

Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора

(часть 1)

Евгений Владимиров, Владимир Ланцов,
Ольга Лебедева (Санкт-Петербург)

В статье дан обзор высоковольтных импульсных модуляторов для питания СВЧ-приборов (клистронов, магнетронов) и рентгеновских трубок. Наибольшее внимание уделено высоковольтным модуляторам, которые чаще называются импульсными высоковольтными источниками питания (ВИП). Рентгеновская трубка, как специфический тип нагрузки, определяет существенные особенности построения и работы таких устройств. В публикации приведены схемы ВИП для питания рентгеновских трубок, в том числе с микропроцессорным управлением, отмечены особенности функционирования ВИП, его устройств и компонентов, описан алгоритм управления.

Высоковольтные импульсные модуляторы большой мощности

Для питания мощных СВЧ-приборов (магнетронов и клистронов) широко используются импульсные модуляторы. Основная особенность известных схем модуляторов – применение вторичных источников электропитания с напряжением, равным амплитуде выходного импульса, т.е. высоковольтных источников питания.

В [1] описан модулятор мощного клистрона 5045 с ключевым элементом – тиратроном ТГИ1-5000/50. Источник имеет следующие параметры:

Выходное импульсное напряжение ...23 кВ
Ток в импульсе, при длительности импульса 100...120 мкс6 кА;
Средняя мощностьоколо 10 кВт.

Схема модулятора [1] приведена в упрощённом виде на рис. 1. Она основана на принципе частичного разряда накопительного конденсатора (формирующей линии), подзаряжаемого в промежутках между импульсами от источника питания с тиристорным регулятором VD1 – VD3 на входе. Недостатки таких модуляторов для промышленных установок очевидны: громоздкий высоковольтный трансформатор TV1 (трёхфазный, низкой частоты

50/60 Гц), высоковольтный накопительный конденсатор, недолговечный ключевой прибор – тиратрон, потери энергии на нагрев зарядного резистора.

Появившиеся в последнее время публикации [2] описывают модуляторы, где вместо газоразрядных приборов применены полупроводниковые ключевые элементы. Такое решение позволяет повысить долговечность модулятора и перейти к современной промышленной реализации.

Рентгеновская трубка (РТ) как специфический тип нагрузки определяет существенные особенности построения и работы устройств. В 1990 г. специалистами НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург) при проектировании ВИП для питания РТ (ВИП РТ) была сделана попытка упростить схему высоковольтного модулятора. При этом необходимо было сделать её более надёжной, совместив ключевой элемент с нагрузкой. Этот приём привел к созданию трёхэлектродной РТ типа БХВ-18 [3] и на её основе ВИП РТ с сеточной модуляцией. Технические характеристики мощных рентгеновских трубок приведены в таблице 1.

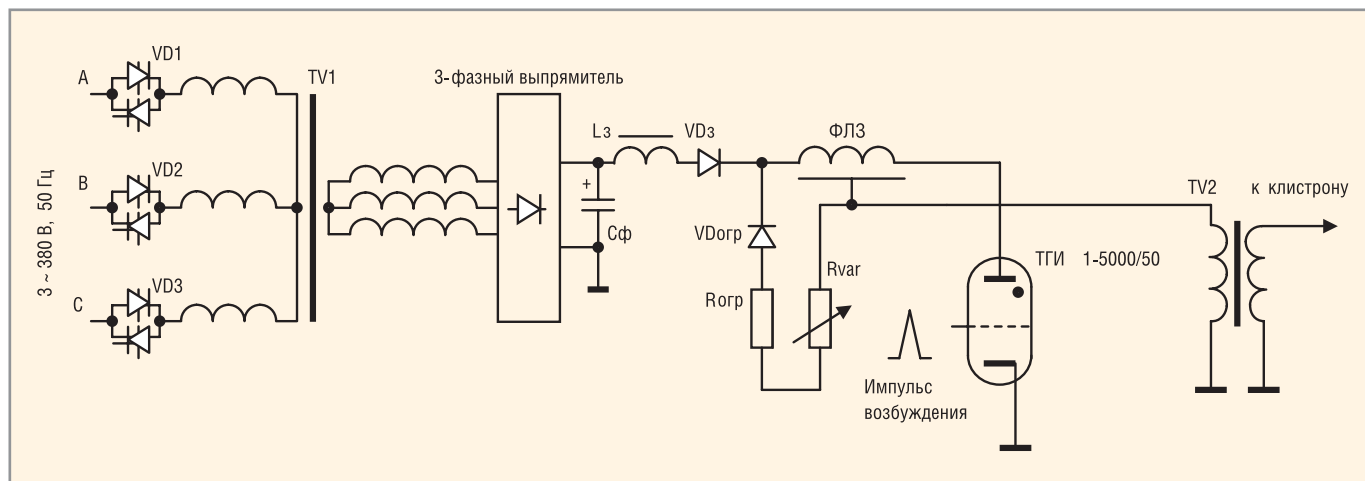


Рис. 1. Схема модулятора с тиратроном ТГИ1-5000/50 в качестве ключевого элемента

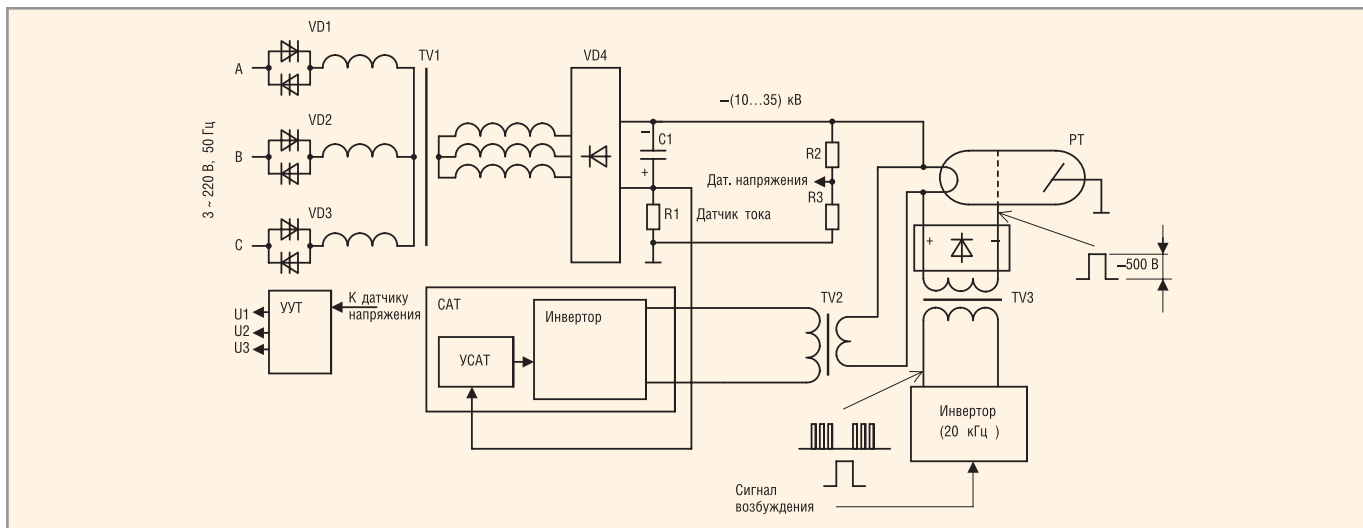


Рис. 2. Структурная схема ВИП РТ с сеточной модуляцией

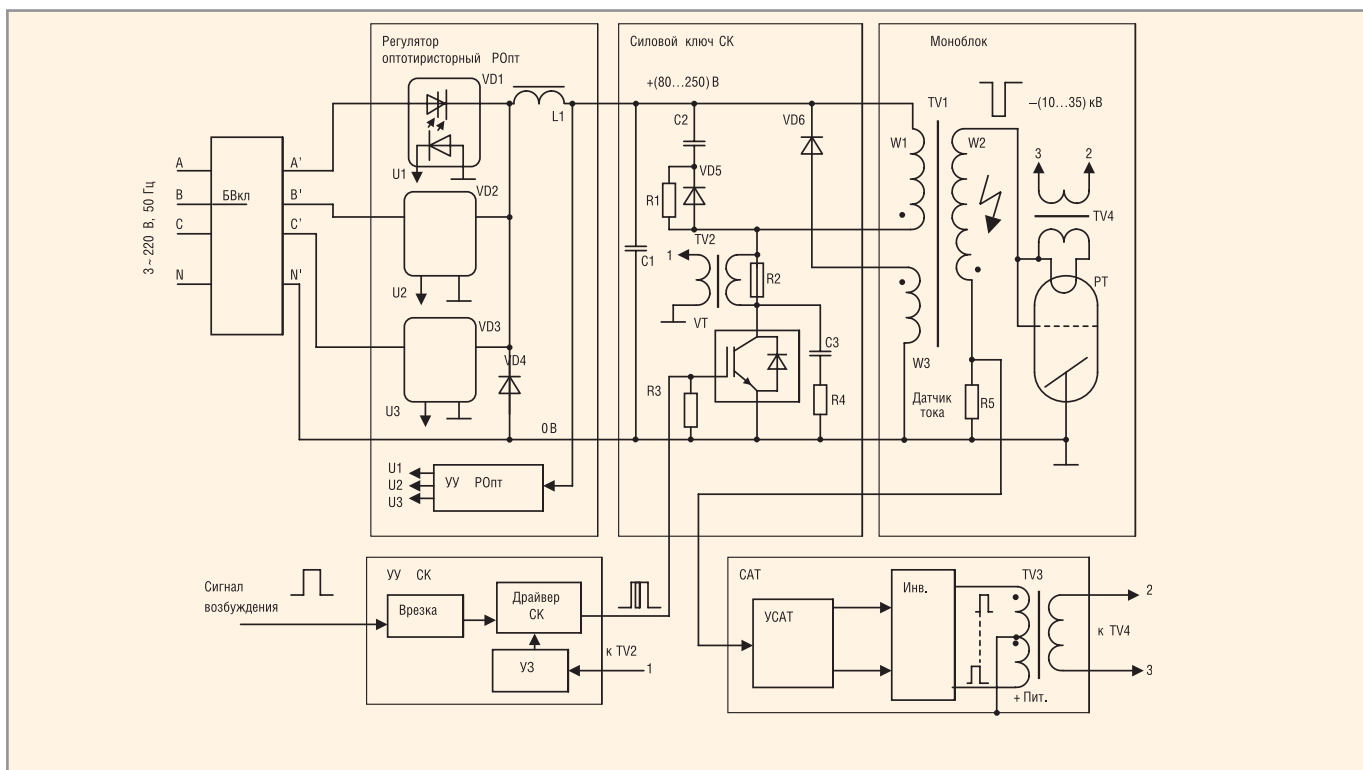


Рис. 3. Схема ВИП РТ типа ВИП-35-350 с катодной модуляцией

Структурная схема такого ВИП, некоторое время выпускавшегося в составе серийных сепараторов алмазов, приведена на рис. 2. ВИП содержит управляемый высоковольтный источник питания постоянного тока с тиристорным регулятором VD1 – VD3 и высоковольтным трансформатором TV1, аналогичным упомянутому [1]. Отрицательный высоковольтный вывод источника подсоединён к катоду рентгеновской трубки, а положительный – к заземлённому аноду. Между катодом и сеткой трубки включены источник смещения и трансформатор TV3 для подачи управляющих импульсов, причём эти элементы нахо-

дятся под высоким потенциалом катода. Оба описанных решения – применение полупроводниковых вентилялей и использование вентильных

свойств нагрузки – не устраняют недостатков известных модуляторов. Главный из недостатков – необходимость использования мощного ис-

Таблица 1. Технические характеристики мощных рентгеновских трубок

Характеристика	БХВ-6	БХВ-18
Максимальное напряжение анод – катод, кВ	50	35
Максимальный ток анода, мА: - длительный номинальный режим - в импульсе	100	100 350
Максимальная мощность, кВт: - в длительном режиме - в импульсе	5 -	3,5 12,3
Максимальный ток накала, А	5,0	3,4
Максимальное напряжение накала, В	15	23
Напряжение запираения сетка катод (отрицательное), В	Сетки нет	500

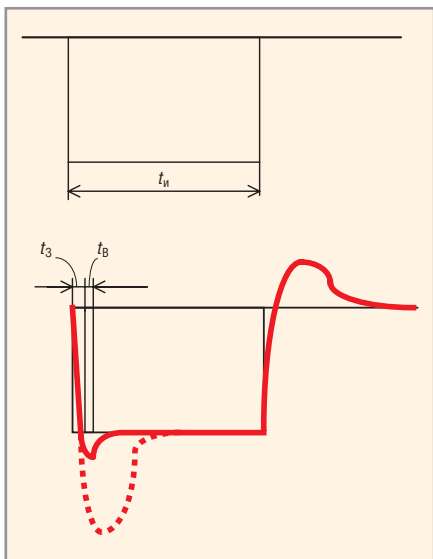


Рис. 4. Формирование «врезки»

точника высокого напряжения постоянного тока.

Высоковольтный импульсный источник питания рентгеновской трубки с анодной модуляцией

Для улучшения массогабаритных показателей ВИП была применена анодная модуляция РТ через мощный импульсный трансформатор. Правильнее назвать её катодной модуляцией, поскольку анод в отечественных РТ обычно заземляется. Схема ВИП РТ типа ВИП-35-350 с катодной модуляцией показана на рис. 3. ВИП РТ типа ВИП-35-350 включает в себя:

- блок включения БВкл, работающий от трёхфазной сети;
- трёхфазный оптотиристорный регулятор (РОпТ) с выпрямителем переменного тока 3 × 220 В, 50 Гц;
- силовой ключ (СК) на IGBT-модуле (VT);
- высоковольтный импульсный трансформатор (ТВ1);
- устройство управления силовым ключом (УУСК);
- стабилизатор анодного тока (САТ);
- цепи обратной связи и контроля высокого (анодного) напряжения U_a и анодного тока I_a .

Для обеспечения электробезопасности и надёжности в реальных условиях эксплуатации высоковольтный трансформатор ТВ1, накальный трансформатор ТВ4, цепи обратной связи (контроля) и рентгеновская трубка (БХВ-18) конструктивно размещены в так называемом моноблоке. Моноблок, наполненный трансформаторным маслом, обеспечивает высокую степень электроизоляции и эффективный отвод тепла. Подробнее конструкция моноблока будет описана ниже.

Напряжение трёхфазной сети переменного тока 3 × 220 В, 50 Гц поступает в схему через БВкл, содержащий устройства контроля напряжения сети, коммутации сети и фильтрации сетевых электромагнитных помех. В схеме ВИП-35-350 (см. рис. 3) имеются два отдельных контура регулирования: по выходному (анодному) току – САТ и выходному высокому анодному напряжению U_a – СВН. Регулирование и стабилизация U_a осуществляется оптотиристорным регулятором-выпрямителем (РОпТ). В РОпТ силовые оптотиристоры VD1 – VD3 через фильтр L1C1 работают на нагрузку, в качестве которой выступает высоковольтный инвертор, состоящий из силового ключа (СК) и высоковольтного трансформатора (ТВ1).

Фазовая отсечка VD1 – VD3 создаётся устройством управления (стабилизации) УУРОпТ. Регулятор-выпрямитель РОпТ выдаёт на выходе стабильное напряжение постоянного тока, регулируемое в пределах 80...250 В. Силовой импульсный трансформатор ТВ1, размещённый в моноблоке, служит нагрузкой СК. В качестве СК первоначально использовался IGBT-модуль BSM300GA120DN2 (1200 В, 300А, 2500 Вт) фирмы Infineon [4], а затем его полный отечественный аналог МТКИ2-12-300 [5]. Подробные характеристики IGBT-модулей BSM300GA120DN2 и МТКИ2-12-300 приведены в таблице 2. Обмотки ТВ1: W1 – первичная, W2 – высоко-

вольтная, W3 –размагничивающая. Первичная обмотка W1 трансформатора включена в коллекторную цепь СК, в котором использован IGBT-модуль. В СК предусмотрена «обвязка» IGBT, предназначенная для защиты от пиковых высокочастотных выбросов напряжения на коллекторе. Она состоит из демпфера R4, C3, включенного между коллектором СК и нулевым проводом, и снаббера C2, R1, VD5, включенного параллельно первичной обмотке W1. Трансформатор тока TV2, шунтированный резистором R2, выполняет функцию формирования сигнала перегрузки СК по току, который подаётся в устройство защиты УЗ в УУСК. Драйвер собственной разработки СК в УУСК подаёт на затвор IGBT управляющие импульсы амплитудой 14 В и частотой 250 Гц. Длительность импульса составляет 500 мкс, скважность – 8.

Передача импульсов через силовой трансформатор ведёт к существенным искажениям их формы. Причина искажений – паразитные свойства трансформатора. Эквивалентная схема импульсного трансформатора достаточно подробно описана [6]. Поэтому затронем только наиболее «неприятные» искажения формы импульса напряжения на вторичной высоковольтной обмотке трансформатора. Прежде всего, это выброс напряжения на вершине импульса и обратный выброс напряжения на заднем фронте, т.е. при закрывании (выключении) СК. Последний выброс связан с передачей в нагрузку энергии, определяемой как индуктивности рассеяния трансформатора. Для уменьшения амплитуды выброса применён стандартный приём: в трансформатор введена дополнительная размагничивающая (рекуперативная) обмотка W3. Число витков этой обмотки значительно больше числа витков первичной обмотки ($W3 > W1$). Через W3 энергия «сбрасывается» в источ-

Таблица 2. Характеристики IGBT-модулей BSM300GA120DN2 и МТКИ2-12-3

Наименование (фирма)	U_{CES} , В	$I_C (I_C^*)$, А	$P_D (P_{CEmax})$, Вт	$U_{CE(sat)}$, В	$t_{don}/t_r/t_{doff}$, мкс /IGBT	Диоды	$E_{tot} E_{off}$, мДж	Корпус (тип, размеры, мм)
BSM300GA120DN2 (Infineon/Siemens)	1200	400 (800*)	2500	3,3	0,27/0,85	Обратный		M11
МТКИ2-300-12 (ОАО «Электровыпрямитель»)	1200	300 (600*)	2500	3,5	0,27/0,85	То же		M11
SKM300GAL128D (Semikron)	1200	370 (740)	2500	2,35	0,22/0,72	Обратный; свободный	22 (22)	94,5 × 34,5 × 29,5

Таблица 3. Типичные значения длительности задержки и ширины врезки

Параметр	Длительность импульса возбуждения $t_{и}$, мкс	
	500 (при частоте 250 Гц)	100 (при частоте 2 кГц)
Задержка относительно переднего фронта t_3 , мкс	27	8...10
Длительность $t_в$, мкс	9...10	3...3.5

ник питания СК с помощью высоковольтного быстродействующего диода VD6.

Для подавления выброса на переднем фронте, который может приводить к пробоем нагрузки (РТ), применен оригинальный приём [7]. Он заключается в придании специфической формы импульсу управления СК. С некоторой задержкой относительно начала импульса управления СК производится кратковременное выключение СК, которое условно назовём «врезкой». Формирование «врезки» пояснено на рис. 4. Сигнал возбуждения в виде импульса длительностью $t_{и}$ поступает на УУСК, в котором формируется интервал задержки t_3 и интервал собственно «врезки» $t_в$. Выброс на вершине импульса на высоковольтной обмотке трансформатора TV1, определяемый индуктивностью рассеяния для случая отсутствия «врезки», показан пунктирной линией, а при наличии «врезки» – сплошной. Длительность «врезки» и её задержка относительно начала управляющего импульса настраиваются по минимуму выброса в устройстве управления СК, исходя из параметров импульсного трансформатора. При правильной настройке такой приём существенно снижает амплитуду выброса. Типичные значения длительности задержки и ширины врезки приведены в таблице 3.

Необходимо остановиться ещё на одной проблеме ВИП с катодной модуляцией через импульсный трансформатор. Эта проблема – измерение амплитуды импульсов напряжения и тока нагрузки. Типичным решением здесь является интегрирование импульсного сигнала от датчика тока R5 или делителя высокого напряжения и затем измерение средних значений прибором постоянного тока. Недостаток такого решения – зависимость результата от частоты следования и длительности импульсов.

Контур управления и стабилизации тока I_a выполнен в отдельном

модуле – САТ на основе двухтактного инвертора (Инв). Инвертор управляется противофазными импульсами одинаковой длительности с постоянной частотой 10 кГц. Импульсы следуют с небольшой паузой (квазимерандр). Изменение выходного напряжения инвертора производится изменением напряжения питания Инв при действии обратной связи по току I_a (амплитудная модуляция). Стабилизация I_a осуществляется за счёт изменения величины тока накала РТ. В качестве источника питания силовой цепи САТ для ускорения проектирования был выбран имевшийся в распоряжении низкочастотный ИВЭ с выходной мощностью до 120 Вт и возможностью регулирования его напряжения внешним сигналом в пределах 20...80 В.

Для непосредственного питания цепи накала РТ служит высокопотенциальный накальный трансформатор TV2, размещённый в высоковольтной части ВИП – моноблоке.

ВИП-35-350 для питания рентгеновской трубки БХВ-18 или трубки 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 импульсная мощность 12 кВт
 Максимальная выходная средняя мощность 1,5 кВт
 Частота следования импульсов 250 Гц
 Сквозность 8
 Управление ... ручная установка выходных значений высокого (анодного) напряжения и тока
 Импульсное возбуждение внешнее
 Габариты моноблока с установленной РТ, мм ... 460 × 215 × 300
 Габариты блока управления, мм ... 480 × 460 × 270

Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов А.В. и др. Вопросы атомной науки и техники. 2001. № 3. Сер.: Ядерно-физические исследования (38). С. 93–94.
2. Полищук А.Г. Вопросы разработки твердотельных импульсных модуляторов для электровакуумных приборов СВЧ. Современная электроника. 2005. № 3.
3. Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. Ленинград: Энергоатомиздат. 1989.
4. <http://www.infineon.com>.
5. Каталог изделий ЗАО «Электровыпрямитель», 2006.
6. Ланцов В.В., Эраносян С.А. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть 3. Силовая электроника. 2007. № 2.
7. Генератор импульсов высокого напряжения. Свидетельство РФ № 8547. В.М. Потапов, Л.И. Богашев, М.В. Бабенков. 1998.
8. Блоки питания GENESYS/GEN300-5. <http://www.lambda-emi.com>.
9. Информационный диск фирмы Semikron «Каталог продукции 2006–2007». ©



Дисплеи фирмы KENT DISPLAYS позволяют сократить энергопотребление устройств более чем на 50 %, за счет уникальной технологии. Потребление энергии сокращается за счет "запоминания" картинки на дисплее самим ЖК материалом, в результате энергия затрачивается только на регенерацию изображения.



Стандартные модули имеют следующие параметры:

- ~ размер активной площади по диагонали от 2,28 до 18,1 дюйма;
- ~ разрешение от 128 x 32 до 800 x 600 пикселей (20...127 dpi);
- ~ диапазон рабочих температур 0...70°C;
- ~ диапазон температуры хранения от – 50...105°C;
- ~ при смене изображения расходуется энергия не более 190 мкДж;

Компания "АТОС" поставляет также продукцию *Tyco Electronics, Dallas/Maxim, Samtec, Yamaichi, Power Integrations, Supertex, Cyan, Luminary Micro, AMT* и др.



г. Москва, Ул. Усиевича 24/2, Тел./ Факс: (495) 787-4805, (495) 601-2035, 601-2114 www.atos.ru sales@atos.ru