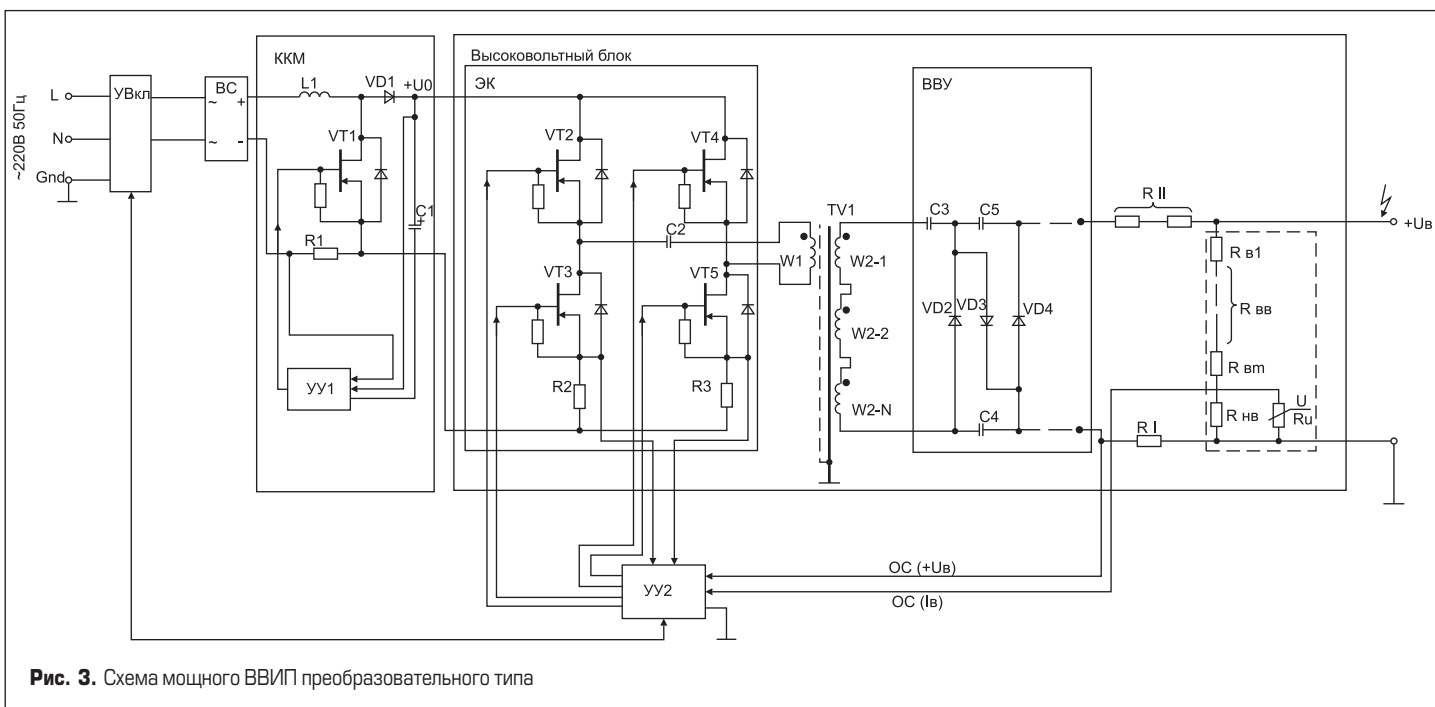


Рис. 3. Схема мощного ВВИП преобразовательного типа

$U_g = -2 \dots -60$ кВ; $I_{g_{\text{вых}}} = I_a = 2-60$ мА. Его габаритные размеры — $1200 \times 1130 \times 1000$ мм (объем $V = 1360$ дм³), масса — 500 кг, т. е. удельные показатели составляют: по объему $p_V = 2,6$ Вт/дм³, 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 $V = 63,8$ дм³), масса — 45 кг. Удельные показатели: по объему — $p_V = 55$ Вт/дм³, 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, компараторы 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.

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 ($+60\text{...}+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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 $T = -60\text{...}+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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: $U^* \geq 15\text{ кВ/мм}$ ($T = +20\text{...}+25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 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 $T = -60\text{...}+200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 ($3 \times 200\text{ В}/400\text{ Гц}$) и ВВ-блока в целом можно указать на трансформаторно-выпрямительный модуль (ТВМ) в ВВИП на $12\text{ кВ}/14\text{ кВт}$ [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)

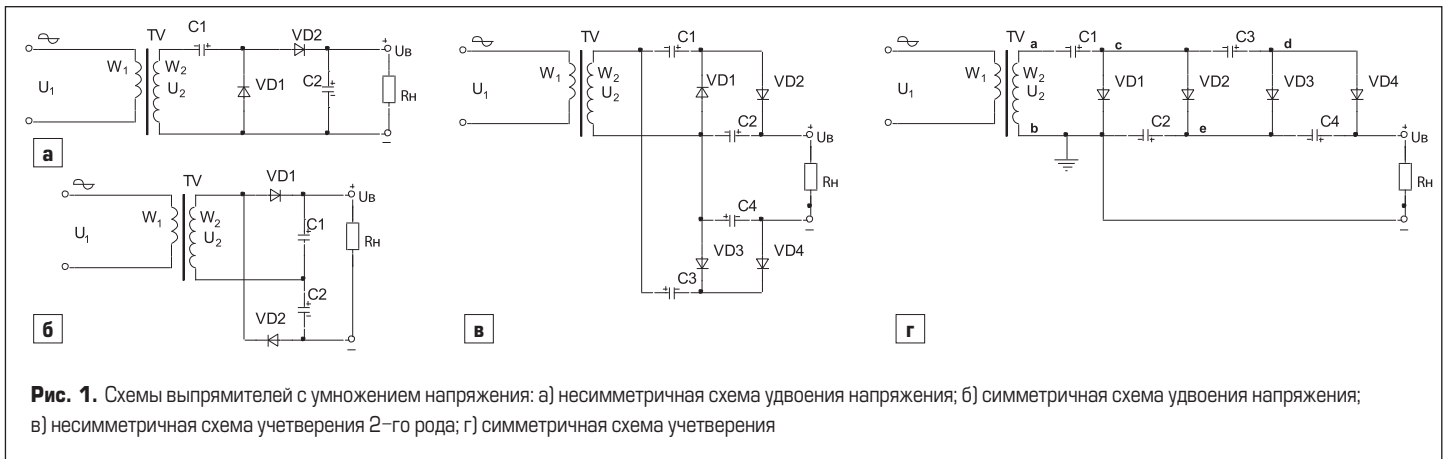


Рис. 1. Схемы выпрямителей с умножением напряжения: а) несимметричная схема удвоения напряжения; б) симметричная схема удвоения напряжения; в) несимметричная схема учетверения 2-го рода; г) симметричная схема учетверения

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

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

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

Представляет несомненный интерес информация о зарубежных резисторах, изготавливаемых на основе военных стандартов MIL-STD. Резисторы серии СМН 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 СМН 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 ($U_{макс}$).

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 ($TKC \leq \pm 0,005-0,015\%/^{\circ}\text{C}$; $U_{макс} = 750 \text{ В}$), всего 44 шт., и С2-29 1 Вт/82,5 кОм ($TKC \leq \pm 0,0025-0,0075\%/^{\circ}\text{C}$; $U_{макс} = 700 \text{ В}$), 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 $\pm/R, \%$)	$TKC (\alpha_{TR}), \pm\%/^{\circ}\text{C}$	$P_{рас}, \text{Вт}$	$U_{макс} = U_{макс-г} \text{ кВ}/\text{кВ} \text{ эф}$	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); $K_e(U) \leq 2 \times 10^{-5} \%/B$; $R_{из} \geq 10000 \text{ ГОм}$; $T_{макс} = +225 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (со снижением $P_{рас}$); габариты $\varnothing 8,2 \times 26,0-153,7 \text{ мм}$
Серия СМН: СМН-1/4...СМН-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; $T_{макс} = +155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (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 термоконтактором (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).

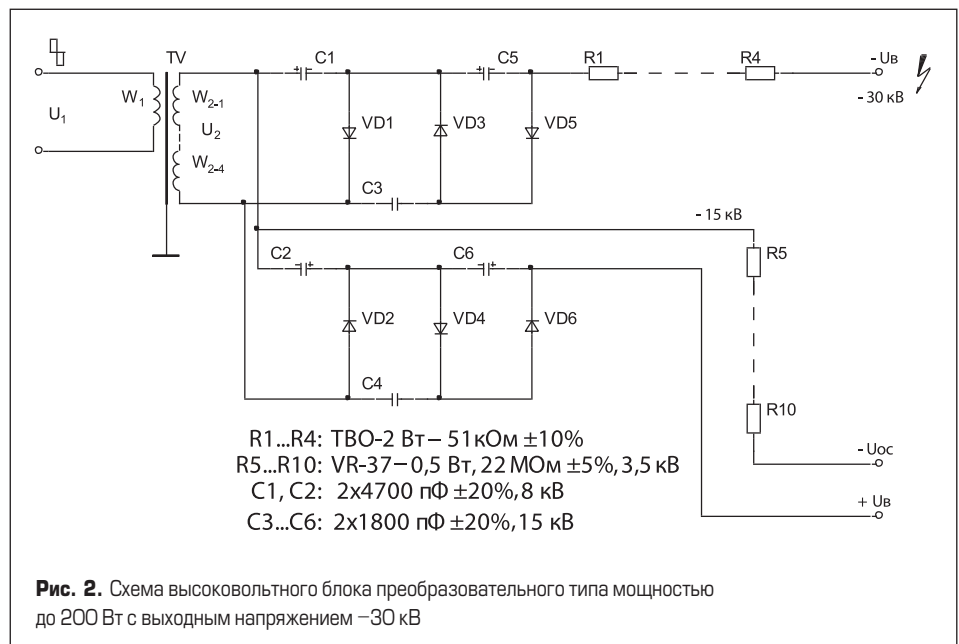


Рис. 2. Схема высоковольтного блока преобразовательного типа мощностью до 200 Вт с выходным напряжением –30 кВ

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., Девониский 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

Продолжение. Начало в №5' 2010

Мощные высоковольтные источники питания

Часть 3

В очередной статье цикла дан обзор высоковольтных источников питания (ВВИП) с импульсным выходом для работы с мощными электровакуумными приборами. Приведены схемы ВВИП для рентгеновских трубок, в том числе преобразователей с микропроцессорным управлением. Описан алгоритм управления, особенности функционирования ВВИП, его устройств и компонентов.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Евгений Владимиров,
к. т. н.

envlad@list.ru

В работе [1] приводятся сведения об областях применения мощных высоковольтных источников питания (ВВИП) и их классификация. Рассмотрены существенные отличия ВВИП от низковольтных источников питания. Дан обзор структур построения мощных ВВИП в аспекте их развития: с регулированием на стороне переменного (сетового) напряжения низкой частоты и/или с регулированием на стороне выпрямленного высокого напряжения. Описано использование регулируемых преобразователей с высоковольтным выходом, работающих на повышенной частоте (десятки килогерц).

В работе [2] отмечаются особенности 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 характеристики некоторых изоляционных материалов.

В настоящей статье рассмотрим некоторые ВВИП большой мощности с импульсным выходом, которые для краткости в дальнейшем будем называть термином «импульсные ВВИП», или высоковольтные импульсные генераторы. По мнению авторов, в случае, когда образование импульсов происходит за счет модуляции высокого напряжения, более уместен термин «высоковольтные импульсные модуляторы». Импульсные ВВИП применяются для питания мощных электровакуумных приборов: клистронов и магнетронов, но в большей степени — для рентгеновских трубок (РТ) и т. д. В общем аспекте основные области применения таких ВВИП:

- испытательные установки для генерации мощных высоковольтных (ВВ) импульсов в специальных целях;
- рентгеноимпульсные аппараты для диагностики и дефектоскопии (проверка качества сварных швов, степени изношенности различных металлоконструкций и т. д.);

- рентгенолюминесцентные сепараторы (сортировщики) для выделения алмазов в алмазосодержащей руде и т. д.

В качестве примеров использования мощных высоковольтных генераторов в специальных установках можно указать:

- применение таких генераторов для проверки импульсной помехозащищенности источников вторичного электропитания (ИВЭ) и силовых устройств (СУ); параметры импульсов: амплитуда до $U_{\max} = 2-4$ кВ, длительность импульсов $t_{\text{и}} = 0,01-100$ мкс на сетевом входе ИВЭ или СУ;
 - использование в системе электропитания ионного источника линейных ускорителей (например, $U_{\max} = 20$ кВ на нагрузке 20 кОм, $t_{\text{и}} = 200$ мкс, максимальная частота следования импульсов $f_{\max} = 50$ Гц);
 - применение в установках для электроразрядных технологий ($U_{\max} = 300$ кВ, $t_{\text{и}} = 300$ нс, $f_{\max} = 10$ Гц; максимальная энергия на нагрузке 300 Дж) и т. д.
- В статье будем конкретно рассматривать рентгеноимпульсные аппараты и рентгенолюминесцентные сепараторы, исходя из практики работы предприятия и личного опыта авторов.

Высоковольтные источники питания с импульсным выходом — основа рентгеноимпульсных аппаратов

В СССР в начале 1960-х гг. выпуск рентгеноимпульсных аппаратов начинает расти в связи с развитием исследований высокоскоростных процессов в механике, биофизике, баллистике при исследованиях взрывов и т. д. Значительно возросло их применение в промышленной дефектоскопии, где раньше использовались ультразвуковые дефектоскопы. Основой рентгеноимпульсных аппаратов являются импульсные ВВИП. Кроме того, в состав этих аппаратов входят устройства рентгенографии, например, с помощью высококонтрастных рентгеновских плен-

нок или рентгеновских пленок с флуоресцентными усиливающими экранами.

Одним из основных отечественных предприятий, начавшим разработку и последующий выпуск рентгеноимпульсных аппаратов, было ленинградское НПО «Буревестник» (ныне ОАО «НПП «Буревестник») [3]. Усилиями ведущих специалистов этого предприятия — лауреатов Государственной премии СССР: д. т. н. Комяка Н. И., к. т. н. Пеликса Е. А., Курбатова В. М. — был налажен выпуск сначала аппаратов серии ИРА, например ИРА-3, ИРА-5 [4], а затем аппаратов серий МИРА и ДИНА. Впоследствии в составе НПО «Буревестник» на базе отдела рентгеноимпульсной техники (руководитель Пеликс Е. А.) был создан научно-производственный комплекс «Рентгеноимпульс», а в конце 1980-х гг. — ООО «Спектрофлэш». Эта фирма разработала серию современных аппаратов АРИНА, которые используют явление взрывной эмиссии в рентгеновской трубке с холодным катодом. Достоинствами их являются чрезвычайно малые вес и габариты, простота в эксплуатации, возможность питания как от стационарных сетей переменного тока 220 В/50 Гц, так и от автономных источников постоянного тока. Отметим возможность одновременного их использования как для направленного, так и для панорамного просвечивания. ООО «Спектрофлэш» на основе аппарата АРИНА-1 также разработало и выпускает кроулеры — самоходные рентгеновские установки для перемещения внутри трубопроводов и сканирования их. Кроулеры выполняют команды перемещения, остановки и снятия рентгенограммы. Они состоят из рентгеновского излучателя, самоходной тележки для перемещения излучателя внутри трубопровода и командного аппарата, располагаемого снаружи трубы. Способ управления кроулером с помощью импульсного аппарата защищен российским патентом.

В таблице 1 для примера приведены основные параметры некоторых импульсных ВВИП и рентгеноимпульсных аппаратов на их основе [5, 6]

В настоящее время в России подобные аппараты выпускаются не только ООО «Спектрофлэш». В частности, ООО «Экспериментальный завод импульсной техники» (Москва) [7] выпускает серию рентгеноимпульсных аппаратов (РА) с газовой изоляцией типа САРМА в четырех модификациях: САРМА-300, САРМА-500, САРМА-300У, САРМА-ХР. Аппараты предназначены для проведения рентгенографического контроля

сварных соединений и конструкций, нефтяных и газовых трубопроводов и других объектов. Они могут работать в нестационарных и стационарных условиях, в труднодоступных местах. Из этой линейки самым компактным является РА типа САРМА-300 с анодным напряжением 300 кВ. Он позволяет контролировать дефекты в материале с максимальной эквивалентной толщиной до 60 мм по стали.

Переносные импульсные РА серии АРИНА (АРИНА-1, АРИНА-3, АРИНА-5, АРИНА-7), разработанные ООО «Спектрофлэш», производятся также компанией ООО «УЦА Комплект» [8]. Они предназначены для рентгенографического контроля сварных соединений и конструкций, трубопроводов. Так, аппарат АРИНА-7 имеет рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки 250 кВ. Он позволяет определять дефекты по стали толщиной 40 мм — при рентгенографировании с помощью высококонтрастных рентгеновских пленок, и до 80 мм — с помощью рентгеновских пленок с флуоресцентными усиливающими экранами. Электропитание этого РА может производиться как от однофазной сети переменного тока 220±22 В/50±1 Гц, так и от батареи аккумуляторов 24 В. Аппараты могут применяться в жестких условиях эксплуатации: при температуре -40...+50 °С, атмосферном давлении 101,3±5,3; 101,3-25,6 кПа, относительной влажности воздуха до 98%.

К особому виду рентгеноимпульсной техники, над которой авторам пришлось работать продолжительное время, относятся люминесцентных сепараторы (сокращенно ЛС, или сортировщики) алмазосодержащей руды. К числу таких аппаратов, на самом деле являющихся сложными промышленными установками, относятся, например, ЛС-20-05Н, ЛС-20-04-3Н, ЛС-Д-4-03Н, ЛС-ОД-4-04Н [3]. Большой вклад в проектирование и выпуск сепараторов в ОАО «НПП «Буревестник», начиная с 1967 г., внесли ведущие специалисты и организаторы предприятия лауреаты Госпремии СССР: д. т. н. Комяк Н. И., к. т. н. Левитин А. И., Межевич А. Н., Баранов А. Т., а также к. т. н. Казаков Л. В., Морозов В. Г., Райзман В. Ш., Бубырь Е. В., Местер Ю. А. и другие. Сепараторы производства ОАО «НПП» Буревестник работают на алмазных приисках в Якутии и на Урале, а также в Анголе.

ВВИП рентгеновских трубок в люминесцентных сепараторах работает в режиме генерации периодических импульсов мощностью до 12 кВт с амплитудой 10-35 кВ при низкой

частоте 250-2000 Гц и скважности Q = 5-8. Алмазы, облученные во время импульса рентгеновским излучением, начинают люминесцировать. В паузе импульсов происходит регистрация и обработка этого излучения рентгеновскими детекторами на основе фотоэлектронных умножителей. Затем обнаруженные алмазы, движущиеся в потоке материала, отсекаются струей сжатого воздуха в приемный бункер. В принципе возможно обнаружение и сортировка подобными сепараторами и других ценных минералов.

Основные схемы формирования импульсов в ВВИП

Предварительно отметим, что параметры импульсных ВВИП находятся в широком диапазоне напряжений и токов: амплитуда высокого напряжения U_n — 10(15) кВ-1,5 МВ, ток нагрузки I_n — от десятков мА до единиц кА в импульсе. Используются как одиночные импульсы, так и периодические их последовательности. Диапазон длительностей импульсов — от единиц нс до сотен мкс при частоте следования импульсов от единиц до сотен Гц.

Наиболее распространенными схемами формирования импульсов в ВВИП с импульсным выходом, или высоковольтных импульсных модуляторов, являются [5]:

- а) схемы разряда на нагрузку предварительно заряженного конденсатора через импульсный трансформатор;
- б) то же с обостряющим неуправляемым разрядником-обострителем импульсов на вторичной стороне трансформатора;
- б) схемы с формирующими линиями (цепями) и импульсными трансформаторами;
- г) схемы разряда непосредственно на нагрузку конденсатора, предварительно заряженного высоким напряжением, через коммутирующий ВВ-узел (коммутатор или разрядный ВВ-ключ). Для определенности схемы с импульсными трансформаторами (рис. 1а, б, в) будем называть схемами первого рода, а схемы без импульсного трансформатора (рис. 1г) — схемами второго рода.

В схеме импульсного ВВ-генератора (рис. 1а) источник постоянного напряжения (ИПН) через токоограничительный резистор R и блокирующий диод VD заряжает емкостной накопитель (конденсатор) C с малой паразитной индуктивностью. Импульс напряжения на первичной обмотке w_1 повышающего импульсного трансформатора TV формируется при подаче поджигающего напряжения на быстросрабатывающий управляемый коммутатор F. В качестве коммутатора могут использоваться управляемые разрядники, водородные импульсные тиратроны, тиристоры, полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) или биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT — в зависимости от требуемых параметров импульса (фронта и длительности). К вторичной обмотке трансформатора w_2 на стороне высокого напряжения для определенности в качестве нагрузки показана рентгеновская

Таблица 1. Основные параметры импульсных ВВИП и рентгеноимпульсных аппаратов МИРА и ДИНА на их основе

Характеристики	Параметры ВВИП для аппаратов				
	МИРА-1д	МИРА-2д	МИРА-3д	ДИНА-1	ДИНА-2
Амплитуда напряжения, кВ	100	200	300	100	100
Схема формирования импульса	Разряд через импульсный трансформатор и обостритель на двухэлектродную рентгеновскую трубку				
Длительность одиночного импульса, нс	10	15	20	10	10
Частота следования импульса, Гц	20	10	5	50	100
Аппарат					
Назначение	Дефектоскопия			Диагностика	
Диаметр фокуса, мм	2,0	3,0	3,0	2,0	2,0
Масса комплекта, кг	12	15	25	17	20

трубка (РТ) — с анодной или катодной модуляцией в зависимости от типа. Применение трансформатора позволяет использовать коммутаторы и разрядные конденсаторы с относительно невысоким рабочим напряжением. Коэффициент трансформации импульсного трансформатора $K_{тр}$ обычно не превышает 10–15, поскольку его дальнейшее увеличение малоэффективно из-за резкого возрастания индуктивности рассеивания L , и собственной емкости C , трансформатора. Отметим, что, дифференцируя импульс разряда конденсатора C , трансформатор TV формирует импульс напряжения, близкий по форме к прямоугольному.

В схеме на рис. 1б дополнительно на стороне высокого напряжения введен разрядник-обостритель $F2$, который укорачивает длительность переднего фронта рентгеновского импульса, обеспечивая высокую стабильность радиационного выхода трубки. Если напряжение первой половины трансформируемого импульса несколько превышает напряжение пробоя разрядника-обострителя, то длительность переднего фронта рентгеновского импульса в основном определяется временем переключения обострителя и паразитной емкостью PT . Разрядник-обостритель определяет срок службы рентгеноимпульсного аппарата, поскольку именно он вырабатывает чрезвычайно короткий импульс высокого напряжения, обеспечивающий образование электронной плазмы в районе катода рентгеновской трубки. Длительность импульса и его задний фронт зависят от соотношения параметров $L1C1$ и $L2C2$ первичного и вторичного контуров и сопротивления трубки. Металлический корпус разрядника $F2$ совместно с корпусом высоковольтного блока образуют конструктивную выходную емкость $C2$, которая разряжается через рентгеновскую трубку. Именно величина этой емкости определяет амплитуду импульса тока в трубке, а следовательно, и интенсивность рентгеновской вспышки. Так, при использовании в аппарате АРИНА-3 рентгеновской трубки типа ИМА5-320Д (максимальное напряжение 320 кВ) с отечественным разрядником Р-43 (табл. 2) амплитуда импульса тока может составлять 500–1000 А при длительности 10–20 нс. При этом частота следования импульсов составляет 5–20 Гц. Таким образом, средний ток через РТ при этом находится в пределах 0,1–0,5 мА. В отличие от классических накаливаемых трубок, в трубках с взрывным катодом средний ток, так же как и высокое напряжение, не регулируется и определяется только частотой следования импульсов излучения.

Схема, приведенная на рис. 1в, применяется в генераторах рентгеновских импульсов наносекундного диапазона. В такой схеме используются распределенные параметры формирующих линий (ФЛ) задержки, паразитные параметры которых уже не ухудшают характеристики импульсов, а используются для передачи импульсов вдоль всей длины линии. При использовании длинных линий важно обеспечить согласование реактивных сопротивлений соединяемых элементов, чтобы не было отраженных волн от концов линии.

В схеме на рис. 1г высокое напряжение на конденсаторе C коммутируется высоковольтным управляемым разрядником F и выходной ВВ-импульс без трансформатора поступает на нагрузку.

Рассмотрим особенности и параметры основных узлов и компонентов ВВИП с импульсным выходом.

Основные узлы и компоненты импульсных ВВИП

Рентгеновские импульсные трубки

В рентгеноимпульсных аппаратах с наносекундными длительностями импульса используются специальные рентгеновские трубки. В Советском Союзе первые импульсные РТ были разработаны в 1950-х гг. Они были двухэлектродные с игольчатым анодом и работали при вакууме 10^{-3} Па. Возбуждение электродов в таких трубках происходит под действием вакуумного пробоя межэлектродного промежутка. В дальнейшем происходило совершенствование разрядных трубок, в том числе отпаянных, с холодным катодом, как двухэлектродных, так и трехэлектродных, работающих преимущественно с вакуумным пробоем. Анод в таких РТ выполнялся

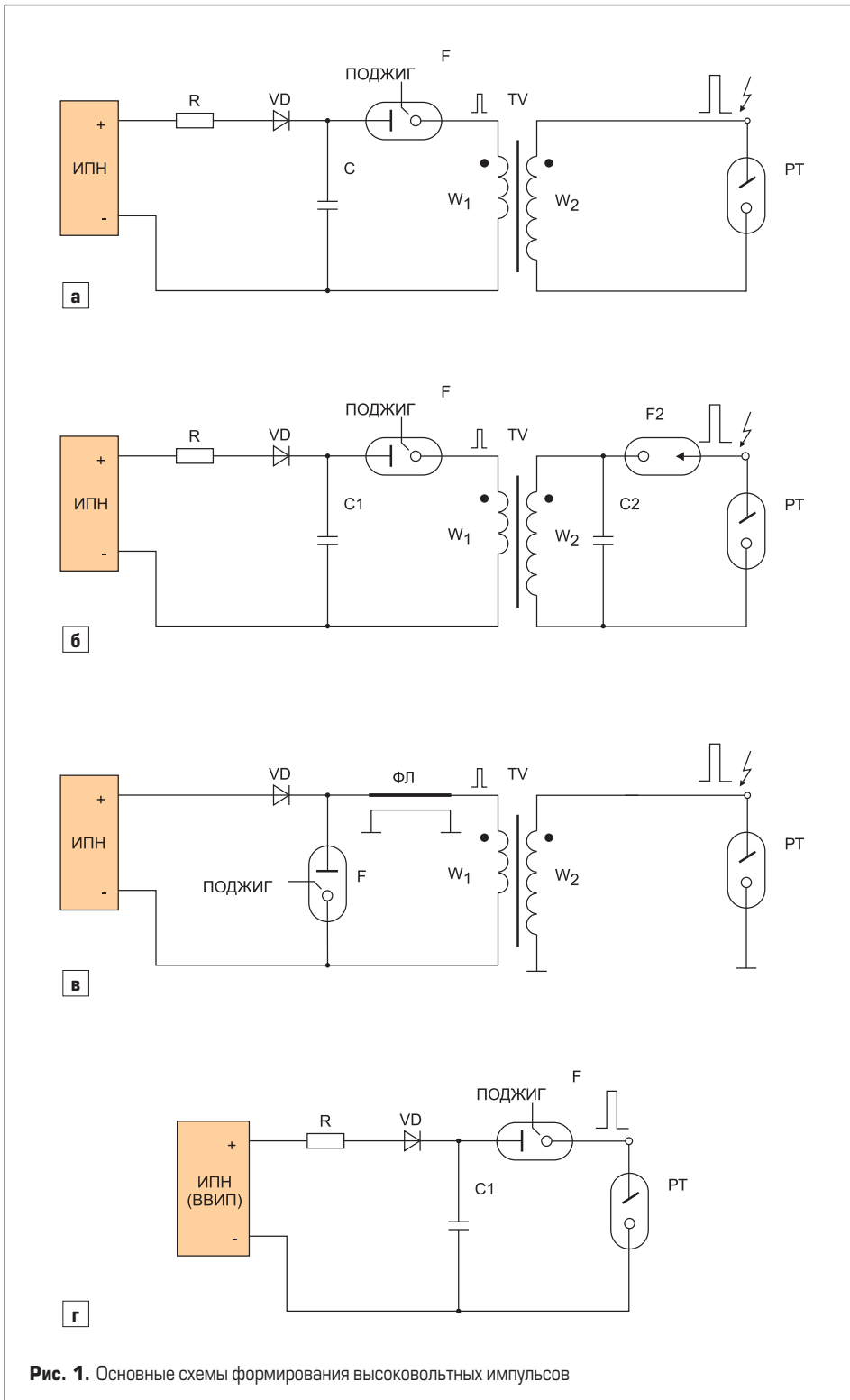


Рис. 1. Основные схемы формирования высоковольтных импульсов

в виде вольфрамовой иглы, а катод — в виде кольца или диска. Вакуум обеспечивался на уровне 10^{-3} – 10^{-4} Па. К трубкам такого типа относились, в частности, ИА3-250, ИА3-350, ИА1-1500 и др. [4].

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются два типа импульсных РТ [6]: игольчатая трубка типа ИМА 5-320Д (максимальное анодное напряжение $U_{a\max} = 320$ кВ, длина 130 мм) и трубка прострельного типа ИМА 2-150Д ($U_{a\max} = 150$ кВ, длина 40 мм). Первая трубка применяется в аппаратах АРИНА-3, АРИНА-5 и АРИНА-7. Трубка ИМА 2-150Д применена в аппарате АРИНА-1. Как та, так и другая описанные трубки имеют существенно меньшие габариты по сравнению с классическими накальными. Объясняется это тем, что при столь коротких воздействиях высокого напряжения (10 нс) длина стеклянного изолятора сокращается в несколько раз по сравнению с изоляторами в трубках с постоянным напряжением. Длина же изолятора определяет геометрические размеры любой трубки.

Разрядники

Для получения фронтов минимальной длительности (в экстремальных случаях — около 1 нс и менее) коммутаторы должны иметь минимальные паразитные параметры (индуктивности, емкости) и, соответственно, минимальные значения времени задержки и времени срабатывания. Такие предельные параметры обеспечиваются как физикой протекающих процессов, так и конструктивными особенностями коммутаторов, которые должны гарантировать высокую повторяемость импульсов и т. д. В качестве импульсных коммутирующих узлов и компонентов рассматриваемых ВВИП, как упоминалось выше, используются искровые разрядники. Простейшим типом является двухэлектродный разрядник. Трехэлектродный разрядник образуется введением управляющего электрода и иногда называется трехэлектродным управляемым ВВ-реле. При расположении управляющего электрода вне рабочего промежутка он создает искру, которая обеспечивает условия для пробоя этого промежутка.

Отечественные газоразрядные коммутирующие приборы выпускаются ОАО «Плазма» НИИ ГП (г. Рязань) [9], крупнейшим в России и СНГ разработчиком и производителем газоразрядной техники. НИИ ГП был основан в 1959 г. и стал ведущей организацией, занимающейся разработкой и производством приборов и техники для оборонной и гражданской промышленности. Продукция и технологии этого предприятия используются во многих странах мира, включая СНГ, страны Европы, Израиль, Индию, Китай, Южную Корею, Японию и США. Трехэлектродные управляемые разрядники, предлагаемые ОАО «Плазма», — это металлокерамические отпаянные газоразрядные приборы тригatronного типа с коаксиальным расположением управляющего электрода. Разрядники не содержат ртути и, благодаря усовершенствованной конструкции, отличаются высокой надежностью и долговечностью. В таблице 2 приведены

Таблица 2. Высоковольтные разрядники производства ООО «Плазма»

Тип, модель	$U_{a\text{, кВ}}$	$I_{a\text{, макс, кА}}$	$E_{\text{max, Дж}}$	$F_{\text{max, Гц}}$	Срок службы (ΣQ), Кл	Габариты ($\varnothing \times H$), мм
Разрядники-обострители						
PO-48	100–140	0,4	0,5	–	–	–
PO-43	140–190	1,0	2	–	–	–
PO-49	180–220(250)	1,0	6	–	–	–
PO-50	180–260	1,0	8	–	–	–
Управляемые разрядники						
PT-53	0,6–1,6	1,3/10	1,6/60	10/0,1	2000/750	45×36
PY-69	2–4	4/16	4/400	10/0,05	1000/300	55×36
PY-62	4–10	4/16	23/300	50/0,1	1000/300	55×36
PY-73	15–21	2	2	10	1000/400	28×48
PY-65	16–40	5/35	1000/37000	1,1/0,002	500/200	99×97
PY-77	2–12/0,5–15*	0,8/4	0,2/4	0,1–20/200**	2000	21×40
PY-78	20–27/10–30*	2/10	4/до 500	0,1–20/200**	2000/500	35×60

Примечание:* — серия разрядников с диапазоном напряжений 40–80% от статического напряжения пробоя; ** — средняя частота повторения импульса при импульсной подаче анодного напряжения.

ны основные характеристики разрядников-обострителей типа PO-xx и управляемых разрядников типа PY-xx производства ООО «Плазма».

Тиратроны

Для формирования импульсов большой мощности часто применяются импульсные водородные тиратроны. Тиратрон, как газонаполненный прибор, отличается от управляемых разрядников характеристикой сеточного управления. Водородные тиратроны типа ТГИ отечественного производства с накаленным оксидным катодом могут работать при напряжениях до 50 кВ и пропускать импульсные токи в десятки кА. Они предназначены для коммутации энергии емкостных накопителей с микросекундной и наносекундной длительностью импульса. Все приборы заключены в металлокерамический корпус, могут иметь водяное или принудительное воздушное охлаждение. Специальное диэлектрическое покрытие защищает оболочку прибора от разрушения при прохождении высоких обратных токов. Эти тиратроны могут быть использованы также в качестве коммутирующих элементов для источников питания газовых лазеров (лазеров на парах металлов), в радиолокационной и ускорительной технике и других модуляторных применениях. В таблице 3 представлены основные параметры тиратронов типа ТГИ1.

Полупроводниковые коммутаторы

Минимально возможная длительность импульсов коммутаторов на современных тиристорах близка к 1 мкс, а на IGBT — к 10 мкс. В то же время на быстродействующих MOSFET можно реализовать длительность импульса порядка 150–200 нс. Основные параметры современных тиристоров, MOSFET и IGBT приведены в работах [10, 11].

Импульсные трансформаторы

Импульсные трансформаторы имеют различную конструкцию — в зависимости от мощности, напряжения, требуемых значений фронтов и длительностей импульсов. Основные усилия при их создании направлялись на снижение индуктивности рассеяния L_s и паразитной емкости C_s . Сердечники таких трансформаторов выполняются, как правило, на высокочастотных ферритах. При длительностях импульсов порядка 10–100 нс возможно выполнение трансформаторов без сердечников. Для уменьшения паразитных параметров число витков первичной обмотки w_1 выбирается небольшим, а провод — плоского сечения. В качестве изоляции используется трансформаторное масло или оксидные компаунды. Отметим, что укорочение импульса благоприятно сказывается на параметрах электрической прочности изоляции. Так, при длительности импульсов 10–100 нс электропрочность некоторых изоляционных материалов возрастает в 7–8 раз [5].

В качестве импульсных трансформаторов часто используются коаксиальные трансформаторы, то есть трансформаторы, выполненные на коаксиальных кабелях. Их обмотки представляют собой высоковольтный коаксиальный кабель, причем оплетка кабеля — это первичная обмотка, а центральная жила — вторичная. В общем случае используется несколько коаксиальных кабелей. Например, можно оплетки (первичные обмотки) соединить параллельно, а центральные жилы (вторичные обмотки) — последовательно. Такой трансформатор обладает очень малой индуктивностью рассеяния и значительной стойкостью к динамическим нагрузкам при формировании мощных ВВ-импульсов. Коаксиальные трансформаторы могут выполняться как воздушными, так и с сердечниками на высокочастотных ферритах.

Таблица 3. Основные параметры мощных отечественных тиратронов типа ТГИ1

Тип	$U_{a\text{, кВ}}$	$I_{a\text{, макс, кА}}$	$I_{a\text{, ср}}$ (среднее значение), кА	Максимальная частота f_{max} , кГц	Срок службы (ресурс), ч	Габаритные размеры ($\varnothing \times H$), мм
ТГИ1-0,5к/25	0,7–25	0,5	0,5	15	2000	85×140
ТГИ1-5к/25	0,7–25	5,0	1,5	15	2000	130×200
ТГИ1-3к/30	0,7–25	10,0	3,0	15	2000	130×200
ТГИ1-5к/50	2–50	10,0	3,0	15	2000	170×200
ТГИ1-5к/50	2–50	10,0	5,0	≥15	2000	170×200

Высоковольтные импульсные модуляторы второго рода

В работе [12] описан импульсный ВВИП, или высоковольтный импульсный модулятор второго рода, то есть с коммутацией (модуляцией) на стороне высокого напряжения. Он имеет следующие параметры: средняя мощность около 10 кВт, выходное импульсное напряжение 23 кВ, ток в импульсе до 6 кА при длительности импульса 100–120 мкс. Схема модулятора в упрощенном виде приведена на рис. 2.

Работа схемы основана на частичном разряде накопительного конденсатора С1 (через формирующую линию ФЛЗ). Конденсатор в промежутках между импульсами подзарядается от источника питания с трехфазным тиристорным регулятором VS1–VS3 на входе. Разрядный ключ — водородный тиратрон типа ТГИ1-5000/50 (другое обозначение — ТПИ1-5к/50), параметры которого приведены в таблице 3. В частности, анодное напряжение тиратрона — до 50 кВ, амплитуда тока — до 10 кА, долговечность (ресурс) — 2000 ч. Недостатки таких модуляторов: громоздкий высоковольтный трансформатор TV1 (трехфазный, низкой частоты 50/60 Гц), высоковольтный накопительный конденсатор С1, потери энергии на резисторах R1, R2, сравнительно невысокая долговечность тиратрона.

В составе серийных люминесцентных сепараторов типа ЛС-20-05 (1996–1998 гг.) производства ОАО «НПП «Буревестник» выпускался импульсный ВВИП, в котором в качестве ВВ-коммутатора использовалась сама трехэлектродная рентгеновская трубка типа БХВ-18 [1] с сеточной модуляцией. Этот ВВИП содержал в своем составе [13] высоковольтный источник питания постоянного тока с выходным напряжением –10–35 кВ и током до 400 мА на основе трехфазного тиристорного регулятора и высоковольтного сетевого трансформатора, аналогичного упомянутому в работе [12]. Отрицательный высоковольтный вывод источника подсоединен к выводу накала РТ типа БХВ-18, а положительный — к заземленному аноду. Между накалом, питающимся от высокопотенциального накального трансформатора, и сеткой трубки включен сеточный трансформатор и источник смещения — выпрямитель сигнала (меандр частотой 20 кГц, напряжением около 500 В), поступающего от трансформатора; для подачи управляющих

импульсов питающий сигнал прерывался на 500 мкс. Все эти элементы — трансформатор и выпрямитель — находятся также под высоким потенциалом. Использование вентильных свойств нагрузки (РТ) не устраняет главный недостаток высоковольтных модуляторов рассмотренного типа — необходимость использования мощного источника высокого напряжения постоянного тока.

В появившихся в последнее время публикациях, например [14], описано применение полупроводниковых ключевых элементов вместо газоразрядных приборов. Такое решение позволяет повысить долговечность модулятора и перейти к более современной промышленной реализации.

Импульсный ВВИП рентгеновской трубки с анодной модуляцией

С целью улучшения массо-габаритных показателей импульсных ВВИП для люминесцентных сепараторов типа ЛС-20-05М и других с 1998 г. была применена анодная модуляция рентгеновской трубки через мощный импульсный трансформатор, то есть использована схема формирования первого рода, аналогичная схеме на рис. 1а. Строго говоря, точнее надо называть ее катодной модуляцией, поскольку анод в отечественных РТ обычно заземляется. Схема ВИП РТ типа ВИП-35-350 (условное обозначение) с катодной модуляцией показана на рис. 2. Здесь и далее речь идет о ВВИП РТ, разработанных специалистами ОАО «НПП «Буревестник» [3]. ВВИП РТ типа ВИП-35-350 включает в себя [13]:

- блок включения, работающий от трехфазной сети;
- трехфазный (3×220 В/50Гц) оптоэлектронный регулятор-выпрямитель;
- силовой ключ (СК) на IGBT-модуле;
- высоковольтный силовой импульсный трансформатор;
- высокопотенциальный накальный трансформатор;
- устройство управления силовым ключом (УУСК);
- стабилизатор анодного тока (САТ);
- цепи обратной связи и контроля высокого (анодного) напряжения U_a и анодного тока I_a .

Этот ВВИП, как и предыдущий, был разработан ведущими специалистами Потаповым В. М., Лебедевой О. К., Мальковым В. Г. при участии Старчикова А. Н. и Минченко Л. С.

С целью исключения соединительных ВВ-кабелей сравнительно большой длины (15–25 м) и тем самым обеспечения электробезопасности и надежности в реальных условиях эксплуатации, высоковольтный силовой и высокопотенциальный накальный трансформаторы, цепи обратной связи (контроля) и рентгеновская трубка БХВ-18 конструктивно размещены в корпусе так называемого моноблока. Моноблок наполнен трансформаторным маслом и обеспечивает высокую степень электроизоляции и эффективного отвода тепла. Несколько подробнее его конструкция будет описана ниже.

В схеме ВВИП-35-350 имеются 2 отдельных контура (системы) регулирования: по выходному (анодному) току I_a — САТ и выходному высокому (анодному) напряжению U_a — СВН. Регулирование и стабилизация U_a осуществляется оптоэлектронным регулятором-выпрямителем, в котором силовые оптоэлектронисторы типа МТОТО-80-10(12) через VD-LC-фильтр работают на нагрузку — высоковольтный инвертор в составе силового ключа и высоковольтного силового трансформатора. Фазовая отсечка оптоэлектронисторов создается устройством управления (стабилизации). При этом регулятор-выпрямитель обеспечивает на выходе стабильное напряжение постоянного тока, регулируемое в пределах +80–+250 В. В качестве СК первоначально использовался IGBT-модуль типа BSM300GA120DN2 ($U_{CES} = 1200$ В; $I_C = 400$ А; $P_D = 2500$ Вт) фирмы Infineon, а затем его полный отечественный аналог МТКИ2-12-300 [13]. Подробнее характеристики IGBT-модулей типа BSM300GA120DN2 и МТКИ2-12-300 приведены в [13]. В трансформаторе использованы три обмотки: первичная (w_1), высоковольтная (w_2) и размагничивающая (w_3). Первичная обмотка w_1 трансформатора включена в коллекторную цепь СК на IGBT-модуле. В СК также предусмотрено «обрамление» IGBT специальными цепями-поглотителями для защиты от пиковых выбросов напряжения на его коллекторе (подробнее в следующем разделе).

Необходимо остановиться также на одной из проблем ВВИП с катодной модуляцией через импульсный трансформатор, а именно на измерении амплитуды импульсов напряжения и тока нагрузки. Типовое решение — интегрирование импульсного сигнала от датчика тока или делителя высокого напряжения с последующим измерением средних значений прибором постоянного тока. Его недостаток: зависимость результата от частоты следования и длительности импульсов.

Контур управления и стабилизации тока I_a выполнен в отдельном модуле (САТ) на основе двухтактного инвертора. Инвертор управляется противофазными импульсами одинаковой длительности с небольшой паузой между ними («квазимерандр») с постоянной частотой следования (10 кГц). Изменение выходного напряжения инвертора производится изменением его напряжения питания при помощи обратной связи по току I_a (амплитудная модуляция). Стабилизация I_a в конеч-

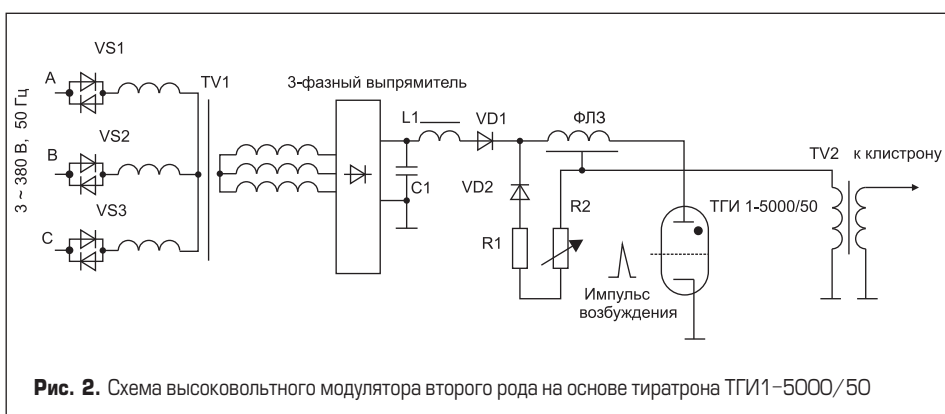


Рис. 2. Схема высоковольтного модулятора второго рода на основе тиратрона ТГИ1-5000/50

ном счете, осуществляется за счет изменения величины тока накала РТ. В качестве источника питания силовой цепи САТ был выбран имеющийся в распоряжении низкочастотный ИВЭ с выходной мощностью до 120 Вт и возможностью регулирования его напряжения в пределах +20–+80 В внешним сигналом.

Для непосредственного питания цепи накала РТ служит высокопотенциальный накальный трансформатор, размещенный в высоковольтной части ВВИП — моноблоке.

ВВИП-35-350 для питания рентгеновской трубки БХВ-18 (или аналогичного типа) имеет следующие характеристики:

- питание — от сети переменного тока 3×220 В/50 Гц;
- выходное высокое напряжение в импульсе — (10–35) кВ;
- выходной (анодный) ток — 20–370 мА;
- максимальная выходная мощность: импульсная — 12 кВт, средняя — 1,5 кВт;
- частота следования импульсов — 250 Гц, скважность — 8;
- управление: ручная установка выходных значений высокого (анодного) напряжения и тока; импульсное возбуждение — внешнее;
- габаритные размеры (длина×ширина×высота):
 - моноблок с установленной РТ — 460×215×300 мм;
 - блок управления — 480×460×270 мм.

Всего было выпущено более 300 ВВИП этого типа.

Высоковольтный импульсный источник питания рентгеновской трубки с микропроцессорным управлением

Дальнейшее развитие рассмотренных импульсных ВВИП РТ было связано с оптимизацией структуры, схемотехники и компонент-

ной базы. В итоге были приняты следующие направления совершенствования ВВИП РТ, обеспечивающие улучшение характеристик, экономию производственных затрат и повышение надежности:

- отказ от низкочастотного оптоэлектронного регулятора-выпрямителя в контуре управления выходным напряжением и замена его на покупной управляемый источник питания преобразовательного типа;
- использование покупного источника питания преобразовательного типа для питания САТ;
- применение в силовом ключе более современного (и более совершенного) IGBT-модуля со стандартным драйвером для его непосредственного управления;
- введение микропроцессорного (МП) управления каналами напряжения и тока, позволяющего оптимизировать управление, контроль и защиту ВВИП РТ.

Все эти идеи были реализованы в новой модели импульсного ВВИП РТ (условное название ВВИП-33-330; создан в 2008 г., в серии — с 2010 г.). Его выходное импульсное напряжение — (10–33) кВ, ток нагрузки до 330 мА, средняя выходная мощность до 1,2 кВт, микропроцессорное управление. Этот ВВИП разработан ведущими специалистами ОАО «НПП «Буревестник» Лебедевой О. К., Мальковым В. Г., Романовской Т. Е. и описан в работе [15]

На рис. 3 приведена схема ВВИП-33-330. В качестве источника питания СК использован блок типа GENESYS 2500 Вт (GEN300/8) фирмы Nemic-Lambda [16]. Блок может непосредственно встраиваться в промышленный конструктив 19" (1U) и имеет вход управления выходным напряжением по интерфейсу RS232.

Высокая стабильность при изменении тока нагрузки позволяет отказаться от обратной связи по выходному высокому напряжению (по среднему значению), огра-

ничившись использованием выходного делителя R4-R5 только для измерения напряжения. В качестве силового ключа выбран IGBT-модуль типа SKM300GAL128D фирмы SEMIKRON (1200 В/370 А/2500 Вт). Подробнее характеристики SKM300GAL128D приведены в [15]. Отличительная особенность SKM300GAL128D состоит в том, что в него встроены как обратный (инверсный), так и свободный диоды. Модуль обладает высокой стойкостью к короткому замыканию, имеется самоограничение коллекторного тока при ограничении напряжения на затворе. В СК предусмотрены защитные «обрамления» IGBT-цепями-поглотителями от пиковых (высокочастотных) выбросов напряжения на его коллекторе: а) демпфер R3C3, подключенный между коллектором и эмиттером СК; б) снаббер (snabber), образованный параллельной цепью R1C2 и свободным диодом в SKM300GAL128D.

Для оптимального управления SKM300GAL128D используется рекомендуемый фирмой SEMIKRON драйвер типа SKHM1 10/12 [17] для мощных IGBT-модулей. Его характеристики:

- пригодность для управления всеми мощными IGBT-модулями фирмы SEMIKRON с напряжением $U_{CES} \leq 1200$ В;
- совместимость по входу с КМОП/ТТЛ-устройствами;
- выходное напряжение/ток — +15, -8 В/8 А (в импульсе);
- максимальная частота — 100 кГц;
- время задержки включения/выключения — 1/1,4 мкс;
- напряжение изоляции: вход-выход — 1200 В (обеспечивается трансформатором, а не опторазвязкой), относительно корпуса — 2500 В;
- допустимая скорость нарастания напряжения — $dU/dt \leq 75$ кВ/мкс.

Схема и конструкция ВВИП РТ при данной выходной мощности универсальны. Но если длительности импульса возбуждения значительно изменяются, то это приводит к изменению конструкции и характеристик силового импульсного трансформатора. Приведем для наглядности некоторые данные трансформатора ВВИП-33-330 для различных исполнений: 1 — для частоты следования 2000 Гц (скважность Q = 5); 2 — для частоты 250 Гц (Q = 8). В обоих исполнениях применен один и тот же тип сердечника: ПЛ20×40×100/электротехническая сталь Э3425 толщиной 0,08 мм. Данные исполнений:

- 1 (обмотки): $w_1 = 20$ витков, $L_{\mu 1} = 0,8$ мГн, $L_{s1} = 10$ мкГн; $w_2 = 3000$ витков, $L_{\mu 2} = 14$ Гн, $L_{s2} = 2$ мГн; $w_3 = 40$.
- 2 (обмотки): $w_1 = 45$ витков, $L_{\mu 1} = 2,8$ мГн, $L_{s1} = 40$ мкГн; $w_2 = 6800$ витков, $L_{\mu 2} = 64$ Гн, $L_{s2} = 2$ мГн; $w_3 = 180$.

Помимо электрических и намоточных данных существенное значение имеет конструктивное исполнение силового ВВ-трансформатора. Так, для получения более коротких импульсов с длительностью фронтов не более 10% от длительности импульса высоковольтная обмотка должна быть вы-

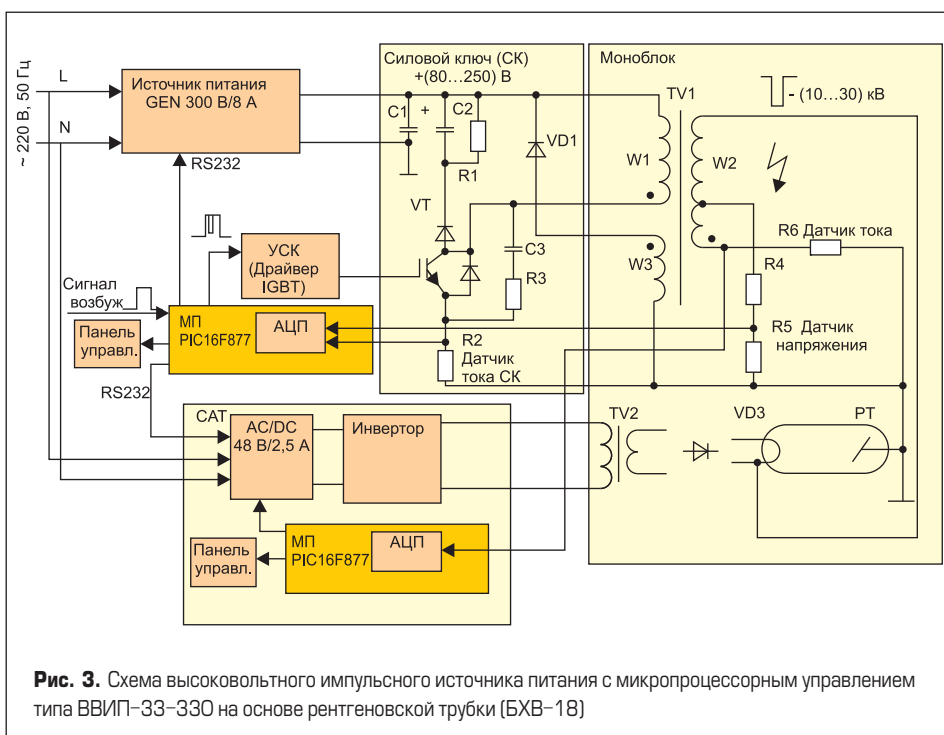


Рис. 3. Схема высоковольтного импульсного источника питания с микропроцессорным управлением типа ВВИП-33-330 на основе рентгеновской трубки (БХВ-18)

полнена секционированной. В целом конструктивно высоковольтная часть ВВИП РТ выполняется в виде моноблока, состоящего из маслonaполненного корпуса с РТ, «змеевиком»-охладителем и крышки, на которой размещены: силовой трансформатор, трансформатор накала, датчики тока и напряжения РТ. В рабочем положении все эти элементы находятся в масле для обеспечения необходимых параметров электрической прочности и эффективного охлаждения.

При использовании ВВИП РТ в промышленной аппаратуре очень важно не допустить перегрева моноблока и нагрузки (РТ) при нарушении режима охлаждения. Обычно трубка и моноблок охлаждаются проточной водой, проходящей через «змеевик», поток которой контролируется специальным датчиком. Кроме того, температура анода РТ контролируется датчиком на основе биметаллического термopедохранителя.

Микропроцессорное управление

Оптимальным решением управления ВВИП РТ, позволяющим «вписать» ВВИП в общую систему управления оборудованием, является включение в его состав двух микропроцессоров (МП) типа PIC16F877 фирмы Microchip [18]. Один МП встроен в контур управления высоким напряжением (СВН), а другой — в схему управления током (САТ). Микропроцессор в контуре управления напряжением выполняет функцию ведущего. Через него осуществляется связь с внешним устройством управления по интерфейсу RS485. Второй порт (RS232) этого МП предназначается для управления источником питания GEN300-8 в соответствии с уставками напряжения, которые поступают через первый порт. Порт SPI использован для связи с МП контура тока. Возбуждение (модуляция) ВВИП подается от внешнего источника на МП-контур управления напряжением, который запускает СК через устройство управления. Оба МП синхронно с запуском посредством встроенных АЦП выполняют цифровое измерение амплитуды импульсов выходного напряжения и тока. Генерирование «врезки» может быть либо выполнено на дискретных элементах, либо встроено в программу МП.

Поясним подробнее проблему «врезки». Передача импульсов через силовой трансформатор ведет к существенным искажениям их формы, причина которых кроется в паразитных параметрах трансформатора. Эквивалентная схема импульсного трансформатора достаточно подробно описана, например, в [19]. Поэтому коснемся лишь наиболее неприятных, в рассматриваемом аспекте, искажений формы импульсов напряжения на вторичной (высоковольтной) обмотке w_2 трансформатора. Прежде всего, это выброс напряжения на вершине импульса, а также обратный выброс на заднем фронте, то есть при закрывании (выключении) СК. Наличие обратного выброса объясняется передачей в нагрузку энергии, запасенной как индуктивностью намагничивания, так и в индуктивности рассеяния трансформатора. Для

уменьшения амплитуды выброса применен стандартный прием — в трансформатор введена дополнительная (размагничивающая или рекуперативная) обмотка w_3 . Число витков этой обмотки значительно больше числа витков первичной обмотки, то есть $w_3 > w_1$. Через обмотку w_3 энергия намагничивания возвращается обратно в источник питания СК через высоковольтный быстродействующий диод VD1. Для подавления выброса на переднем фронте переключения ключа, который может приводить к пробоем нагрузки — РТ, применен оригинальный прием, заимствованный из [20]. Он заключается в придании специальной формы импульсу управления: с некоторой задержкой относительно начала импульса управления СК производится его кратковременное выключение, которое условно назвали «врезкой». Длительность «врезки» и ее задержка относительно начала управляющего импульса настраиваются по минимуму выброса в устройстве управления СК, исходя

из параметров импульсного трансформатора. При правильной настройке такой прием существенно снижает амплитуду выброса. Прием «врезки» используется только при импульсах возбуждения 500 мкс.

Микропроцессор в контуре тока выполняет как функцию регулировки (установки) тока РТ, так и функцию стабилизации заданного тока при изменении выходного напряжения источника. Стабилизация необходима из-за нелинейных вольт-амперных характеристик нагрузки — РТ. Остановимся подробнее на микропроцессорных контроллерах. Схемы контроллеров для контура тока и напряжения различаются мало. Базой контроллеров служит известный МП типа PIC16F877 фирмы Microchip. Частота процессора 20 МГц. МП имеет флэш-ПЗУ (Flash Program Memory) объемом 14 кбайт, ОЗУ (RAM) объемом 368 байт и энергонезависимую память EEPROM объемом 256 байт. Последняя удобна для хранения параметров настройки.

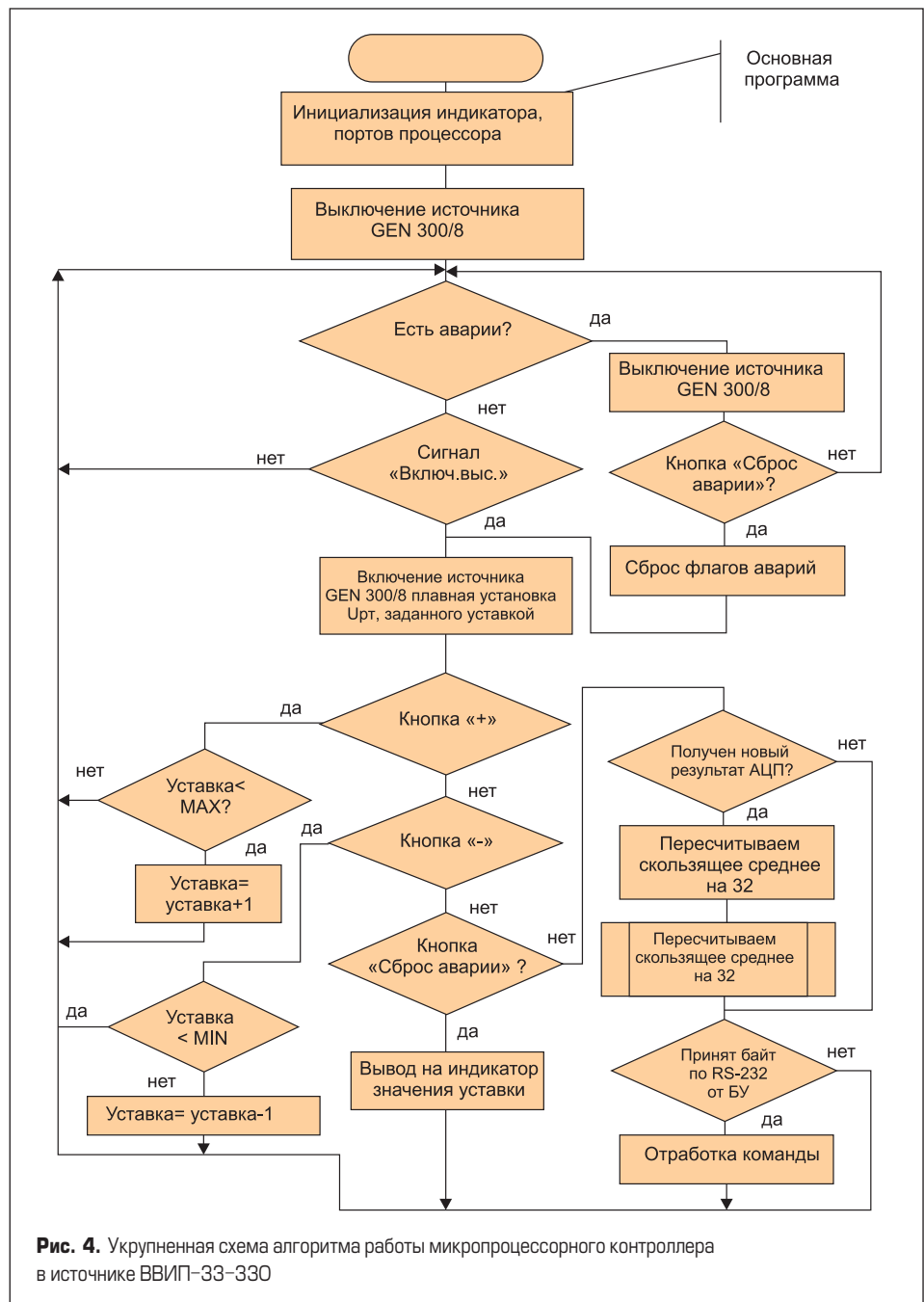


Рис. 4. Укрупненная схема алгоритма работы микропроцессорного контроллера в источнике ВВИП-33-330

Для примера рассмотрим вкратце работу МП-контроллера контура управления напряжением (подробнее в [15]). Микропроцессор имеет два канала связи по интерфейсу RS232: с управляемым источником питания (GEN 300/8) СК через драйвер MAX3110E (SPI/RS232) и через драйвер MAX483 — с внешним блоком управления, от которого задаются значения тока и напряжения. Порт аналогового ввода RA принимает импульсный сигнал датчика высокого напряжения и сигнал напряжения анода СК. Измерение аналоговых сигналов производится встроенным АЦП синхронно с сигналом внешнего возбуждения на порт RB0. Этим достигается непосредственное (без промежуточного интегрирования) измерение амплитуды напряжения. Порт RE и отдельные биты порта RB используются для взаимодействия с выносной панелью управления, используемой при настройке. На панели имеется цифровой индикатор напряжения, на который выводится нормированный результат АЦП (аналогично в контуре тока — тока нагрузки), кнопки увеличения («+») и снижения («-») напряжения и тока, а также «Сброс». Контроллер принимает от схемы СК сигнал перегрузки по току и аналогично сигнал аварии из контура управления током нагрузки. Эти сигналы передаются в порт RS485. Укрупненная схема алгоритма работы МП-контроллера приведена на рис. 4.

1. По включении питания контроллер устанавливает исходное состояние выходов, выводит на табло символы «- -». Из энергонезависимой памяти EEPROM МП считывает уставку (установленное значение) напряжения. Если эта уставка выходит за допустимые границы, по умолчанию устанавливается 10 кВ.

2. Устанавливается связь с источником GEN300/8. Выдаваемая последовательность команд: 'ADR 6.' — адресация источника; 'PV 0.' — установка напряжения 0В; 'OUT 0.' — отключение выхода источника. На каждую из этих команд источник должен ответить посылкой 'OK'.

Если МП не получает ответа на команду адресации, то он повторяет эту команду. Если ответ не приходит и во второй раз, на индикатор и в порт RS485 выдается сообщение об отсутствии связи с источником — 'LA'.

3. Далее проверяются аварии:

- авария САТ (логический сигнал от контроллера САТ);
- авария СК (логический сигнал);
- авария перегрузки по напряжению (напряжение >3,5 В);
- авария перегрузки по питанию.

На индикаторе — аварийные сообщения (в порядке убывания приоритета):

- ПП — перегрузка по питанию;
- LA — отсутствие связи с LAMBDA;
- CC — авария СК;
- CA — авария САТ;
- ПА — авария перегрузки по напряжению. Любая авария сбрасывается нажатием кнопки «Сброс аварии» (RESET).

4. Если аварий нет и напряжение выключено, на индикаторе сообщение 'OF'. МП ждет

сигнала включения высокого. В этом режиме по нажатию кнопки RESET на индикаторе высвечивается заданная уставка в формате «X.X.X.» (т. е. после каждой цифры стоит точка — в отличие от индикации реального значения напряжения при включенном высоком). Для редактирования уставки одновременно нажимаются кнопка RESET и «+» или «-». МП осуществляет контроль допустимости значения уставки.

По отпусанию кнопки RESET выполняется запись уставки в EEPROM МП.

5. Если высокое включено, командой 'OUT 1.' включается источник, и напряжение на источнике GEN300/8 повышается до уставки за 10–15 с последовательно выдаваемыми командами 'PV xxx.', где «xxx» — значение напряжения.

На каждую из этих команд источник должен ответить посылкой 'OK'. Если МП не получает ответа, на индикатор выдается сообщение об отсутствии связи с источником — 'LA'.

6. При достижении $U = 10$ кВ выдается сигнал включения тока в САТ.

7. Через 60 мкс после начала импульса синхронизации запускается АЦП сигнала анодного напряжения. Результат заносится в массив измерений размерностью 32. По этому массиву вычисляется скользящее среднее значение, которое выводится на индикатор и анализируется при реализации обратной связи.

8. Для увеличения/уменьшения напряжения используются кнопки «+» и «-». Значение тока, установленное при помощи кнопок, сохраняется до выключения высокого или до аварии. МП также осуществляет стабилизацию напряжения к значению, заданному уставкой или кнопками.

9. Каждые 500 мкс контролируются аварии (пункт 3). При аварии отключается источник LAMBDA, устанавливается напряжение 0, на индикатор выводится сообщение об аварии. При выключении высокого напряжения также отключается источник LAMBDA и устанавливается напряжение 0:

- 'PV 0.' — установка напряжения 0 В;
- 'OUT 0.' — отключение выхода источника.

Любая авария сбрасывается по нажатию кнопки «Сброс» (RESET). Далее МП переходит к пункту 4.

ВВИП-33-330 для питания рентгеновской трубки БХВ-18 (БХВ-21 или БХВ-6, аналогичного типа) имеет следующие характеристики:

- питание — от однофазной сети переменного тока 85–264 В/47–63 Гц;
- выходное высокое напряжение в импульсе — 10–33 кВ;
- выходной (анодный) ток — 20–330 мА;
- максимальная выходная мощность:
 - импульсная — 9 кВт;
 - средняя — 1,8 кВт (исполнение 1) и 1,2 кВт (исполнение 2).
- частота следования импульсов/скважность:
 - исполнение 1 — 2000 Гц/5;
 - исполнение 2 — 250 Гц/8.
- управление от встроенных микроконтроллеров;

• габаритные размеры (длина×ширина×высота):

- моноблок с установленной РТ — 460×215×300 мм;
- блок управления — 480×460×220 мм.

Авторы признательны известному специалисту по средствам электропитания к. т. н. Эраносяну С. А. за ценные советы при написании статьи и ее редактировании. Также авторы выражают благодарность Романовскому Ю. А. 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. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 2 // Силовая электроника. 2011. № 1.
3. www.bouvestnik.com, www.bouvestnik.spb.ru
4. Комяк Н. И., Пеликс Е. А. Генераторы наносекундных рентгеновских вспышек ИРА-3 и ИРА-5 // Дефектоскопия. 1971. № 3.
5. Блинов Н. Н. Рентгеновские питающие устройства. М.: Энергия. 1980.
6. www.spectroflash.ru
7. www.imp-zavod.ru
8. www.uca-komplekt.ru
9. www.plasmalabs.ru
10. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 1.
11. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 3 // Силовая электроника. 2010. № 2.
12. Акимов А. В. и др. Вопросы атомной науки и техники // Ядерно-физические исследования. 2001. № 3.
13. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. Часть 1 // Современная электроника. 2007. № 7.
14. Полищук А. Г. Вопросы разработки твердотельных импульсных модуляторов для электровакуумных приборов СВЧ // Современная электроника. 2005. № 3.
15. Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О. Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора. Часть 2 // Современная электроника. 2008. № 1.
16. Блоки питания GENESYS/GEN300/8. // www.lambda-nemic.com
17. www.semikron.com
18. www.microchip.com
19. Ланцов В. В., Эраносян С. А. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2007. № 2.
20. А. с. № 8547 (РФ) Генератор импульсов высокого напряжения / В. М. Потапов, Л. И. Богашев, М. В. Бабенков // Бюл. 1998. № 11

Продолжение. Начало в №5' 2010

Мощные высоковольтные источники питания

Часть 4

В очередной статье цикла рассмотрены высоковольтные источники питания (ВВИП) с выходом на постоянном токе. Приведены схемы таких ВВИП на основе высокочастотных преобразователей для питания мощных электровакуумных приборов, в частности рентгеновских трубок. Описаны особенности функционирования конкретных ВВИП и их устройств, даны сведения о применяемых компонентах.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

Евгений Владимиров

envlad@list.ru

В статье [1] приводятся сведения об областях применения мощных высоковольтных источников питания и их классификация. Рассмотрены существенные отличия ВВИП от низковольтных источников питания и дан обзор структур построения мощных ВВИП в аспекте их развития. В работе [2] отмечаются особенности высоковольтных (ВВ) блоков и модулей источников высокого напряжения и приводятся основные характеристики входящих в них высоковольтных компонентов. Также изложены принципы и элементы технологии изготовления ВВ-блоков и модулей, в том числе характеристики изоляционных материалов.

В работе [3] рассмотрены некоторые ВВИП большой мощности с импульсным выходом, для краткости обозначенные термином «импульсные ВВИП» или «высоковольтные импульсные генераторы или модуляторы». Приведены основные области их применения:

- а) специальные испытательные установки для генерации мощных ВВ-импульсов;
- б) рентгеноимпульсные аппараты для диагностики и дефектоскопии различных металлоизделий;
- в) рентгенолюминесцентные сепараторы (сортировщики) для выделения алмазов в алмазосодержащей руде и т. д.

Также в статье [3] конкретно анализируются применения ВВИП типа б) и в), исходя из известной информации и личного опыта авторов. Приведены основные схемы формирования высоковольтных импульсов. Даны сведения об основных узлах и компонентах импульсных ВВИП, включая рентгеновские импульсные трубки, высоковольтные коммутаторы (разрядники, тиратроны, полупроводниковые приборы), ВВ-импульсные трансформаторы. Большое внимание уделено описанию и особенностям работы высоковольтного импульсного источника питания рентгеновской трубки мощностью порядка 10 кВт в импульсе (33 кВ/330 мА) и с управлением

на основе микроконтроллеров типа PIC16F877 фирмы Microchip.

В настоящей статье цикла рассматриваются ВВИП с выходом на постоянном токе на основе высокочастотных преобразователей для питания мощных электровакуумных приборов, в основном рентгеновских трубок. Рассмотрение для наглядности ведется на примере реальных моделей ВВИП.

Высоковольтный источник питания мощностью 3,5 кВт (55 кВ/60 мА)

Предварительно выскажем несколько соображений по истории проектирования преобразовательных ВВИП большой мощности. В частности, в 70–80-х гг. НПО «Буревестник» (Ленинград), ныне ОАО «НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург) [4], на котором работали авторы, в числе прочей аналитической аппаратуры выпускало большими партиями (100 и более штук в год) рентгеновские аппараты (РА) для структурного анализа веществ. Это были дифрактометры общего назначения типа ДРОН: ДРОН-3 и ДРОН-4 в различных исполнениях. Неотъемлемой частью этих аппаратов являлся мощный 1–3-кВт высоковольтный до (50–60) кВ источник питания рентгеновской трубки (РТ), например БСВ-30. Такой ВВИП должен иметь регулируемые в широком диапазоне параметры выхода как по высокому напряжению (U_B), так и по анодному току (I_a). Кроме того, он должен обладать высокой стабильностью поддержания U_B и I_a (десятые и сотые доли процента). Первоначально в этих целях использовался отечественный низкочастотный 50-Гц высоковольтный источник ИРИС-М1 для питания РТ с симисторным регулятором на сетевом входе, масляной изоляцией и водяным охлаждением ВВ-блока. Его выходные параметры: $P_{\text{вых. max}} = 3/3,5$ кВт; $U_B = -(2-60)$ кВ; $I_{\text{вых}} = I_a = 2-60$ мА; нестабильность порядка $\pm(0,1-0,2)\%$ (за 12 ч работы). Габаритные размеры — 1200×1130×1000 мм (объем $V = 1360$ дм³),

масса — 500 кг, то есть удельные показатели составляют: по объему $p_V = 2,6 \text{ Вт/дм}^3$, по массе — $p_M \approx 6 \text{ Вт/кг}$ [1]. По электрическим параметрам источник полностью удовлетворял всем требованиям рентгеновских аппаратов, но габаритные размеры и масса были недопустимо велики. Понятно, что использование такого крупногабаритного ВВИП резко снижало конкурентоспособность РА типа ДРОН-4 и последующих поколений. В связи с этим со середины 80-х гг. остро возник вопрос о замене блока ИРИС-М (или ИРИС-М1) на малогабаритный ВВИП, построенный на основе высокочастотного (ВЧ) преобразователя. Это позволило бы также или значительно уменьшить объем трансформаторного масла в высоковольтном блоке (генераторном устройстве, ГУ), применяемом для изоляции высоковольтного трансформатора и умножителя напряжения, или вообще обойтись без него. Подобные высоковольтные источники уже давно выпускались за рубежом. В этой связи в 1987 г. НПО «Буревестник» при поддержке Министерства приборостроения СССР был закуплен источник высокого напряжения модели Kristalloflex 710H фирмы Siemens для последующего воспроизводства.

ВВИП Kristalloflex 710H [5] выполнен с преобразованием на повышенной частоте (20 кГц) и имеет следующие параметры: $U_B = (20-55) \text{ кВ}$, $I_a = (5-60) \text{ мА}$, $P_{\text{вых.макс}} = 2,7 \text{ кВт}$. Нестабильность $\pm \leq 0,02\%$ при работе от однофазной сети 220 В 50(60) Гц; коэффициент пульсаций $K_p \leq 5\%$. Габаритные размеры 438×253×704 мм; масса 75 кг, то есть удельная мощность составляет: по объему $p_V = 35 \text{ Вт/дм}^3$, по массе — $p_M = 36 \text{ Вт/кг}$.

Схема высоковольтного источника питания Kristalloflex 710H (Siemens)

Рассмотрим упрощенную схему ВВИП модели Kristalloflex 710H, выполненную на основе его технического описания и представленную на рис. 1.

Структурно ВВИП модели Kristalloflex 710H включает в себя:

- устройство включения (УВкл);
- управляемый тиристорный выпрямитель-удвоитель (ТВУ) с устройством управления УУ1;
- мостовой транзисторный инвертор (И) с устройством управления УУ2;
- высоковольтный (ВВ) блок (или ГУ).

На схеме (рис. 1) достаточно подробно показан только стабилизированный канал U_B или стабилизатор высокого напряжения (СВН). Канал стабилизатора анодного тока (САТ) для простоты не изображен и представлен только узлом датчика анодного тока I_a (R7) и выходным накальным трансформатором TV2 (все в ВВ-блоке).

В УВкл объединены: силовой автоматический пускатель K1 (или контактор), плавкий предохранитель, схема пуска при нулевом напряжении сети, детектор контроля сетевого напряжения, сетевой фильтр помех. В качестве ограничителя пусковых токов и токов

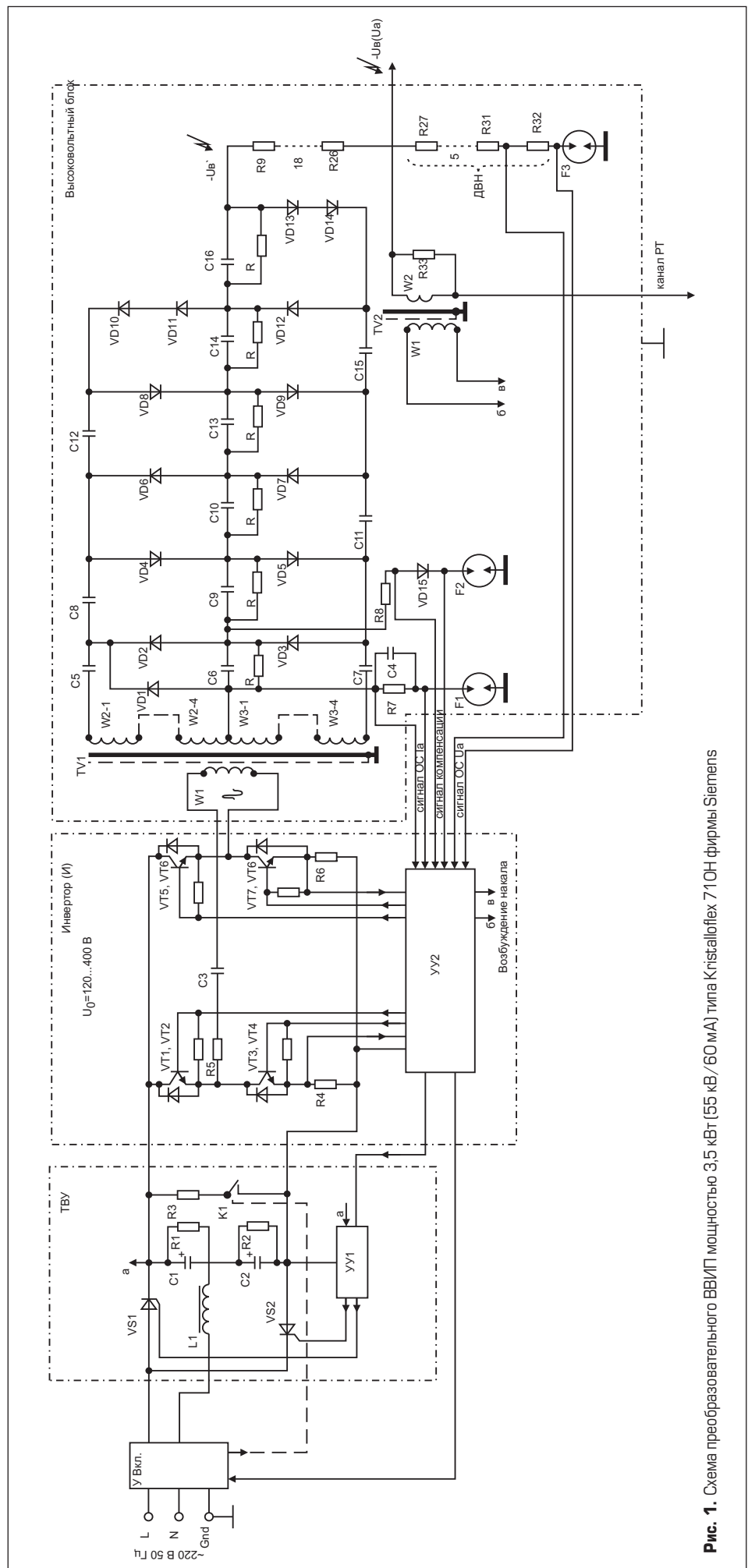


Рис. 1. Схема преобразовательного ВВИП мощностью 3,5 кВт (55 кВ/60 мА) типа Kristalloflex 710H фирмы Siemens

заряда конденсаторов сетевого выпрямителя использован низкочастотный дроссель L1 без зазора (на схеме расположен в ТВУ).

Назначение управляемого ТВУ — повысить напряжение питания U_0 инвертора (И) для уменьшения тока через его ключевые транзисторы, а также стабилизировать U_0 для получения более высокого качества высокого напряжения U_B . (Отметим, что в настоящее время при питании от однофазной сети переменного тока и мощности от 3–5 кВт в этих целях используется активный корректор коэффициента мощности, описанный, например, в [1].) ТВУ выполнен по схеме однополупериодного удвоителя на тиристорах VS1, VS2 и конденсаторах C1, C2. Он позволяет получать на выходе стабилизированное напряжение питания, регулируемое в диапазоне $U_0 = +(120–400)$ В для мостового транзисторного инвертора в разных режимах работы. На выходе ТВУ включена цепь R3K1 (блок-контакт пускателя или контактора) для разряда конденсаторов C1, C2 большой емкости при выключении всего ВВИП. Управление тиристорами VS1, VS2 ($U_{RRM} = 800$ В, $I_{FAV} = 40$ А) осуществляется устройством фазоимпульсного управления УУ1 как по сигналу с выхода ТВУ, так и сигналами уставки напряжения из центрального устройства УУ2, в зависимости от рабочего поддиапазона.

Мостовой инвертор выполнен на транзисторах VT1–VT8 типа BUV98A (Philips) [6] — по две штуки параллельно в каждом плече. Параметры транзистора: $U_{CE0} = 450$ В/ $U_{CB0} = 1000$ В, $I_C = 30$ А (60 А имп.), $P_{tot} = 150$ Вт; $U_{CE sat} = 1,5$ В; $H_{21E} (H_{FE}) \geq 5$ (при $I_C = 6$ А). В эмиттеры нижних транзисторов VT3 (VT4) и VT7 (VT8) включены резисторы R4, R6, используемые как датчики тока перегрузки инвертора. Для простоты в схеме не показаны снабберы (VDRC-цепи) в каждом плече моста, ограничивающие скорость нарастания напряжения на коллекторах транзисторов VT1–VT8. Резонансный характер нагрузки инвертора, из-за паразитных параметров (L_s , C_s) ВВ-трансформатора TV1, обеспечивает минимальные коммутационные потери мощности в транзисторах в момент их выключения. Для исключения подмагничивания высоковольтного трансформатора первичная обмотка высоковольтного трансформатора TV1 подключена через разделительный конденсатор C3 последовательно с демпфирующим резистором R5. Управление ключевыми транзисторами VT1–VT8 производится последовательностями разнополярных импульсов, сдвинутыми по фазе на 180° с паузой между ними («мертвое время») через управляющие трансформаторы (на схеме не показаны) с выходов центрального устройства управления УУ2. Изменение параметров импульсов происходит по сигналу обратной связи (ОС) с делителя высокого напряжения (ДВН) на резисторах R27–R32 в высоковольтном блоке.

Высоковольтный блок включает в себя:

- высоковольтный трансформатор TV1;
- умножитель напряжения по диодно-мостовой псевдосимметричной схеме (диоды VD1–VD14, конденсаторы C5–C16);

- датчик обратной связи по анодному току I_a : R7, C4, разрядник F1;
- датчик обратной связи по высокому (анодному) напряжению — ДВН из резисторов R27–R32, разрядник F3;
- токоограничительные резисторы R9–R26 (всего 18);
- резистор R8 — задатчик тока компенсации;
- высокопотенциальный трансформатор TV2 питания цепи накала ПТ;
- датчик температуры внутри масла на термопаре (на схеме не показан).

ВВ-трансформатор TV1 выполнен на сердечнике из четырех ферритов типа ПП 90×80×30 мм с высокой магнитной проницаемостью, имеющем зазоры для ослабления подмагничивания и одновременно охлаждения. Обмотки расположены на одном керне. Первичная обмотка w_1 — бескаркасная прямоугольной конфигурации, ближайшая к сердечнику. Вторичная обмотка w_2 — трапециевидная, из нескольких секций, выполненная виток к витку проводом с повышенными изоляционными свойствами. ВВ-обмотка имеет барьерную изоляцию от второго керна сердечника. ВВ-умножитель собран на высоковольтных быстродействующих диодах ($U_{RRM} = 10$ кВ, $I_{FAV} = 100$ мА) фирмы ASSY по два диода последовательно в каждом выпрямительном элементе VD_i (VD1–VD14). Малогабаритные конденсаторы 10 нФ/8 кВ (Ø16×44 мм) фирмы Siemens [5], обозначенные на схеме как C_j (C6–C16), соединены последовательно-параллельно с увеличением числа конденсаторов по мере удаления от низковольтной ступени умножения. Правила соединения высоковольтных компонентов описаны авторами в [2]. Каждый из конденсаторов C_j зашунтирован разрядным высоковольтным резистором R с сопротивлением 48 МОм.

Токоограничительные объемные резисторы R9–R26 типа отечественных ТВО-10 Вт (суммарное сопротивление $R_0 = 1,78$ кОм × 18 шт. ≈ 32 кОм) включены последовательно с выходом умножителя. Компенсация влияния падения высокого напряжения на токоограничительных резисторах R9–R26, включенных вне контура ОС по высокому напряжению, производится с помощью резистора R8. ДВН состоит из пяти высоковольтных (20 кВ) высокоомных (40 МОм ±1%) резисторов R27–R31 (мощностью не менее 5 Вт), соединенных последовательно, с суммарным сопротивлением 200 МОм, т. е. ток через ДВН равен $I_{ДВН} \approx 0,27$ мА. Низковольтный резистор R32 имеет сопротивление 20 кОм. Выходы сигналов ОС по анодному току и высокому напряжению с датчиков I_a и U_B , а также схемы компенсации (R8, VD15) защищены от пробоя искровыми разрядниками F1–F3. Высоковольтный блок выполнен в металлическом кожухе, заполненном трансформаторным маслом, и имеет устройство воздушного охлаждения посредством мощных вентиляторов.

В источнике Kristalloflex 710H предусмотрены следующие виды защит от перегрузок и аварий по высоковольтному выходу со световой индикацией на лицевой панели блока управления:

- от недопустимых изменений питающего сетевого напряжения (выход за допуск или пропадание напряжения) — путем выключения;
- от токовых перегрузок и коротких замыканий (КЗ) — выключением инвертора, ТВУ и контактора в УВкл, а также разрядом конденсаторов большой емкости в ТВУ;
- от перенапряжений:
 - а) включением упомянутых токоограничительных резисторов R9–R26, устойчивых к кратковременным перенапряжениям большой величины;
 - б) срабатыванием триггерной защиты в УУ1 при превышении допустимой величины сигнала обратной связи по напряжению с ДВН;
- от обрыва цепи накала нагрузки (ПТ);
- от пропадания высокого напряжения;
- от превышения допустимой мощности на выходе (нагрузке), поскольку $P_{\text{вых max}} = 2,7$ кВт > $U_{B \text{ max}} \times I_{a \text{ max}} = 55$ кВ × 60 мА = 3,3 кВт;
- от недопустимого перегрева масла в ВВ-блоке — с помощью датчика температуры на термопаре.

Об истории разработки отечественного аналога высоковольтного источника питания Kristalloflex 710H (Siemens)

В общем контексте статьи определенный интерес представляют проблемы разработки в то время отечественного аналога ВВИП типа Kristalloflex 710H с учетом возможностей отечественных компонентов. В принципе, они характерны для многих изделий подобного рода, кроме, возможно, изделий военного назначения, и в том или ином виде существуют и в настоящее время.

Натурный образец источника Kristalloflex 710H (Siemens) вместе с техническим описанием был изучен в НПО «Буревестник» ведущими специалистами Старчиковым А. Н. и Власовым К. К. Несмотря на наличие полномасштабного аналога, основные трудности были связаны, прежде всего, с определением возможности осуществления адекватных замен силовых компонентов (транзисторов BUV 98 А и антипараллельных диодов к ним), высоковольтных диодов и некоторых других компонентов [7]. Также требовали серьезной проработки вопросы рациональной структуры преобразовательного ВВИП, обеспечения его устойчивой работы в разных режимах. Особое значение имело создание надежной комплексной защиты.

Первоначально рассматривалась возможность прямых замен компонентов. Так, мощный транзистор BUV 98А ($U_{CE0} = 450$ В/ $U_{CB0} = 1000$ В, $I_C = 30$ А/60 А имп, $P_{tot} = 150$ Вт) можно было бы заменить параллельным соединением нескольких отечественных транзисторов, например:

- КТ840А ($U_{CE0} = 400$ В/ $U_{CB0} = 900$ В, $I_C = 6$ А (8 А имп), $P_{tot} = 60$ Вт) — 6 шт.;
- КТ841А ($U_{CE0} = 400$ В/ $U_{CB0} = 600$ В, $I_C = 10$ А (15 А имп), $P_{tot} = 50$ Вт) — 5 шт.;
- КТ872А ($U_{CE0} = 700$ В/ $U_{CB0} = 1500$ В, $I_C = 8$ А (15 А имп), $P_{tot} = 100$ Вт) — 5 шт.

При этом необходимо было дополнительно: а) включать симметрирующие резисторы в эмиттер каждого транзистора; б) производить определенный отбор транзисторов, избегая, например, использования образцов транзисторов с аномально хорошими параметрами (значительно лучшими, чем средний уровень). Для применения в качестве обратно включенных (антипараллельных) диодов для транзисторов можно было использовать 3–4 последовательно соединенных быстродействующих диода типа КД2997 ($U_{RRM} = 200$ В, $I_{FAV} = 30$ А, $f_{max} = 100$ кГц). Примерно так же обстояло дело и с выбором отечественных ВВ-диодов. В наличии практически были только маломощные высоковольтные столбы типа КЦ106Г с параметрами: $U_{RRM} = 10$ кВ, $I_{FAV} = 10$ мА, $f_{max} = 20$ кГц. Для обеспечения тока порядка 60 мА требовалось параллельно включить не менее восьми таких столбов, то есть всего более 150 штук. При этом следовало отбирать их по величине прямого падения напряжения U_F . Определенную сложность представляло проектирование ВВ-трансформатора из-за отсутствия отечественных ферритовых сердечников с большим сечением и параметрами (B_{np} , потери), близкими к зарубежным.

По этим причинам начальные попытки проработать основные блоки по прямой аналогии с ВВИП типа Kristalloflex 710 Н потерпели неудачу. Более реальными были усилия по разработке модулей и блоков преобразовательного ВВИП с мощностью 1(1,5) кВт. Тем более для некоторых модификаций рентгеновских аппаратов типа ДРОН требовались облегченные режимы работы ВВИП, например: 30 кВ/30 мА; 40 кВ/25–30 мА; 50 кВ/20–25 мА. Далее можно было комплексовать в одном ВВИП разработанные менее мощные модули и блоки: параллельно — на стороне низкого напряжения, последовательно — на стороне высокого. (Отметим, что и в настоящее время разработка мощных ВВИП является далеко не простым делом, хотя трудностей с компонентами стало значительно меньше.) Заканчивая поучительную историю о разработке мощного источника высокого напряжения в конце 80-х гг., скажем, что в 90-х аппараты типа ДРОН-4, ДРОН-6 продолжали по-прежнему комплектоваться громоздкими низкочастотными ВВИП типа ИРИС-М, что вызывало все более серьезные претензии заказчиков. Учитывая все это, в 2001 г. было принято решение о приобретении импортных преобразовательных ВВИП типа Comrast 3K5 итальянской фирмы Ital Structures [8], что экономически оказалось более выгодно, чем своя длительная разработка. Электрические параметры этого блока несколько лучше по параметрам ВВИП Kristalloflex 710Н. К тому же сам блок выполнен на современных компонентах (IGBT, драйверы) и более совершенен по конструкции.

Высоковольтный источник питания 250 Вт (50 кВ/5 мА)

Кроме преобразовательных источников высокого напряжения мощностью в несколько киловатт, в ОАО «НПП «Буревестник» также существовала потребность в ВВИП на мощно-

сти в сотни ватт. К примеру, много лет не удавалось по разным причинам создать преобразовательный источник на 250–300 Вт для сканирующего рентгеновского спектрометра СПАРК-3. В самом начале 2000-х гг. на предприятии для модернизированного аппарата СПАРК-3М был разработан преобразовательный ВВИП-50 кВ/5 мА. В процессе создания этого источника было выполнено несколько версий, в том числе первая версия под руководством одного из авторов (Ланцов В. В.). В разработке ВВИП-50 кВ/5 мА принимали участие ведущие специалисты предприятия: блок управления — Кирсанов А. Л., Орлова Н. Е.; высоковольтный блок (ГУ) — Старчиков А. Н. и, в основном, Мищенко Л. С. Доработка ВВИП (вторая версия) и его испытания производились под руководством Орлова В. А. Вниманию читателей предлагается усовершенствованная (третья) версия этого источника, доработанная авторами статьи с заменой некоторых модулей и компонентов.

На рис. 2 представлена упрощенная схема преобразовательного ВВИП-50 кВ/5 мА.

Структурно ВВИП-50кВ/5мА включает в себя:

Блок управления в составе:

- низковольтный источник вторичного электропитания (А1) с выходной мощностью до 350 Вт, имеющий пять выходных каналов: +200, +24, ±15 В; 1(+15 В.1 — 0 В.1 — -15 В.1); +15 В.2 (0 В.2);
- модуль ВЧ-преобразователя СВН (А2) на основе полумостового инвертора с питанием силовых ключей от напряжения +200 В, а управляющих драйверов — от +15 В.1 и +15 В.2;
- модуль преобразователя САТ (А3) на основе двухтактного инвертора с трансформатором TV1, питанием силовых ключей от напряжения +24 В, а управляющего драйвера — от +15 В.1;
- устройство управления (А4) с питанием от ±15 В.1.

Высоковольтный блок (ГУ) в составе:

- высоковольтные трансформаторы TV2, TV3;
- модули выпрямителей-умножителей В1, В2;
- накальный высокопотенциальный трансформатор TV4;
- датчик обратной связи (ОС) по анодному току I_a на резисторе R1;
- датчик ОС по высокому (анодному) напряжению $-U_a(-U_a)$ — делитель высокого напряжения (ДВН) на резисторах R8–R20;
- защитные компоненты: варисторы R1, R4, токоограничительные резисторы R5–R7 и термоконтактор К.

Основные параметры компонентов ВВИП-50/5 в обобщенном виде приведены в таблице.

Низковольтный преобразовательный ИВЭ (А1)

ИВЭ (А1) — типа ПВГ-01 разработан и поставлен ЗАО НПП «ПИК» (Санкт-Петербург) [9]. Источник ПВГ-01 имеет следующие параметры:

- выходные напряжения и токи ($U_{вых}/I_{вых}$): +200 В/1,5 А; +24 В/1,5 А; ±15 В.1(+15 В.1 — 0 В.1 — -15 В.1)/0,3 А; +15 В.2/0,3 А, при этом

канал +24 В имеет свой стабилизированный преобразователь;

- нестабильность выходных напряжений $\delta U_{вых}$ при изменении: сетевого питания (+10%, -15%) $\leq 0,3\%$; тока нагрузки $\leq 0,5\%$;
- коэффициент пульсаций $K_{\tau} \leq 0,5\%$;
- частота преобразования 200 кГц;
- габаритные размеры 220×95×44 мм ($V = 0,92$ дм³), масса — 0,7 кг;
- удельная мощность $p_V = 380$ Вт/дм³.

Модуль преобразователя СВН (А2)

В этом модуле полумостовой инвертор образован силовыми ключами СК1, СК2 на N-канальных MOS-транзисторах VT1, VT2 типа IRFP 460 (International Rectifier) [10] и конденсаторами C10, C11. Параметры IRFP 460 ($U_{DSS} = 500$ В, $I_D = 20$ А, $P_D = 280$ Вт; $R_{DS\ on} = 0,27$ Ом; $t_{on}/t_{off} = 77/170$ нс) позволяют эффективно работать на частоте преобразования инвертора 20–24 кГц и получить высокий КПД. Для исключения подмагничивания высоковольтных трансформаторов TV2, TV3 в ВВ-блоке (ГУ), на выходе инвертора включен разделительный конденсатор С8 (2,2 мкФ, 400 В) последовательно с демпфирующим резистором R7 (1 Ом). Подавление выбросов напряжения при переключении VT1, VT2 осуществляется благодаря демпфирующим цепям R8C7, R10C9 (75 Ом, 1,5 нФ). ШИМ-управление ключевыми транзисторами VT1, VT2 производится через практически идентичные устройства управления УУ СК1, УУ СК2 (управляющие драйверы) с выходов центрального устройства управления УУ (А4). В составе каждого из УУ СК на входе имеется узел гальванической развязки на быстродействующей ($t_{on}/t_{off} = 200/300$ нс) оптопаре DA1 (DA3) с высоковольтной (2500 В) гальванической развязкой типа 6N136-SIE (Siemens) [5]. Каждая оптопара работает на свой одноканальный драйвер DA2 или DA4 типа IR2125 (IR) [10], осуществляющий функции порогового формирования сигналов, импульсного усилителя мощности и защиты от токовых перегрузок. Защита драйверами IR2125 транзисторов VT1, VT2 от токовых перегрузок производится по сигналам с датчиков тока на резисторах R6, R9 (0,33 Ом, 5 Вт) в истоковых цепях VT1, VT2 через формирующие RCR-цепи (например, R3C6R5). Обрамление драйверов IR2125 выполнено по стандартной схеме, рекомендуемой фирмой. Параметры драйверов IR2125:

- максимальное выходное напряжение $U_{o\ max} = 15-18$ В (при питании от 15–18 В), максимальный импульсный выходной ток $I_{o\ max} = +1$ А/–2 А;
- напряжение верхнего уровня $U_{offset} = 600$ В;
- быстродействие $t_{on}/t_{off} = 150/150$ нс.

Для обеспечения надежности функционирования драйвера DA2, управляющего высокопотенциальным (верхним) СК1, использовано питание выхода драйвера отдельным напряжением +15 В.2. При этом также применена схема так называемого «бутстрепного» питания с блокирующим высоковольтным (1000 В) быстродействующим ($t_{rr} = 100$ нс) диодом VD2 типа ВУТ11/1000/ST

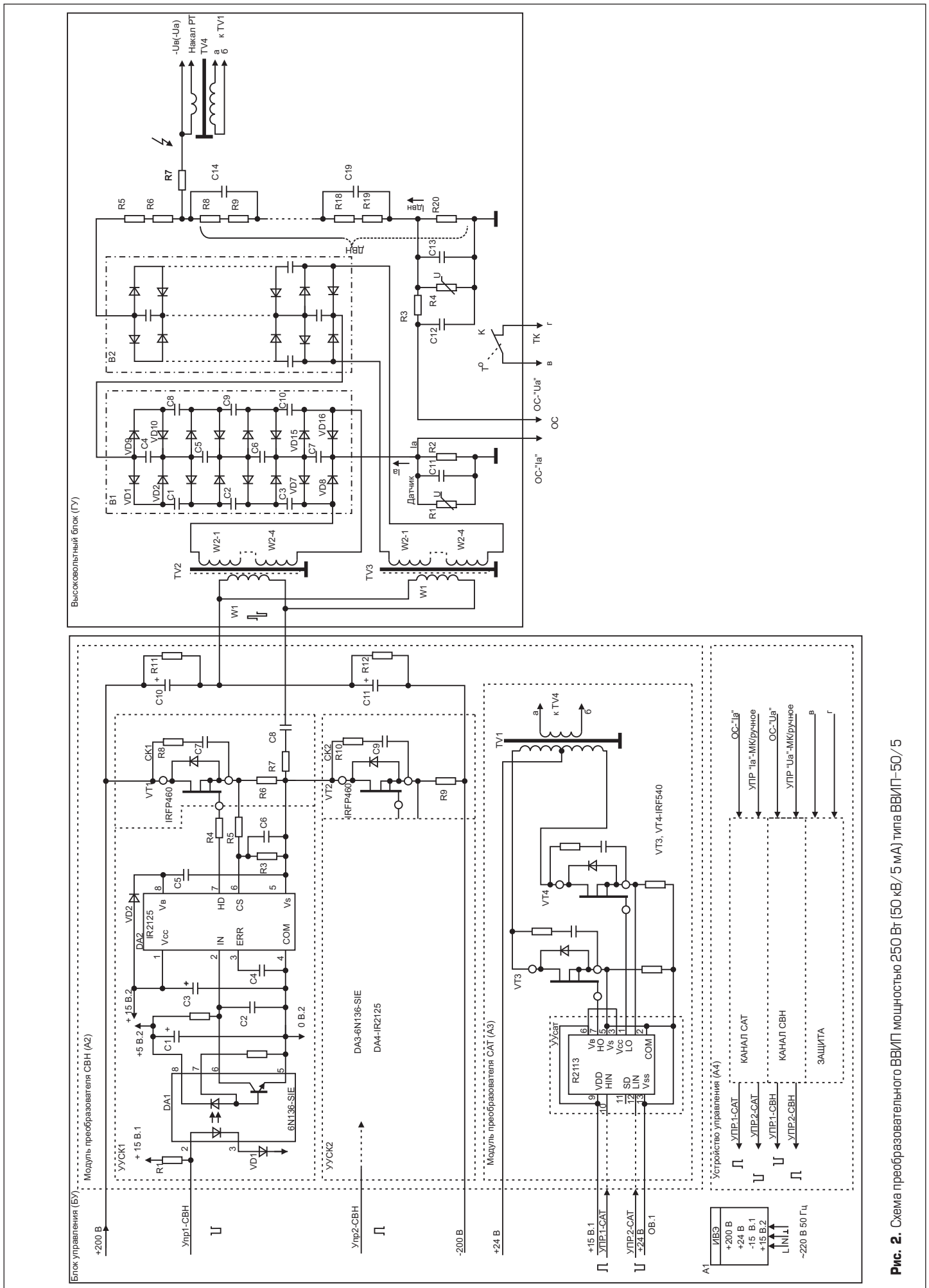


Рис. 2. Схема преобразовательного ВВИПТ мощностью 250 Вт (50 кВ/5 мА) типа ВВИП-50/5

(STMicroelectronics) [11]. УУ СК1 и УУ СК2 управляются импульсами, сдвинутыми по фазе на 180° от схемы управления в канале СВН в центральном УУ (А4). В этой схеме управления (подробно далее см. рис. 3) изменение длительности (ширины) импульсов происходит в микросхеме ШИМ-контроллера типа TL494CN (Fairchild) [12], управляемого, в свою очередь, сигналом с усилителя обратной связи (УОС-СВН) по высокому напряжению.

Модуль преобразователя САТ (А3)

В этом модуле инвертор питается от напряжения +24 В и выполнен по двухтактной схеме на N-канальных MOS-транзисторах VT3, VT4 типа IRF 540 (IR) [10] и трансформаторе TV1. Параметры IRF 540: $U_{DSS} = 100$ В, $I_D = 28$ А, $P_D = 150$ Вт; $R_{DS\ on} = 0,08$ Ом; $t_{on}/t_{off} = 80/160$ нс. Инвертор работает на частоте преобразования 14–18 кГц, чтобы разнести частотные диапазоны СВН и САТ. Управление VT3, VT4 производится от УУ_{САТ} на основе двухканального

драйвера IR2113 (IR) [10] без гальванической развязки. Параметры IR2113: $U_{o\ max} = 20$ В, $I_{o\ max} = \pm 2$ А, $U_{offset} = 600$ В; быстродействие: время задержки $t_D = 20$ нс, $t_{on}/t_{off} = 120/94$ нс. Обрамление драйвера IR2113 выполнено по стандартной схеме, рекомендуемой фирмой IR. УУ_{САТ} управляется импульсами, сдвинутыми по фазе на 180° от схемы управления в канале САТ в центральном УУ (А4). Управление (подробно далее см. рис. 3) производится изменением длительности (ширины)

Таблица. Основные параметры компонентов в схеме ВВИП-50 кВ/5 мА (рис. 2)

Блок, модуль	Обозначение компонента	Тип (фирма)	Основные параметры	Примечание
Блок управления (БУ)				
Источник питания (А1)	–	ПВГ-01 (ЗАО НПП «ПИК», СПб)	$P_{\text{вых max}} = 350$ Вт; $U_{\text{вых}}/I_{\text{вых}} = +200$ В/1,5А; +24 В/1,5 А; ±15 В.1/0,2А; +15 В.2/0,1А	Импульсный ИВЭ. Габариты: 220×95×40 мм
Модуль преобразователя СВН (А2)	VT1, VT2	IRFP 460 (IR)	MOS: $U_{DSS} = 500$ В, $I_D = 20$ А, $P_D = 280$ Вт; $R_{DS\ on} = 0,27$ Ом; $t_{on}/t_{off} = 77/170$ нс Диод: $I_{F\ AV} = 20$ А, $U_F = 1,8$ В; $t_r < 570$ нс	MOSFET, N-канал. Корпус TO-247AC
	VD1	1N4148	$U_{RRM} = 75$ В, $I_{F\ AV} = 0,15$ А, $U_F = 1$ В (10 мА), $I_R = 25$ нА; $t_r = 4$ нс	Корпус DO-35
	VD2	BYT11/1000/ST (STM)	$U_{RRM} = 1000$ В, $I_{F\ AV} = 1$ А, $U_F = 1,3$ В; $t_r = 1000$ нс	Корпус DO-14
	DA1, DA3	6N136-SIE (Siemens)	Вход (оптодиод): $I_{F\ max} = 25$ мА. Выход (оптотранзистор): $U_{CE\ max} = 15$ В, $I_C\ max = 8$ мА, $U_{CE\ sat} = 0,4$ В; $CNR > 15\%$, $U_{col} = 2500$ В; $t_{on}/t_{off} = 200/300$ нс	Оптопара транзисторная быстродействующая. Корпус DIP8
	DA2, DA4	IR2125 (IR)	$U_{o\ max} = 18$ В, $I_{o\ max} = I_{\text{вых max}} = +1А/-2А$, $U_{CS} = 230$ мВ, $U_{offset} = U_g = 600$ В, $U_s = U_n = +18$ В; $t_{on}/t_{off} = 150/150$ нс	Одноканальный драйвер верхнего уровня (PDIP8)
	C1, C3	K53-34-2	32 В–3,3 мкФ ±20%	Оксидно-полупроводниковый
	C2	K10-73-16-M47	50 В–820 пФ ±10%	Керамический
	C4, C5, C6	K10-73-16-H50	50 В–0,033 мкФ ±10%	
	C7, C9	K15-5	1,6 В–1500 пФ	Пленочные полиэтилентерафталатные
	C8	MKS4	400 В–2,2 мкФ ±10%	
	C10, C11	ELP / LLQ2A (Nihon)	250 В–220 мкФ ±20%	Электролитический
	R1	C2-33H	0,25 Вт–1,2 кОм ±5%	Непроволочные неизолированные
	R2	C2-33H	0,125 Вт–3,3 кОм ±5%	
	R4	C2-33H	0,25 Вт–8,2 кОм ±5%	
	R6, R9	AX5W	5 Вт–0,33 Ом ±10%	
R7	AX9W	9 Вт–1 Ом ±5%	Проволочный цементный	
R8, R10	C2-33H	2 Вт–75 Ом ±5%	Непроволочные неизолированные	
Модуль преобразователя САТ (А3)	VT3, VT4	IRF 540 (IR)	MOS: $U_{DSS} = 100$ В, $I_D = 28$ А, $P_D = 150$ Вт; $R_{DS\ on} = 0,08$ Ом; $t_{on}/t_{off} = 80/160$ нс. Диод: $I_{F\ AV} = 20$ А, $U_F = 1,3$ В; $t_r < 250$ нс	MOSFET, N-канал. Корпус TO-220
	DA5	IR2113 (IR)	$U_{o\ max} = U_{\text{вых max}} = 20$ В, $I_{o\ max} = I_{\text{вых max}} = \pm 2$ А, $U_{offset} = U_s = 600$ В, $U_s = U_n = +20$ В; $t_D = 20$ нс; $t_{on}/t_{off} = 120/94$ нс	Двухканальный драйвер. Корпус DIP14
Устройство управления – УУ (А4)	–	LF355N (NSC)	$K_U \geq 2 \times 10^5$, $I_{\text{вх}} \leq 3$ нА, $\Delta U_{\text{вх}} \leq 0,5$ мВ; $F_{\text{max}} = 2,5$ МГц	Одноканальные ОУ (DIP8)
	–	LT1431 (LT)	$U_{\text{ref}} = 2,4-3,6$ В, $I_{\text{max}} = 100$ мА, $\delta U_{\text{ref}}/U_{\text{ref}} \leq \pm 0,005\%/^{\circ}\text{C}$	Источник опорного напряжения
	–	LM339 (NSC)	$K_U \geq 2 \times 10^5$, $I_{\text{вх}} \leq 25$ нА, $\Delta U_{\text{вх}} \leq 3$ мВ; $t_D \leq 1,3$ мкс	4-канальные компараторы (DIP14).
	–	TL494CN (Fairchild)	$\Delta U_{\text{FB}} \leq 2$ мВ (тип), $U_{\text{ref}} = 5 \pm 0,25$ В; $U_{\text{CC}} = 7-40$ В $I_{C1} = I_{C2} \leq 0,2(0,5)$ А, $f_{\text{max}} = 200$ кГц, $t_r/t_f = 200/100$ нс, DTC («мертвое время») – до 5% периода	ШИМ- контроллеры (DIP16)
	–	K561 (КМОП-логика)	$U_s = +[3-15]$ В, $U^0 = 0,5$ В, $U^1 = U_s - 0,05$ В; $t_D = 20-60$ нс	Логические микросхемы (DIPxx)
Высоковольтный блок (ГУ)				
Выпрямитель-умножитель (В1, В2)	VD1...VD16	DD1800 (Diotec)	$U_{RRM} = 18$ кВ, $I_{F\ AV} = 20$ мА, $U_F = 40$ В, $I_R = 25$ мкА; $t_r = 150$ нс	Корпус Ø3×2мм («тело»)
	C1...C10	K73-14	10 кВ–2200 пФ ±10%	Пленочные полиэтилентерафталатные
	C11...C13	K73-17	400 В–0,047 мкФ ±20%	Полиэтилентерафталатные металлизированные
	C14...C19 (Panasonic)	15 кВ–470 пФ	Керамические	
	R1, R4	595-30 (Philips)	$U_{\text{max}} = 30$ Вэфф, $U_{\text{max}}/U_1 = 38$ В/47 В (1 мА), $I_{\text{max}} = 1$ кА (8/20 мкс)	Варистор металлооксидный
	R2	C5-5B	2,4 кОм ±0,2%	Проволочный прецизионный
	R3	C2-29B	0,25 Вт–100 Ом ±1%	Непроволочный прецизионный
	R5...R6	TBO-	5 Вт–75 кОм ±5%	Объемные резисторы
	R7	TBO-	2 Вт–10 кОм ±5%	
	R8...R19	VR-68	1 Вт–68 МОм ±1%; 10 кВ./7 кВэфф	Металлопленочные высоковольтные
	R20	MPX	0,125 Вт–505 кОм ±0,05%	Микропроволочный
	K	BTL-050	+50±3 °С	Термоконтактор
	TV2, TV3	–	Сердечник: М3000 НМС-1 ПК 30×16 Первичная: $W_1 = 120$ витков (4 ряда, 2 слоя бумаги между рядами) ПЭТВ-2 Ø0,25 мм. Вторичная высоковольтная: $W_2 = 4 \times 495$ (4 секции) ПЭТВ-2 Ø0,14 мм, $R = 250$ Ом	Высоковольтные трансформаторы
	TV4	–	Сердечник: М3000 НМС-1 ПК 26×13. Первичная: $W_1 = 40 \times 2$ витков (3 ряда, 2 слоя бумаги) ПЭТВ-2 Ø0,25 мм. Вторичная высоковольтная: $W_2 = 6$ витков (3 ряда) ПЭТВ-2 Ø1,5 мм	Накальный высокопотенциальный трансформатор

импульсов в микросхеме ШИМ-контроллера типа TL494CN (Fairchild) [12], управляемого, в свою очередь, сигналом с усилителя обратной связи (УОС-САТ) по выходному (анодному) току ВВИП. Трансформатор TV1 введен как промежуточный для повышения электробезопасности питания накального трансформатора TV4 в ВВ-блоке.

Устройство управления ВВИП-50/5

Устройство управления ВВИП-50/5 (А4) выполняет следующие функции:

- стабилизацию высокого напряжения U_B и его регулирование в пределах от -50 до -10 кВ;
- стабилизацию анодного тока I_a и его регулирование в пределах $0,5-5$ мА;
- комплексную защиту от различных перегрузок и аварийных ситуаций.

Рассмотрим более подробно реализацию каналов обратной связи и управления для СВН и САТ. Предварительно сделаем ряд важных замечаний.

В отличие от устройств управления низковольтными преобразовательными ИВЭ, в преобразовательных ВВИП с выходом на постоянном токе не удастся непосредственно использовать микросхемы резонансных, а также ШИМ-/ЧИМ-контроллеров как из-за высокого напряжения (очень большой коэффициент деления напряжения высокоомного

ДВН — $1000:1-10000:1$), так и по требованиям высокой стабильности. Такое положение объясняется недостаточными параметрами встроенных в микросхемы контроллеров узлов. Во-первых, встроенные усилители сигнала ошибки имеют недостаточно большие значения коэффициента усиления ($K_u = 2000-90000$), значительную величину смещения нуля $\Delta U_{вх} = 2-10$ мВ и низкое входное сопротивление $R_{вх} \leq 1$ МОм. Оставляют желать лучшего и параметры встроенного источника опорного напряжения (ИОН). Например, у ШИМ-контроллера TL494CN параметры ИОН (Reference): $U_{ref} = 5 \pm 0,25$ В; нестабильность U_{ref} в рабочем диапазоне: по напряжению $\delta U_{refU} = 0,1-0,5\%$, по температуре $\delta U_{refT} = 0,2-1\%$. Имеются и другие особенности. В этой связи в устройствах управления источниками высокого напряжения для питания РТ в большинстве случаев предусматривается:

- использование в цепях ОС операционных усилителей с высокой чувствительностью (очень большим K_u), малыми величинами смещения нуля и температурного дрейфа, большим входным сопротивлением;
- использование ИОН с низкими значениями ТКН и временного дрейфа на основе или прецизионных стабилитронов, или интегральных микросхем регулируемых ИОН;
- обеспечение как большой величины основных постоянных времени (сотни миллисекунд) в цепи ОС каналов усиления СВН и САТ, так и определенных соотношений между ними.

Упрощенная схема каналов ОС и управления СВН и САТ представлена на рис. 3. Для наглядности на схеме (рис. 3) приведены типы активных и значения номиналов пассивных компонентов.

В указанном выше аспекте в описываемое устройство управления входят:

- канал усилителя обратной связи СВН (УОС-СВН/А1);
- канал усилителя обратной связи САТ (УОС-САТ/А2);
- общий источник опорного напряжения (ИОН/А3);
- ШИМ-контроллер для управления СВН (А4);
- ШИМ-контроллер для управления САТ (А5).

Канал обратной связи и управления СВН

В канале УОС-СВН/А1 входной узел — это прецизионный повторитель напряжения ($K_{y1} = 1$) с конвертированием импеданса выходного сопротивления ДВН из высокоомного на низкоомный на основе DA1 — ОУ типа LF355N (National Semiconductor) [13]. Параметры LF355N [14]: коэффициент усиления $K_u \geq 2 \times 10^5$, входной ток $I_{вх} \leq 3$ пА, смещение нулевого уровня $\Delta U_{вх} \leq 0,5$ мВ, входное сопротивление $R_{вх} \geq 10^{12}$ Ом. Напряжение ОС (« $-U_B$ ») в диапазоне $1-10$ В с резистора R1* (240 кОм) поступает на неинвертирующий вход DA1 (вывод 3). Резистор

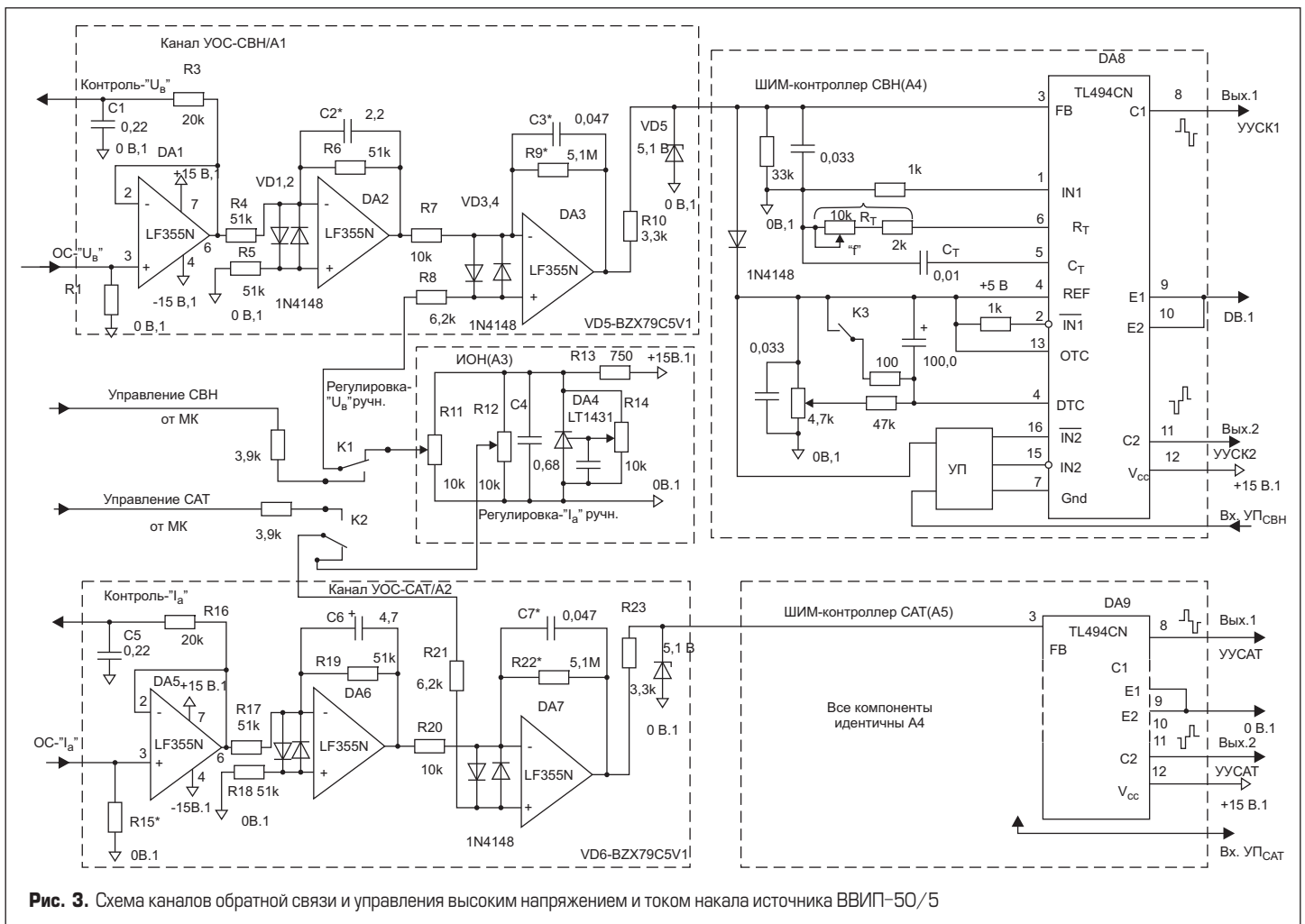


Рис. 3. Схема каналов обратной связи и управления высоким напряжением и током накала источника ВВИП-50/5

$R1^*$ шунтирует более высокоомный выход (505 кОм) нижнего низковольтного плеча ДВН ($R_{нв}$) в ВВ-блоке с целью снижения уровня помех и подгонки величины максимального напряжения обратной связи (ОС) до 10 В. Инвертирующий вход DA1 (вывод 2) замкнут с выходом микросхемы (вывод 6), т. е. имеет место 100%-ная последовательная отрицательная ОС. Благодаря высокому уровню параметров ОУ LF355N, приведенная погрешность коэффициента передачи входного напряжения ($K_{y1} = 1$) не превышает $\pm 0,1\%$. Питание DA1, так же как и остальных ОУ, осуществляется двухполярным напряжением ± 15 В.1 (+15 В.1 — 0 В.1 — -15 В.1). С выхода первого каскада напряжение ОС поступает: а) на зажим контроля высокого напряжения через разделительно-фильтрующую цепь R3C1 («Контроль- U_b »); б) на вход второго каскада. Второй каскад — инвертирующий прецизионный повторитель ($K_{y2} = -1$) на DA2 и также выполнен на LF355N, охватенном параллельной отрицательной ОС через R6C2*. Входной резистор R4 и резистор ОС R6 — типа C2-29 В-0,125 Вт-51 КОм $\pm 0,25\%$. Конденсатор C2* — керамический, типа K10-17, и подбирается при регулировке в пределах 1–3,3 мкФ. Совместно с резистором R4 и микросхемой DA1 он образует активное апериодическое звено первого порядка и осуществляет коррекцию амплитудно-частотной характеристики СВН для обеспечения необходимой устойчивости. Постоянная времени $\tau_1 = R_4 \times C_2^*$ является основной для усилительного тракта и при указанных значениях компонентов равна 0,051–0,16 с. Таким образом, первый «излом» логарифмической АЧХ (ЛАЧХ) системы регулирования СВН происходит на инфранизкой круговой частоте $\omega_1 = 1/(R_4 \times C_2) \approx 6\text{--}20$ рад/с (или $f_1 \approx 1,2\text{--}3,3$ Гц). ЛАЧХ СВН, начиная с этой точки, имеет наклон -20 дБ/дек, что обеспечивает устойчивую работу и характерно для всех СВН. С выхода второго каскада положительное напряжение ОС через резистор R7 (10 кОм) поступает на вход (инвертирующий вход DA3) третьего усилительного каскада. ОУ охватен параллельной отрицательной ОС через подборный резистор R9*. Приведенное на схеме значение сопротивления R9* (5,1 МОм) используется при начальной регулировке канала, чтобы обеспечить заведомо устойчивую работу СВН. При этом коэффициент усиления этого каскада составляет $K_{y3} = R_9^*/R_7 = 5,1$ МОм/10 кОм = 510. При комплексной настройке ВВИП для получения высокой стабильности высокого напряжения при выбранной структуре значение K_{y3} должно быть не менее 5000. То есть значение сопротивления резистора R_9^* будет порядка 51–100 МОм. При очень высоких требованиях к стабильности U_b этот резистор совсем отключается, и величина K_{y3} определяется коэффициентом усиления LF355N ($K_u \geq 2 \times 10^5$). Конденсатор C3* (0,022–0,1 мкФ), включенный параллельно R9*, совместно с R7 образует еще одно апериодическое звено в тракте усиления с постоянной времени $\tau_2 = R_7 \times C_3^* = 10$ кОм \times (0,022–0,1 мкФ) = 0,22–1 мс. Основное назначение этой цепи — препятствовать самовозбуждению третьего усилительного каскада,

особенно при очень больших значениях K_{y3} , а также ослаблять пульсации удвоенной частоты преобразования инвертора (32–48 кГц). Вместе с тем постоянная времени τ_2 образует второй «излом» логарифмической АЧХ (ЛАЧХ) системы регулирования СВН на низкой круговой частоте $\omega_2 = 1/\tau_2 \approx 1000\text{--}4500$ рад/с ($f_2 \approx 160\text{--}720$ Гц). ЛАЧХ СВН в этой точке приобретает дополнительный наклон -20 дБ/дек.

В третьем каскаде на неинвертирующий вход DA3 через резистор R8 (6,2 кОм) подается управляющее напряжение (уставка), благодаря которому в результате происходит изменение высокого напряжения. Управляющим напряжением является или положительное опорное напряжение $U_{оп} = 1\text{--}10$ В («Регулировка «- U_b »/ручное»), или положительное напряжение от внешнего микроконтроллера («Управление СВН от МК»). Источник опорного напряжения ИОН/A3 выполнен на микросхеме DA4 регулируемого высокостабильного ИОН типа LT1431 (Linear Technology) [15]. Параметры LT1431: $U_{оп} = 2,5\text{--}36$ В/1–100 мА, $U_{опТ} = \pm(0,003\text{--}0,005)\%$ / °С, $U_{н} = 3\text{--}40$ В. При необходимости можно применить и более прецизионную микросхему, например LM4050 [16]. Питание ИОН производится от напряжения +15 В.1. Плавное изменение опорного напряжения осуществляется посредством линейного прецизионного потенциометра R11 (10 кОм $\pm 0,25\%$) с оцифрованным верньерным устройством. Переключение режимов управления из ручного в автоматический достигается при помощи контакта K1 одноименного реле, обмотка которого коммутируется тумблером на лицевой панели блока управления ВВИП. На выходе третьего каскада включен ограничитель напряжения R10 (3,3 кОм) — VD5 (стабилитрон BZX79C5V1), который ограничивает положительное выходное напряжение на уровне $5,1 \pm 0,25$ В, а отрицательное — величиной -1 В.

Двухтактный ШИМ-контроллер СВН/A4 собран на микросхеме DA8 типа TL494CN фирм Fairchild [12] или Texas Instruments [16]. Ее основные параметры: опорное напряжение $U_{ref} = 5 \pm 0,25$ В/10 мА, коэффициент усиления усилителя ошибки $K_u = 70\text{--}95$, частота генератора $f_2 = 1\text{--}300$ кГц, $I_{вых\ max} = 200$ мА; $U_{н} = 7\text{--}40$ В [17]. Питание DA8 производится от напряжения +15 В.1. Оформление микросхемы TL494CN в данном случае заметно отличается от рекомендованного для использования в низковольтных ИВЭ. Во-первых, благодаря наличию усилительного каскада на DA3 с большим коэффициентом усиления, встроенный в микросхему DA8 усилитель напряжения «1» (обозначение по структуре микросхемы) не используется. Усиленный ранее сигнал ошибки СВН с выхода третьего каскада на DA3 поступает прямо на выход усилителя «1» (вывод 3 — «FB»). При этом на инвертирующий вход усилителя «1» (вывод 2 — « $\overline{IN1}$ ») через сопротивление 1 кОм подается напряжение +5 В с встроенного ИОН (вывод 14 — «REF»). А неинвертирующий вход этого усилителя (вывод 1 — « $\overline{IN1}$ ») также через 1 кОм соединен с нулевой шиной питания 0 В.1. Вследствие этого

на выходе усилителя «1» имеется низкий уровень напряжения («0»), не препятствующий прохождению усиленного сигнала ошибки с выхода третьего каскада усиления. Во-вторых, в узле плавного пуска ШИМ-контроллера между выводом 4 — «DTC» (Dead Time Correction, «коррекция «мертвого времени») и выводом 14 («REF») установлен электролитический конденсатор большой емкости (100 мкФ) вместо обычно рекомендуемого 10 мкФ. С учетом высокоомного резистора 47 кОм (соединен с выводом 4) при пуске реализуется плавное уменьшение паузы между импульсами (расширение импульсов) в интервале до 10 с. Контакт K3 одноименного реле производится быстрый разряд конденсатора 100 мкФ через сопротивление 100 Ом после выключения ВВИП. Отметим, что увеличение длительности «мертвого времени» в установленном режиме СВН может существенно регулироваться потенциометром 4,7 кОм (между выводами 14 и 4). Увеличенная начальная длительность паузы также характерна для систем стабилизации высокого напряжения. Это обстоятельство обусловлено задержкой выключения силовых ключей в инверторе из-за большой величины индуктивности рассеяния L_s высоковольтного трансформатора.

Узел защиты (УЗ) для упрощения схемы рис. 3 не раскрыт, но его действие основано на использовании встроенного в микросхему DA8 усилителя «2» для экстренного выключения инвертора СВН путем прекращения подачи выходных импульсов. УЗ работает от сигнала аварийной перегрузки по току инвертора при внутренних необратимых пробоях в ВВ-блоке или в рентгеновской трубке, а также при K3 монтажных линий нагрузки. С этой целью на неинвертирующий вход 16 (« $\overline{IN2}$ ») подано напряжение +2,5 В с резистивного делителя, подключенного к выводу 14 («REF»). На инвертирующий вход 15 (« $\overline{IN2}$ ») в нормальном (рабочем) режиме через резистор поступает опорное напряжение +5 В (также с вывода 14 «REF»). При возникновении перегрузок с помощью транзисторной оптопары (AOT 128Б), передающей сигнал перегрузки от датчика, происходит замыкание вывода 15 на нулевую шину питания 0 В.1. Вследствие этого на выходе усилителя «2» появляется напряжение высокого уровня и прекращается генерация импульсов на выходе DA8. Назначение остальных выводов микросхемы DA8 и внешняя адресация сигналов очевидны из схемы рис. 3.

Канал обратной связи и управления САТ

Канал УОС-САТ/A2 практически полностью идентичен каналу УОС-СВН/A1. Он выполнен также на микросхемах ОУ типа LF355N (DA5–DA7) и микросхеме ШИМ-контроллера типа TL494CN (DA9). Отличия состоят в следующем. Напряжение ОС по току (току накала РТ) « $-I_a$ » в диапазоне 1–10 В со сравнительно низкоомного резистора R15* (≈ 12 кОм) поступает на неинвертирующий вход DA1 (вывод 3). Резистор R15* шунтирует резистор (2,4 кОм) датчика тока в ВВ-блоке с целью снижения уровня помех и подгонки величины максимального сигнала обратной связи (ОС)

до 10 В. Здесь меньше требования к величине входного сопротивления ОУ, но развязывающий усилитель все равно нужен (в том числе и для контроля I_a). Назначение второго каскада усиления такое же, но величина емкости интегрирующего конденсатора C_6^* должна быть не менее чем в два раза больше, чем конденсатора C_2^* (в канале УОС-СВН/А1). Это объясняется тем, что скорость изменения высокого напряжения должна значительно опережать скорость изменения выходного тока (тока накала РТ, в частности).

ШИМ-контроллер (А5) в канале САТ на микросхеме DA9 полностью идентичен рассмотренному выше ШИМ-контроллеру СВН.

Высоковольтный блок (генераторное устройство)

Сразу же отметим, что «начинка» ВВ-блока помещена в металлический корпус, залитый трансформаторным маслом. Силовая высоковольтная часть представляет собой две подсхемы, включенные последовательно, причем каждая из них включает в себя высоковольтный трансформатор и высоковольтный выпрямитель-умножитель: соответственно TV2-B1 и TV3-B2. Высоковольтные трансформаторы TV2, TV3 выполнены на сердечниках типа M3000 НМС-1 ПК 30×16. Первичная обмотка W_1 имеет 120 витков, намотанных проводом ПЭТВ-2 Ø0,25 мм в четыре ряда с двумя слоями бумаги между рядами. Вторичная высоковольтная обмотка W_2 состоит из четырех секций W_{2-1} – W_{2-4} , в каждой из которых имеется 495 витков ПЭТВ-2 Ø0,14 мм, намотанных трапециевидно: 14×35+1×5. В обобщенном виде параметры ВВ-компонентов приведены в [2]. Модули ВВ выпрямителей-умножителей («х8») В1, В2 собраны на печатных платах, при этом каждый состоит из 16 ВВ-диодов (VD1–VD16) типа DD1800 (Diotec) [18] и из 10 конденсаторов (C1–C10) типа K73-14. Параметры диодов DD1800: $U_{RRM} = 18$ кВ, $I_{F,AV} = 20$ мА, $U_F = 40$ В, $I_R = 25$ мкА; $t_{rr} = 150$ нс; параметры конденсаторов K73-14: $C = 2200 \pm 10\%$ пФ, $U_{max} = 10$ кВ. Печатные платы модулей В1, В2 выполнены с печатными проводниками без острых краев, с плавными очертаниями. Дополнительно на каждый печатный контур по его периметру напаяны круглые медные проводники — для уменьшения напряженности электрического поля на острых краях. С этой же целью на тонкие выводы ВВ-диодов DD1800 надеты изолирующие трубки большего диаметра. Между сборками В1, В2, так же как и остальными сборками (ДВН), установлены так называемые «маслостойкие барьеры», т. е. прокладки из специальной бумаги, пропитанные маслом и жестко зафиксированные.

Последовательно с выходом более высокопотенциального умножителя В2 включены токоограничительные объемные резисторы типа ТВО: R5, R6 (75 кОм, 5 Вт) и R7 (10 кОм, 2 Вт). Накальный высокопотенциальный трансформатор TV4 подключен одним выводом к выходу высокого напряжения

«– U_B (– U_a) = от –10 до –50 кВ», а другим — к одному из выводов нити накала РТ. Проволочный прецизионный резистор R2 типа C5-5 (2,4 кОм $\pm 0,2\%$) является датчиком анодного тока I_a совместно с параллельно включенным резистором R15* в канале УОС-САТ/А2 (схема рис. 3) для удобства сопряжения. Ослабление ВЧ-пульсаций тока производится конденсатором C11 (0,047 мкФ, 400 В), а подавление перенапряжений — варистором R1 типа 595-30 (Philips) [6] с параметрами: $U_{max} \sim 30$ Вэфф, $U_{max}/U_1 = 38$ В/47 В (1 мА), $I_{max} = 1$ кА (8/20 мкс). Делитель высокого напряжения (ДВН) состоит из 12 прецизионных резисторов (R8–R19) верхнего плеча (R_{BB}) типа VR-68 (Philips) [6] и прецизионного микропроволочного резистора R20 нижнего плеча (R_{HB}). Параметры резисторов: VR-68 — 68 МОм $\pm 1\%$, ТКС $\leq \pm 0,02\%/^\circ\text{C}$; 1 Вт, 10 кВ $_{\pm 7}$ кВэфф; МРХ — 0,125 Вт, 505 кОм $\pm 0,05\%$. Таким образом, суммарное сопротивление верхнего плеча делителя составляет $R_{BB} = 816$ МОм, т. е. максимальный ток ДВН $I_{ДВН} = 61$ мкА. Ослабление ВЧ-пульсаций и помех на выходе ДВН производится C13R3C12-фильтром, а подавление перенапряжений — варистором R4 также типа 595-30 (Philips) [6]. Для удобства сопряжения со схемой управления параллельно R_{HB} в канале УОС-СВН/А1 включен резистор R1* (см. рис. 3). Также в ГУ имеется датчик температуры внутри масла на биметаллическом термодатчике (термореле) К типа BTL-050 с температурной уставкой $+50 \pm 3^\circ\text{C}$.

Выше частично были изложены особенности конструкции ГУ. Отметим еще, что маслостойкие барьеры, кроме В1, В2 и ДВН, установлены также на внутренние боковые стенки ГУ и на его днище. Все узлы прикреплены к верхней крышке ГУ.

Технические характеристики ВВИП-50/5

ВВИП-50/5 имеет следующие технические характеристики:

- выходное напряжение $U_B = (10-50)$ кВ;
- выходной (анодный) ток $I_a = (0,5-5)$ мА;
- максимальная выходная мощность $P_{\text{вых. max}} = 250$ Вт;
- нестабильность U_B и I_a при изменении сетевого напряжения — не более $\pm 0,01\%$ при работе от однофазной сети 220 В (+10%, –15%) 50 Гц;
- нестабильность U_B и I_a во времени (дрейф) — не более 0,2% за 24 ч работы (после 1 ч прогрева);
- коэффициент пульсаций U_B — не хуже $K_{\text{п}} = 0,3\%$;
- предусмотрена установка значений U_B и I_a как в ручном режиме от линейных потенциометров с оцифрованными верньерными ручками, так и от персонального компьютера (в составе прибора) или от микроконтроллера (МК).

Габаритные размеры блока управления — 200×120×275 мм (меньше не требовалось по конструктивным соображениям на прибор в целом).

В ВВИП-50/5 предусмотрены следующие виды защит от перегрузок и аварий по высоковольтному выходу:

- от токовых перегрузок и коротких замыканий (КЗ) благодаря:
 - выключению силовых ключей на транзисторах VT1, VT2 в модуле преобразователя СВН (А2) как по сигналу ОС с датчика тока I_a в ГУ (через УУ — триггерная защита), так и непосредственно по сигналам с резисторов R6, R9 в управляющих драйверах УСК1 и УУСК2 (ограничение тока);
 - наличию в ГУ токоограничительных резисторов R5–R7, устойчивых к тому же к кратковременным перенапряжениям большой величины;
- от перенапряжений вследствие:
 - срабатывания триггерной защиты в УУ1 при превышении допустимой величины сигнала обратной связи по напряжению ОС с ДВН;
 - наличию упомянутых резисторов R5–R7 (ГУ);
- от обрыва цепи накала (РТ);
- от пропавания высокого напряжения;
- от недопустимого перегрева масла (более $+53^\circ\text{C}$) в ГУ с помощью датчика температуры на термодатчике (К).

Авторы признательны известному специалисту по средствам электропитания к. т. н. Эраносюну С. А. за ценные советы при написании статьи и ее редактировании. Также авторы выражают благодарность Романовскому Ю. А. 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. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 2 // Силовая электроника. 2011. № 1.
3. Ланцов В., Владимиров Е. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 3 // Силовая электроника. 2011. № 2.
4. www.bouvestnik.com, www.bouvestnik.spb.ru
5. www.siemens.com
6. www.philips.com
7. Ланцов В., Эраносян С. Контрактная разработка силовых устройств: один из путей генерирования новых идей // Силовая электроника. 2007. № 2.
8. www.italstructures.com
9. www.nppik.ru
10. www.ir.com
11. www.st.com
12. www.fairchild.com
13. www.nsc.com или www.national.com
14. Операционные усилители: справочник. М.: Патриот. 1996.
15. www.linear.com
16. www.ti.com
17. Интегральные микросхемы: микросхемы для импульсных источников питания и их применение. М.: ДОДЭКА. 1997.
18. www.diotec.com