

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 $U_{в}$ — 10(15) кВ-1,5 МВ, ток нагрузки $I_{н}$ — 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

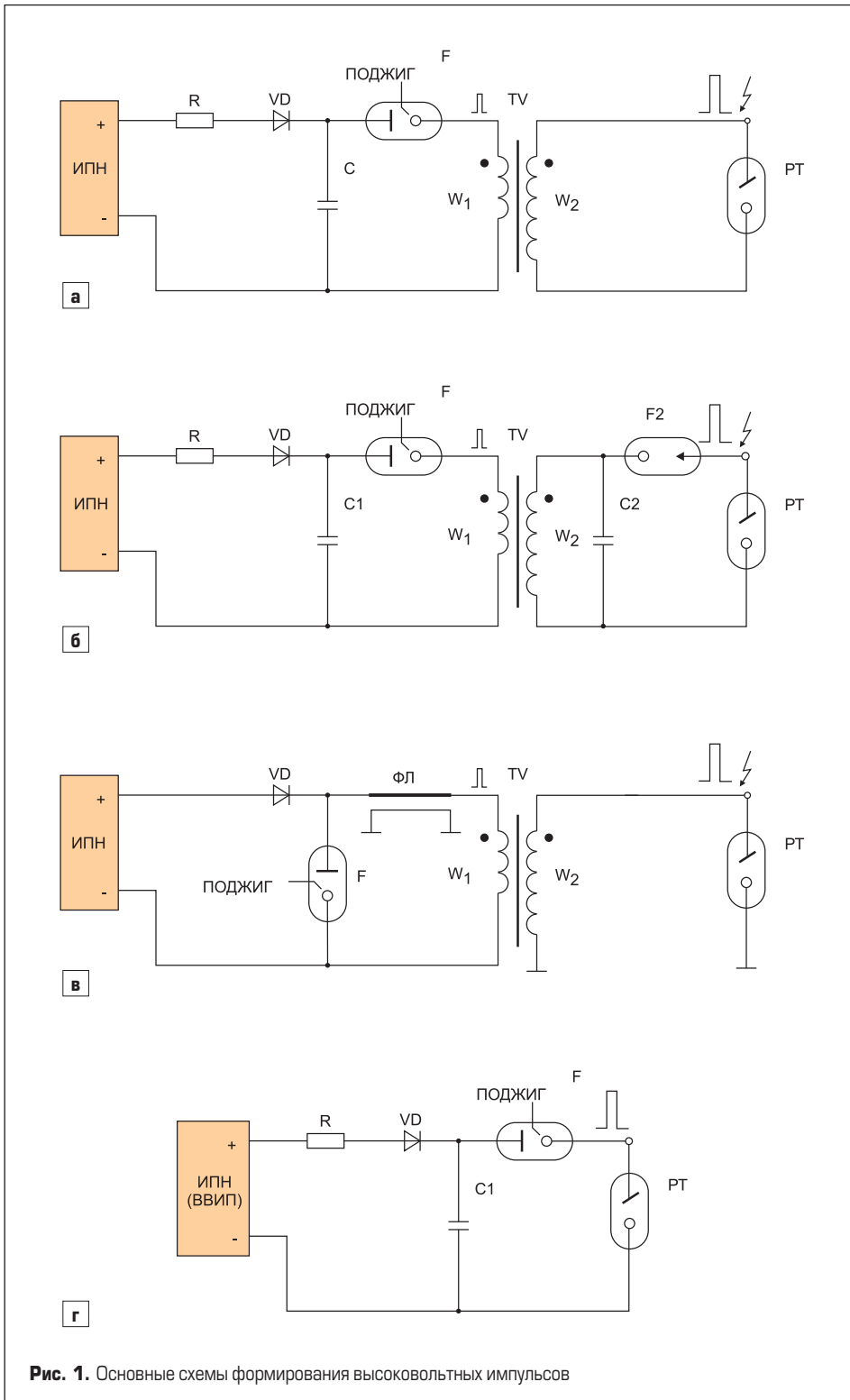


Рис. 1. Основные схемы формирования высоковольтных импульсов

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 накаливаемыми. 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 накаливаемым 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 — ТГИ1-5к/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 конце-

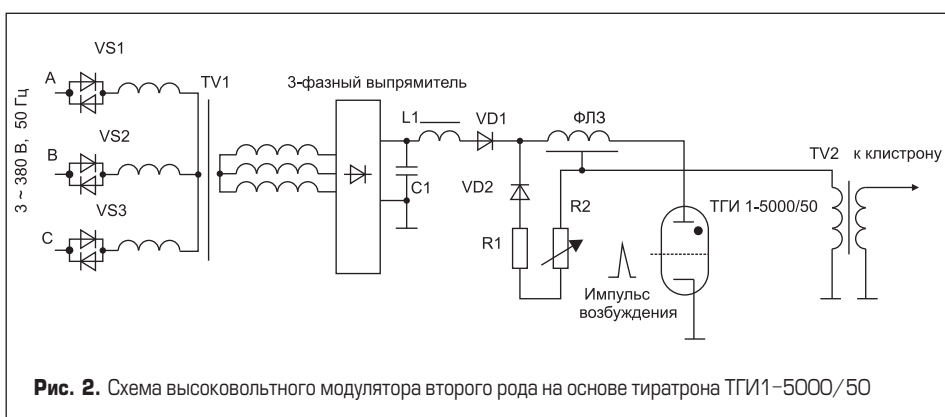


Рис. 2. Схема высоковольтного модулятора второго рода на основе тиратрона ТГИ1-5000/50

ном счете, осуществляется за счет изменения величины тока накала РТ. В качестве источника питания силовой цепи САТ был выбран имевшийся 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 оптодистрибутора 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-

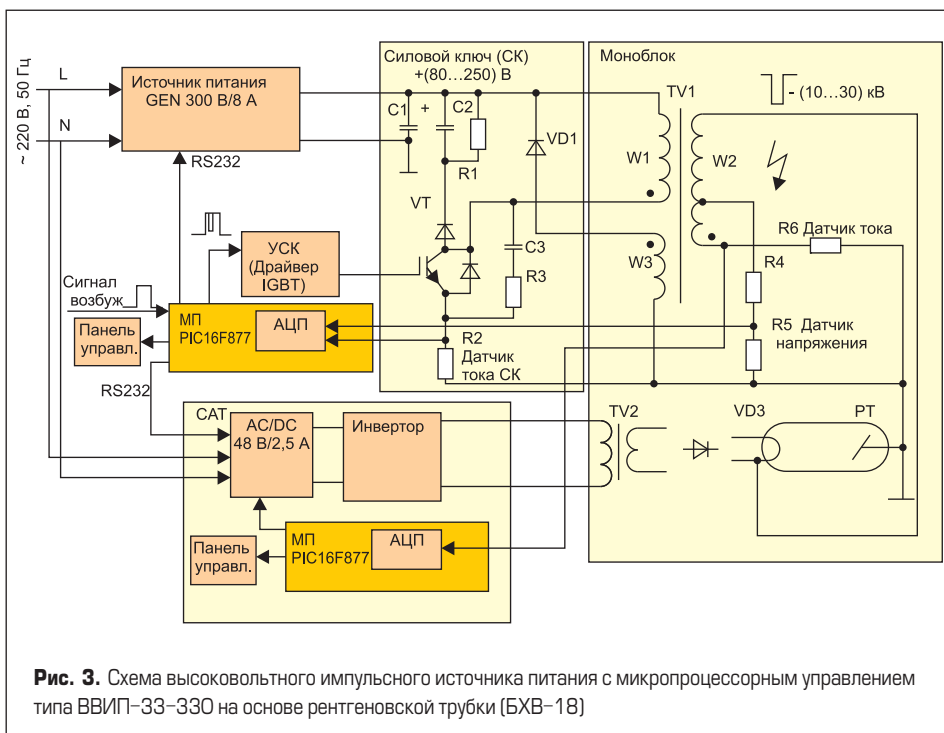


Рис. 3. Схема высоковольтного импульсного источника питания с микропроцессорным управлением типа ВВИП-33-330 на основе рентгеновской трубки (БХВ-18)

полнена секционированной. В целом конструктивно высоковольтная часть ВВИП РТ выполняется в виде моноблока, состоящего из маслонеполненного 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.

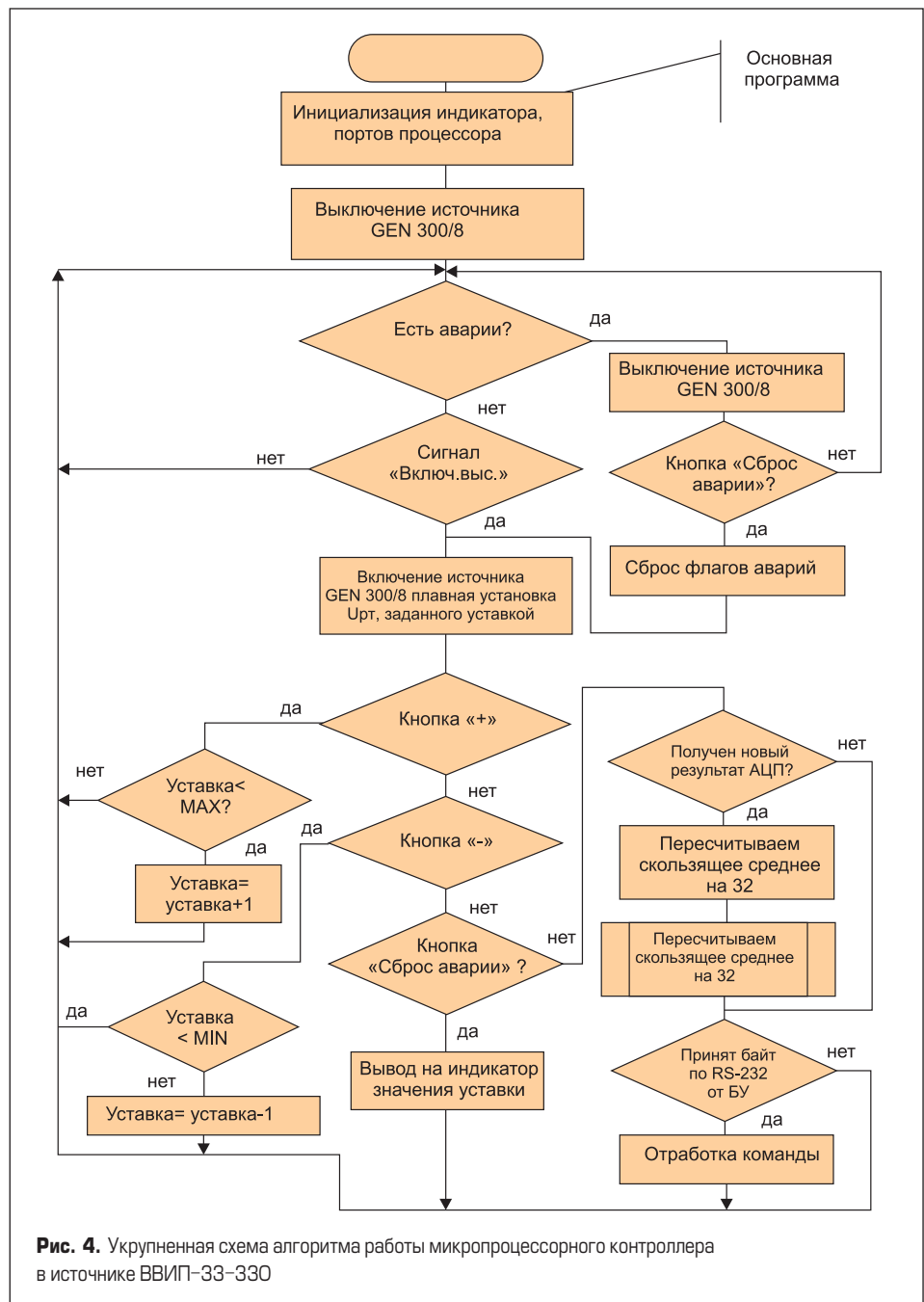


Рис. 4. Укрупненная схема алгоритма работы микропроцессорного контроллера в источнике ВВИП-33-330

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 (GEN300/8) 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;
 - СС — авария СК;
 - СА — 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