

## ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ МАГНЕТРОНОВ Х И $K_u$ ДИАПАЗОНОВ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Г.И. ЧУРЮМОВ, В.П. ИВАНЦОВ

Рассматриваются вопросы проектирования источников вторичного электропитания низковольтных магнетронов с использованием современной твердотельной элементной базы. Предлагаются схемотехнические решения для построения вторичного источника электропитания постоянного напряжения до 650 В и анодным током до 0.5 ампера, а также импульсного модулятора для формирования импульсов анодного напряжения длительностью от сотен наносекунд до десятков микросекунд. Приведены примеры применения данного источника питания для работы с низковольтными двух- и трехсантиметровыми магнетронами в непрерывном и импульсном режимах работы.

*Ключевые слова:* источник вторичного электропитания, импульсный модулятор, низковольтный магнетрон, импульс анодного напряжения, длительность импульса, скважность.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [см., напр., 1], что качество генерируемых и/или усиливаемых СВЧ сигналов, а также эффективность работы СВЧ ламп (генераторов и усилителей) в целом, в значительной степени, зависит от характеристик источника вторичного электропитания (ИВЭП). Так, например, в работе [2] показана связь между состоянием выходного спектра СВЧ лампы (спектральными характеристиками) и широкополосными пульсациями питающих напряжений, характерных для ИВЭП с транзисторными преобразователями. Для улучшения качества выходного сигнала необходимо повышать требования к ИВЭП, которые различны для каждого конкретного типа ламп (например, для магнетрона, клистрона, ЛБВО, ЛОВО и т.п.) и определяются условиями их применения в различной наземной и бортовой радиопередающей и радиолокационной аппаратуре, а также при решении разнообразных научно-исследовательских (проведение физического эксперимента), медицинских и промышленных задач [3–5].

Среди широкого класса ВИЭП особый интерес вызывают мощные высоковольтные источники питания с импульсной формой выходного напряжения (или так называемые импульсные модуляторы). При создании подобных ВИЭП применяются традиционные и хорошо апробированные схемотехнические решения, например, схема с частичным разрядом накопительной емкости, построенные на основе вакуумных приборов (диодов и триодов) [6]. В то же время внедрение твердотельной элементной базы (ТЭБ), в частности, высоковольтной ее составляющей (полупроводниковых диодов и транзисторов), дает основание отказаться от применения ЭВП и перейти к широкому внедрению ТЭБ в практику проектирования высоковольтных ВИЭП различного типа и назначения.

В данной статье рассматриваются различные вопросы проектирования классического ВИЭП с цифровым (микропроцессорным) управлением для низковольтных импульсных и непрерывных

магнетронов Х и  $K_u$  диапазонов с напряжением питания не более 1000 В. С этой целью предлагается использовать хорошо себя зарекомендовавшие схемотехнические решения путем объединения их по схеме последовательного включения с учетом минимизации потерь и увеличения надежности. Применение микропроцессорного управления позволяет оптимизировать работу источника питания включая и его защиту от различных перегрузок [7].

Существующая практика проектирования ВИЭП базируется на двух традиционных их типах: классические линейные (или трансформаторные) и импульсные источники питания. Выбор конкретного типа ВИЭП зависит от перечня решаемых задач, которые включают в себя требования к эффективности преобразования энергии первичного источника (например, преобразование переменного напряжения промышленной частоты в постоянное или постоянного напряжения (например, от солнечных батарей в случае бортового варианта реализации источника питания) в постоянные напряжения, которые подаются на электроды лампы), компактности конструкции, ее размеров и веса при одинаковой эффективности и т.п.

Особенностью ИВЭП для магнетронных передатчиков, используемых в различных радиотехнических системах, является их индивидуальность, т.е. ИВЭП разрабатывается для конкретного магнетрона с заданными электрическими параметрами. Применение универсальных блоков питания в этом случае вызывает затруднения в силу значительно расширенных их возможностей и, в силу этого, слишком высокой стоимости.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве низковольтных магнетронов используются пакетированные конструкции двух- и трехсантиметровых магнетронов, основные электрические и эксплуатационные параметры которых приведены в таблице.

Предполагается, что ИВЭП для низковольтных магнетронов позволяет обеспечить их работу

Параметры низковольтных магнетронов

№ п/п	Параметры	двухсантиметровый магнетрон	трехсантиметровый магнетрон
1	Анодное напряжение $U_a$ , В	505 ... 545	575 ... 630
2	Анодный ток $I_a$ , мА	65,0 ... 75,0	75,0 ... 95,0
3	Магнитное поле $B_0$ , Тл	0,2	0,2
4	Напряжение накала $U_n$ , В	5,7 ... 6,9	5,7 ... 6,9
5	Ток накала при $U_n = 6,3$ В	0,51 ... 0,57	0,51 ... 0,57
6	Тип катода	оксидный	оксидный
7	Температура анодного блока, °С	не более 80,0	не более 80,0
8	Режим охлаждения	воздушное	воздушное

как в непрерывном, так и в импульсном режимах, формируя стабилизированное анодное напряжение от 300 до 600 В с шагом перестройки не менее 1 В при максимальном анодном токе не более 0.5 А. Длительность импульсов анодного напряжения может регулироваться программно или изменяться в ручном режиме в диапазоне от 5.0 до 50.0 мкс с шагом 1.0 мкс<sup>1</sup>. При этом скважность принимает значения 80, 160, 320 и 640.

В качестве катодов в данных магнетронах используются оксидные катоды с напряжением накала до 7 В и током в цепи накала катода до 1,0 А.

Для удобства эксплуатации ИВЭП при проведении экспериментальных исследований, повышения эффективности и точности управления режимами работы магнетронов, а также расширения функциональности источника питания предполагается его использование в автоматизированном режиме. Это предполагает согласование ИВЭП с компьютером, а также разработку необходимого программного обеспечения [7].

## 2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

На рис. 1 представлена структурная схема ИВЭП. При реализации данной схемы использу-

<sup>1</sup> Необходимо отметить, что выбор параметров импульса анодного напряжения (длительности импульса, его переднего и заднего фронтов, «полочки») и определение схемотехнического решения зависят в первую очередь от типа катода и его эмиссионных характеристик, а также от элементной базы, которая выбирается для практической реализации.

ется набор стандартных схемных решений, проверенных на практике [8].

Это позволяет свести к минимуму затраты времени и средств на дополнительное их проектирование, отладку и настройку.

На представленной структурной схеме ИВЭП основными элементами являются устройство управления, стабилизатор анодного напряжения, стабилизатор тока накала и модулятор. Для индикации текущих параметров устройства предусмотрены цифровые вольтметры и амперметры, построенные на стандартных АЦП (например, микросхемах ICL7135, ICL7107 и АТmegaS).

Устройство сопряжения с компьютером обеспечивает обмен данными через LPT порт. Для защиты компьютера от высокого напряжения используется оптоэлектронная развязка (оптрон 4N32). Использование параллельного порта позволяет значительно упростить аппаратную часть устройства сопряжения, поскольку в данном случае можно обойтись без контроллера последовательного порта.

Устройство управления обеспечивает универсальность блока питания. Оно позволяет коммутировать режимы управления параметрами выходного напряжения и тока. Возможна реализация ручного режима управления и режима управления через компьютер с помощью устройства сопряжения. Осуществляется полностью



Рис. 1. Структурная схема ИВЭП

цифровой способ управления, поэтому в ручном режиме фактически происходит эмуляция управляющего кода. Основу схемы составляют микросхемы TTL логики и микроконтроллер АТМega 8. Он запрограммирован на использование встроенного тактового генератора с частотой 8 МГц, что позволяет обойтись без внешнего кварцевого резонатора.

На рис. 2 представлена электрическая схема стабилизатора анодного напряжения. Как видно, схема стабилизатора анодного напряжения построена на основе высоковольтных регулируемых стабилизаторов TL783. Эти микросхемы имеют встроенную защиту от короткого замыкания и перегрева. Один такой стабилизатор позволяет получить напряжение от 1.25 до 115 В. Подключая необходимое количество стабилизаторов, можно получить любое напряжение в заданном диапазоне.

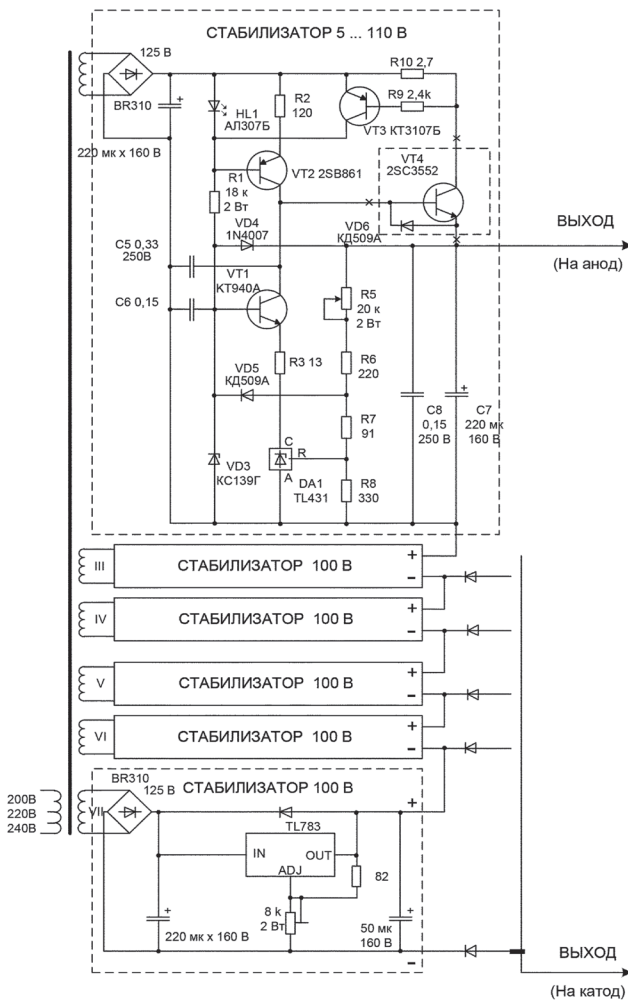


Рис. 2. Схема стабилизатора анодного напряжения

На выходе стабилизатора анодного напряжения формируется стационарное напряжение отрицательной полярности, которое подается на катоды магнетронов, реализуя непрерывный режим их работы. Для запуска магнетронов в импульсном режиме необходимо дополнить схему ИВЭП импульсным модулятором, в котором выходное напряжение представляет собой последовательность высоковольтных импульсов раз-

личной длительности и скважности (или частоты следования).

Традиционная схема импульсного модулятора на основе вакуумной лампы  $V1$  с частичным разрядом накопительной ёмкости  $C$  приведена на рис. 3. На данном рисунке магнетрон обозначен как  $V2$ , а модуляторная лампа –  $V1$ .

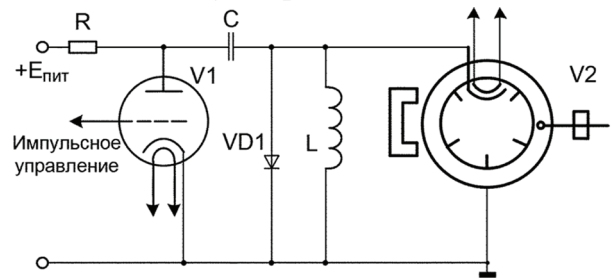


Рис. 3. Традиционная схема импульсного модулятора

Недостатками этой схемы являются:

- большие потери на зарядном резисторе  $R$  и, как следствие, снижение КПД модулятора в целом;
- отсутствие возможности использовать полупроводниковые кремниевые диоды в цепи формирования спада импульса из-за наличия чрезвычайно больших потерь, связанных с процессом обратного восстановления. Применение же вакуумных диодов резко снижает ресурс работы модулятора, увеличивает массу и габариты;
- наличие индуктивности  $L$  приводит к возникновению резонансных выбросов на вершине импульса, неблагоприятно влияющих на работу генераторного прибора.
- практическое отсутствие малогабаритных высоковольтных вакуумных приборов, обеспечивающих высокую надёжность и наработку на отказ.

Указанные недостатки можно избежать, воспользовавшись двухтактной схемой, реализованной на ТЭБ. Эквивалентная схема такого модулятора приведена на рис. 4.

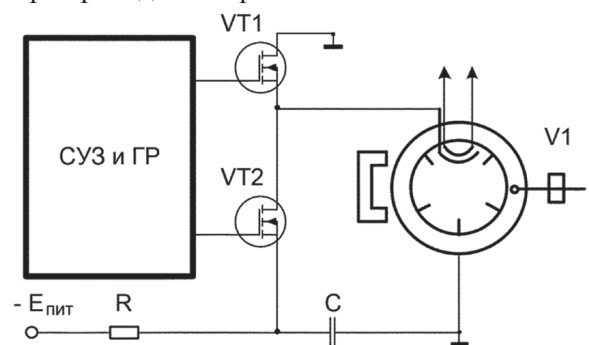


Рис. 4. Схема твердотельного двухтактного импульсного модулятора с частичным разрядом накопительной ёмкости

Схема управления затворами (СУЗ) и гальваническая развязка (ГР) вырабатывают импульсы различной полярности, которые через временной интервал, равный для длительности высоковольтного импульса напряжения, приложенного к магнетрону  $V1$ , меняются на противоположные

и, таким образом, закрывают и открывают попеременно ключи *VT1* и *VT2*.

Для формирования последовательности задающих импульсов, управляющих работой модулятора, используется устройство, принципиальная схема которого представлена на рис. 5. В результате на модулятор подается последовательность прямоугольных импульсов, а на его выходе образуются импульсы анодного напряжения отрицательной полярности, которые подаются на катод магнетрона.

Для формирования последовательности тактовых импульсов используется задающий генератор *DD1* с кварцевой стабилизацией частоты (резонатор *ZQ1*). Генерируемые импульсы поступают на счетчик *DD2* (используется импульсный тактовый вход на уменьшение). В схеме применяется четырехразрядный реверсивный двоичный счетчик на микросхеме *K555IE7* (или

ее аналогах). На входы параллельной загрузки *D0-D3* из устройства управления подается код, который задает длительность импульсов. На выходе счетчика формируются импульсы, которые после подачи на триггер *DD3* позволяют получить на его выходе меандр с длительностью импульса, соответствующей заданной длительности импульсов напряжения питания магнетрона. Счетчики *DD4* и *DD5* осуществляют управляемую извне регулировку скважности импульсов. Управляющий сигнал подается из устройства управления на входы *E2, E3* и *E4* поразрядного разрешения счетчика *DD5*.

В магнетронах данной конструкции используются оксидные катоды с косвенным накалом. Для запуска термоэлектронной эмиссии на подогреватель катода с ИВЭП подается напряжение накала с током до 1 А, которое формируется схемой стабилизатора тока катода (рис. 6). Для ре-

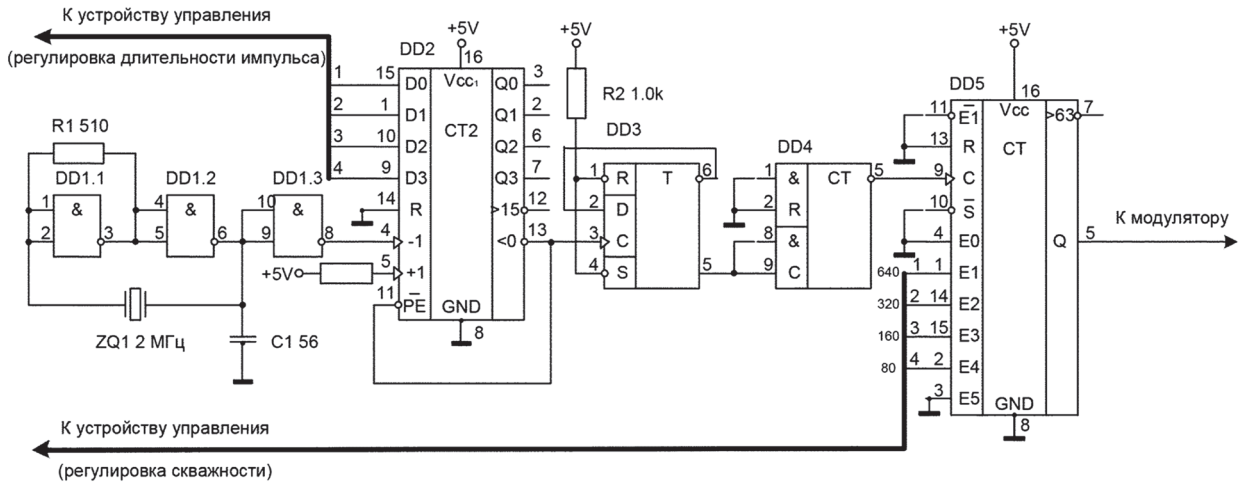


Рис. 5. Электрическая схема устройства формирования импульсов

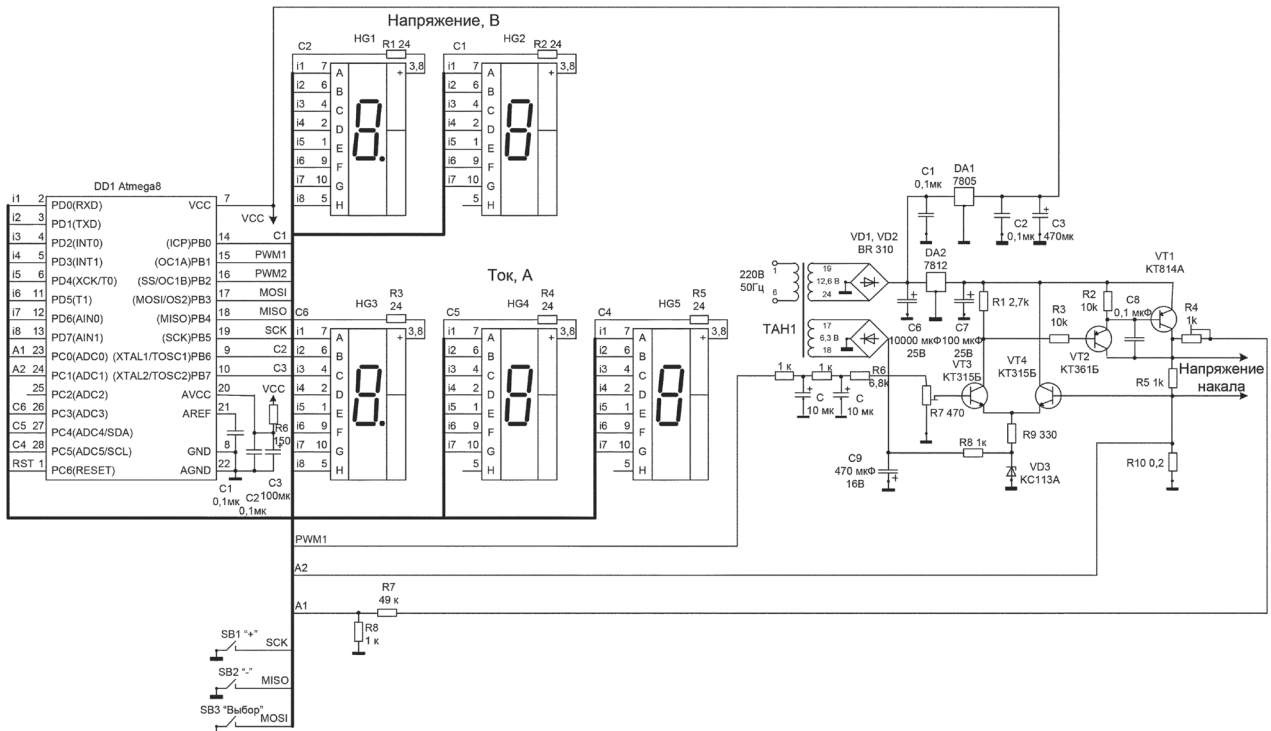


Рис. 6. Схема цепи накала катода магнетрона

лизации данной схемы питания был использован опыт авторов работы [9]. Особенностью разработанной схемы является возможность управления временем установления напряжения накала, т.е. временем разогрева катода. Эту функцию обеспечивает устройство управления, регулируя этот параметр как вручную, так и программно с помощью компьютера в зависимости от характеристик используемого катода. Такая возможность конструкции ИВЭП значительно повышает функциональность устройства и позволяет использовать его для исследования и измерения различных характеристик катодов и приборов в целом.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Тестирование ИВЭП проводилось с использованием двух- и трехсантиметровых низковольтных магнетронов. Основные результаты испытаний импульсного режима работы магнетронов приведены на рис. 7 и 8.

Испытания источника питания в импульсном режиме показали, что амплитуда пульсаций напряжения питания не превышает (0,2–0,3) % от номинального значения напряжения питания.

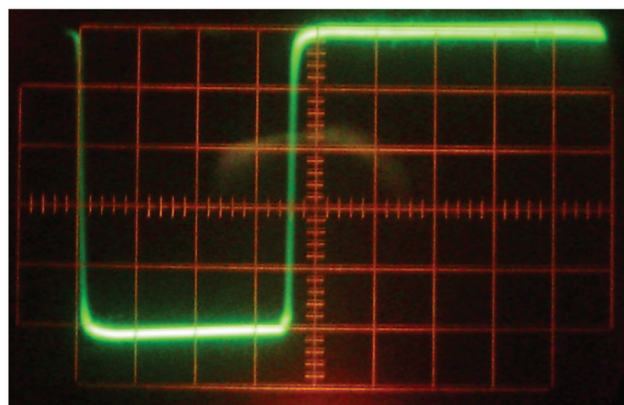
Для улучшения характеристик ИВЭП и расширения его функциональных возможностей

была использована дополнительная стабилизация напряжения и тока на выходе с учетом действия различных дестабилизирующих факторов (например, изменение (пульсаций) напряжения на входе, тока нагрузки, разнообразных помех и т.п.), наличие защиты источника питания и обслуживающего персонала от возможных неисправностей (например, короткого замыкания), реализация цифрового управления и контролем работой источника питания и т.д.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан простой по конструкции и относительно недорогой стационарный ИВЭП (модулятор) для применения в схемах питания низковольтных магнетронов с анодным напряжением до 1000 В и анодным током до 0,5 А. Особенность предлагаемого схемотехнического решения заключается в принципиальной возможности наращивания амплитуды постоянного напряжения источника питания (до 10000 В и более) при соответствующем подборе элементной базы.

Дальнейшее улучшение характеристик и параметров ИВЭП будет связано с повышением эффективности энергопреобразования, улучшением управляемости работой источника пита-

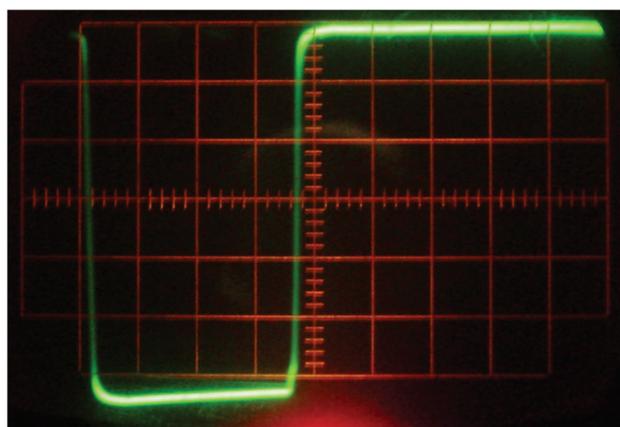


а



б

Рис. 7. Формы импульса анодного напряжения (100 В/дел.) – (а) и анодного тока (50 мА/дел.), а также форма ВЧ сигнала после детектирования – (б) для двухсантиметрового магнетрона. Время – (10 мкс/дел.)



а



б

Рис. 8. Формы импульса анодного напряжения (100 В/дел.) – (а) и анодного тока (50 мА/дел.), а также форма ВЧ сигнала после детектирования – (б) для трехсантиметрового магнетрона. Время – (10 мкс/дел.)

ния, снижением массогабаритных параметров. Для достижения и решения данных задач следует особое внимание уделять новым методам преобразования энергии, применению новых силовых компонентов, в том числе быстродействующим коммутирующим устройствам (например, мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), полевые МОП-транзисторы и т.п.), перспективным ферритовым материалам для сердечников трансформаторов и дросселей, а также конденсаторам с низкими потерями и сверхбыстродействующим выпрямителям с низким падением прямого напряжения и т.п.

**Литература**

- [1] *Верецагин Е.М.* Модуляция в генераторах СВЧ. – М.: Сов. радио, 1972. – 303 с.
- [2] *Обрезан О.И.* Оценка влияния параметров пульсаций источников питания на спектральные характеристики выходных СВЧ-приборов. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1987, вып. 2 (396). – С. 30–39.
- [3] *Полищук А.* Схемотехника современных мощных источников электропитания. Силовая Электроника, № 2, 2005. – С. 80–84.
- [4] *Ланцов В., Владимиров Е.* Мощные высоковольтные источники питания. Часть 3 // Силовая электроника, № 2, 2011. – С. 49–56.
- [5] *Ланцов В., Владимиров Е.* Мощные высоковольтные источники питания. Часть 1 // Силовая электроника, № 5, 2010. – С. 83–98.
- [6] *Полищук А.* Вопросы разработки твердотельных импульсных модуляторов для электровакуумных приборов СВЧ. Современная электроника, № 3, 2005. – С. 52–55.
- [7] *Владимиров Е., Ланцов В., Лебедева О.* Высоковольтный импульсный источник питания большой мощности с управлением от микропроцессора (часть 2). Современная электроника, № 1, 2008. – С. 42–46.
- [8] *Боровиков Е.* Стабилизатор тока накала цветного кинескопа 61ЛК5Ц // В помощь радиолюбителю. – 1989. – Вып. 104. – С. 25–34.
- [9] *Абраш Р.* Устройство индикации и управления для блока питания // Радиолюбитель. – 2007. – № 4. – С. 32–35 и № 6. – С. 25–34.

Поступила в редколлегию 25.09.2015



**Чурюмов Геннадий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических основ электротехники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: математическое моделирование вакуумных приборов СВЧ; теория и техника СВЧ, применение СВЧ технологий.



**Иванцов Валентин Перович**, инженер кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: разработка и исследование электронных приборов; современные источники света.

УДК 621.385.6

**Джерело живлення низьковольтних магнетронів X и K<sub>U</sub> діапазонів із цифровим управлінням / Г.І. Чурюмов, В.П. Иванцов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2015. – Том 14. – № 3. – С. 229–234.**

Розглядаються питання проектування джерел вторинного електроживлення низьковольтних магнетронів з використанням сучасної твердотільної елементної бази. Пропонуються схемотехнічні рішення для побудови вторинного джерела електроживлення постійної напруги до 650 В і анодним струмом до 0,5 ампера, а також імпульсного модулятора для формування імпульсів анодного напруги тривалістю від сотень наносекунд до десятків мікросекунд. Наведено приклади застосування даного джерела живлення для роботи з низьковольтними дво- і трисантиметровими магнетронами в безперервному і імпульсному режимах роботи.

*Ключові слова:* джерело вторинного електроживлення, імпульсний модулятор, низьковольтний магнетрон, імпульс анодної напруги, тривалість імпульсу, шпаруватість.

Табл.: 1. Іл.: 8. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 621.385.6: 537.876.4

**Power supply of low-volt magnetrons of X and K<sub>U</sub> ranges with digital control / G.I. Churyumov, V.P. Ivantsov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2015. – Vol. 14. – № 3. – P. 229–234.**

Questions of designing secondary power supplies of low-volt magnetrons, using present-day solid-state element base, are considered. The paper suggests schematic solutions to build a secondary power supply of dc voltage of up to 650 volts and anode current up to 0.5 A as well as a pulse modulator to form anode voltage pulses of a duration ranging from hundreds of nanoseconds to tens of microseconds. Examples of using the said power supply for operation with low-volt 2 and 3-centimetre range magnetrons in continuous-wave and pulse operation models are given.

*Keywords:* secondary power supply, pulse modulator, low-volt magnetron, anode voltage pulse, pulse duration, on-off time.

Tab.: 1. Fig.: 8. Ref.: 25 items.