

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ МАГНЕТРОНОВ

© 2011 г. Е. В. Булах, В. А. Волков, К. П. Сиренко

*Радиоастрономический институт НАН Украины  
Украина, 61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*E-mail: sirenko\_kp@rian.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 13.12.2010 г.

Рассматриваются принципы построения и описываются характеристики многоканального источника питания для магнетронов непрерывной генерации с выходной мощностью до 3 кВт. В источнике применена развитая система управления отдельными узлами и устройством в целом, что позволило добиться высоких эксплуатационных характеристик и реализовать адаптивные алгоритмы управления режимом магнетрона. Построение источника по модульному принципу и использование в нем современной элементной базы привели к повышению его надежности и улучшению массогабаритных показателей.

### ВВЕДЕНИЕ

Магнетронные генераторы широко применяются в промышленных и экспериментальных установках для с.в.ч.-нагрева, генерации плазмы, с.в.ч.-активации химических процессов. В отличие от технологического оборудования, в экспериментальных установках от магнетронов требуется работа в широком диапазоне изменения выходной мощности и к.с.в.н. нагрузки, что создает предпосылки для развития в нем эффектов (пробой, искрение, перегрев катода), ограничивающих, прямо или косвенно, срок службы генератора. Поэтому важной задачей является поддержание высокостабильного и безопасного режима работы магнетрона в жестких условиях эксплуатации. Энергоэффективность оборудования и возможность его использования в составе неосуществляемых высокоавтоматизированных комплексов также являются непереносимыми требованиями, предъявляемыми к современным источникам подобного типа.

В настоящей работе представлен источник питания для мощных магнетронов непрерывной генерации, обеспечивающий прецизионный контроль рабочего режима магнетрона, а также развитые средства управления и интеграции в производственное или экспериментальное окружение. Источник разработан для проведения экспериментов в области микроволновой химии [1], для плазменных технологий сжигания угля [2] и утилизации отходов.

### УСТРОЙСТВО ИСТОЧНИКА

На рис. 1 изображена упрощенная структурная схема источника. Подобно источнику, описанному в [3], он состоит из трех идентичных преобразовательных модулей и общего для них блока управления, включающего в себя также цепи сопряжения с питающей сетью.

Питающее 3-фазное напряжение через устройство защиты, измерения и подавления помех поступает на выпрямитель, общий для всех силовых цепей источника. В преобразовательном модуле выпрямленное напряжение поступает на два независимых преобразователя постоянного тока, работающих на повышенной частоте, выходное напряжение которых используется для питания накальной и анодной цепей магнетрона. В состав модуля входят также цепи, обеспечивающие обработку сигналов с датчиков и элементов локального управления в соответствии с заданными алгоритмами, управление устройствами индикации и обмен информацией с внешними устройствами по цифровому каналу связи. Хост-контроллер, расположенный в блоке управления, служит для реализации функций управления верхнего уровня, а также дистанционного управления источником с использованием стандартного интерфейса Ethernet 100Base-T.

Источник обеспечивает независимое питание трех магнетронов от 3-фазной сети переменного тока напряжением 480 В. Каждый канал источника обладает следующими основными характеристиками: выходное напряжение 500–5100 В; максимальный выходной ток 1100 мА; диапазон регулирования выходной мощности постоянного тока 0–100%; к.п.д. составляет 95% при выходной

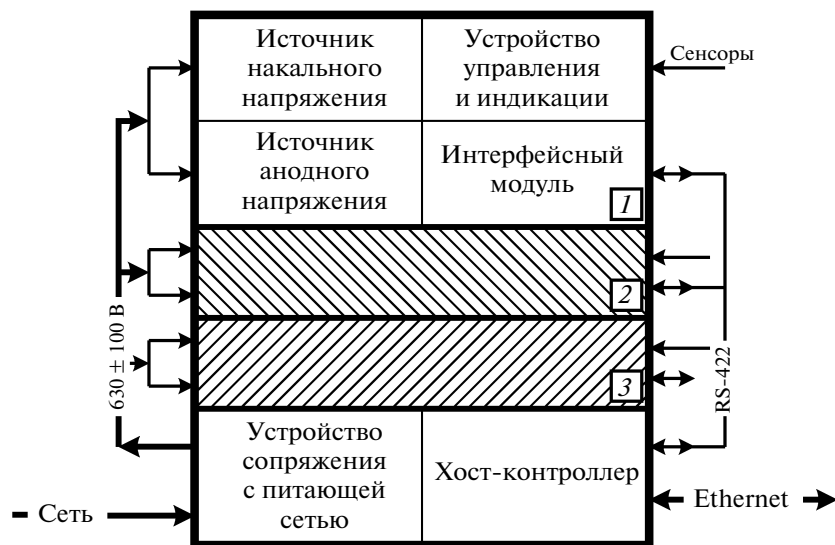


Рис. 1. Структурная схема источника питания.

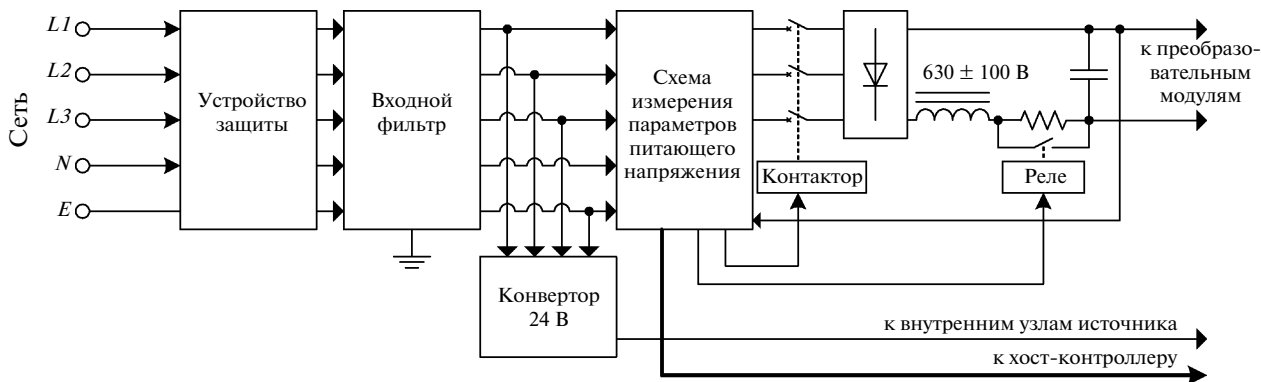


Рис. 2. Блок-схема узла сопряжения с сетью.

мощности постоянного тока  $\geq 3.5$  кВт; диапазон регулирования напряжения накала 0.5–5 В при максимальном токе до 22 А. Все составные части источника конструктивно объединены в рамках конструктива “Евромеханика”, высота стойки – 20 U.

## ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ИСТОЧНИКА

### Узел сопряжения с сетью

Узел сопряжения с сетью содержит цепи включения, защиты, подавления помех и измерения параметров питающего источника напряжения. Блок-схема узла сопряжения с сетью приведена на рис. 2. Схема измерения параметров построена на основе многофункциональной микросхемы счетчика электрической энергии ADE7754 (Analog Devices Inc.).

Измерительные цепи гальванически связаны с питающей сетью, передача данных измерения осуществляется через гальванически развязан-

ный канал связи. В дополнение к измерениям входного напряжения и тока потребления, измеряются перекос фаз питающего напряжения и коэффициент мощности. Это позволяет удешевить источник и уменьшить его массогабаритные характеристики. Например, силовой выпрямитель источника построен по схеме с индуктивной нагрузкой. Дроссель фильтра выпрямителя – это довольно громоздкий элемент схемы, и крайне желательно выполнить его с минимальным запасом по току, что в случае перекоса по фазам питающего напряжения может привести к аварийным режимам работы выпрямителя. Примененная в источнике схема контроля состояния позволяет в этом случае исключить выход из строя элементов выпрямителя.

### Источник анодного напряжения магнетрона

Источник анодного напряжения магнетрона, определяющий эксплуатационные характери-

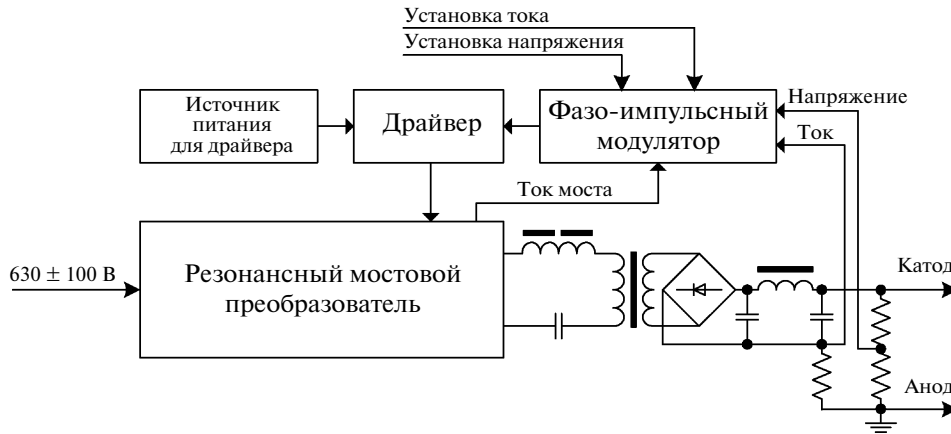


Рис. 3. Структурная схема источника анодного напряжения магнетрона.

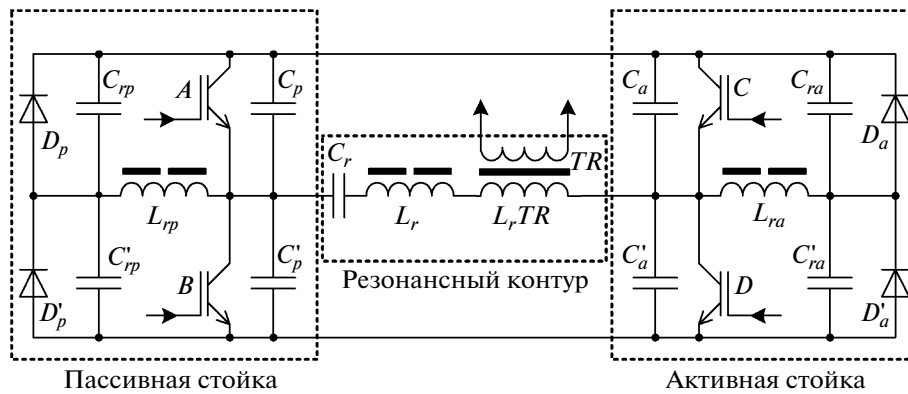


Рис. 4. Упрощенная электрическая схема выходного каскада преобразователя.

ки прибора, является наиболее критичным узлом из-за сильной нелинейности и, в общем случае, нестационарности вольт-амперной характеристики, присущей магнетронам [4].

Структурная схема источника анодного напряжения магнетрона приведена на рис. 3. Он состоит из преобразователя постоянного тока в переменный ток, высоковольтного выпрямителя, цепей измерения и защиты и контроллера. В преобразователе используется архитектура резонансного фазомодулированного мостового коммутатора, ставшая традиционной для устройств большой мощности [5, 6]. В качестве силовых ключей используются IGBT-транзисторы (IGBT). Несмотря на определенную неочевидность такого выбора для уровней мощности порядка нескольких киловатт, во внимание были приняты следующие факторы: 1) доступность IGBT с улучшенными переключательными характеристиками, что позволяет повысить рабочую частоту преобразователя (в данном случае частота переключения составляет 70 кГц); 2) значительно меньшая стоимость IGBT по сравнению с полевыми транзисто-

рами, характеризующимися близкими значениями номинальных токов и напряжений; 3) принципиально меньшие омические потери, что делает такие приборы незаменимыми в случае необходимости увеличения выходной мощности источника.

Функциональная схема выходного каскада преобразователя приведена на рис. 4. Основной проблемой при построении подобных устройств является достижение строго резонансного режима работы силовых ключей в широком диапазоне изменений питающего мост напряжения и нагрузки. Последнее особенно характерно для магнетронов, режим работы которых может варьироваться от пробоя до срыва колебаний при изменении температуры или к.с.в.н. нагрузки.

Особенностью применяемой схемы мостового преобразователя является использование вспомогательных резонансных цепей  $C_{rp}, L_{rp}, C'_p$  в пассивной стойке и  $C_{ra}, L_{ra}, C'_{ra}$  в активной стойке соответственно (см. рис. 4), которые и обеспечивают работу схемы в резонансе во всем диапазоне

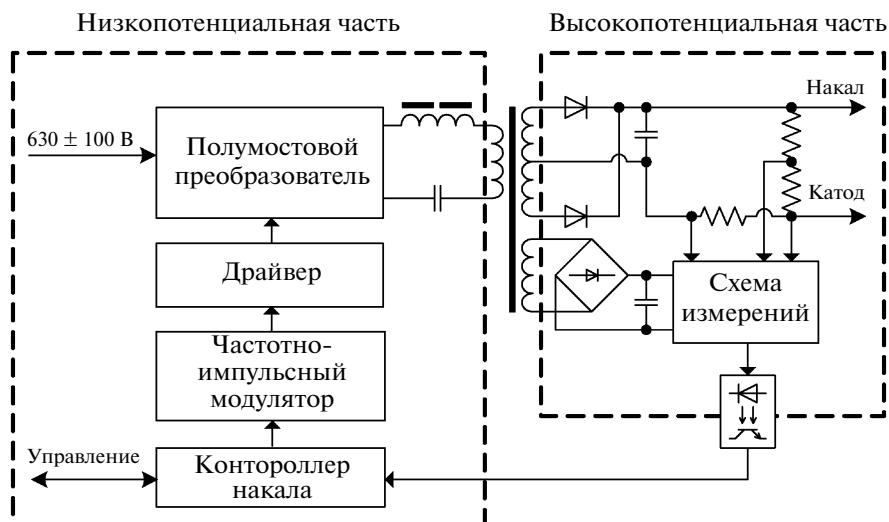


Рис. 5. Структурная схема источника накального напряжения магнетрона.

изменения рабочих параметров преобразователя. Цепь  $C_p, L_p, L_r, TR$  настроена на резонансную частоту, дополнительные емкости  $C_p, C'_p$  и  $C_a, C'_a$  обеспечивают оптимальную скорость нарастания напряжения на пассивной и активной стойках соответственно [6].

В качестве контроллера мостового преобразователя используется микросхема UCC2895 (Texas Instruments). Для управления каждым из силовых транзисторов применяется комбинация оптоизолятора и драйвера, питающихся от отдельного малоомощного гальванически изолированного источника питания. Введение двух независимых контуров регулирования фазово-импульсной модуляции позволяет реализовать режимы источника напряжения или источника тока.

#### Источник накального напряжения магнетрона

Структурная схема источника накального напряжения магнетрона приведена на рис. 5. Он состоит из двух частей: низковольтной (включает полумостовой резонансный преобразователь постоянного тока в переменный ток и контроллер) и высоковольтной (включает трансформатор, выпрямитель, цепи для измерения напряжения и тока накала магнетрона и гальванически изолированный канал передачи данных измерения).

Источник питания накала магнетрона работает следующим образом. Выпрямленное напряжение питающей сети преобразуется в переменное напряжение повышенной частоты и прикладывается к первичной обмотке накального трансформатора. В преобразователе используется полумостовая резонансная схема LLC-типа с частотным

регулированием [7, 8]. Контроллер преобразователя выполнен на основе микросхемы NCP1396 (ON Semiconductor).

Переменное напряжение, снимаемое с вторичной обмотки трансформатора, выпрямляется и используется непосредственно для питания накальной цепи магнетрона. Микроконтроллер со встроенными аналого-цифровыми преобразователями совместно с буферными устройствами используется для измерения напряжения и тока накала магнетрона, первичной обработки и преобразования полученных цифровых данных в формат, удобный для передачи по последовательному каналу связи. Так как цепь накала магнетрона находится под высоким потенциалом, в последнем используется оптическая развязка. Измерительные цепи питаются от отдельной обмотки накального трансформатора, что позволяет добиться их устойчивой работы при малых значениях собственно накального напряжения, начинающихся с 0.5 В.

Отдельный микроконтроллер принимает и обрабатывает данные измерений на низковольтной стороне источника накального напряжения. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор реализован программным образом, аналоговый контроллер LLC-преобразователя используется только как частотно-импульсный модулятор и устройство контроля режимов силовых транзисторов.

#### Структура управления источником

Как отмечалось выше, в источнике используется распределенный подход к организации управления отдельными его узлами. Иерархическая структура обработки управляющей информации приведена

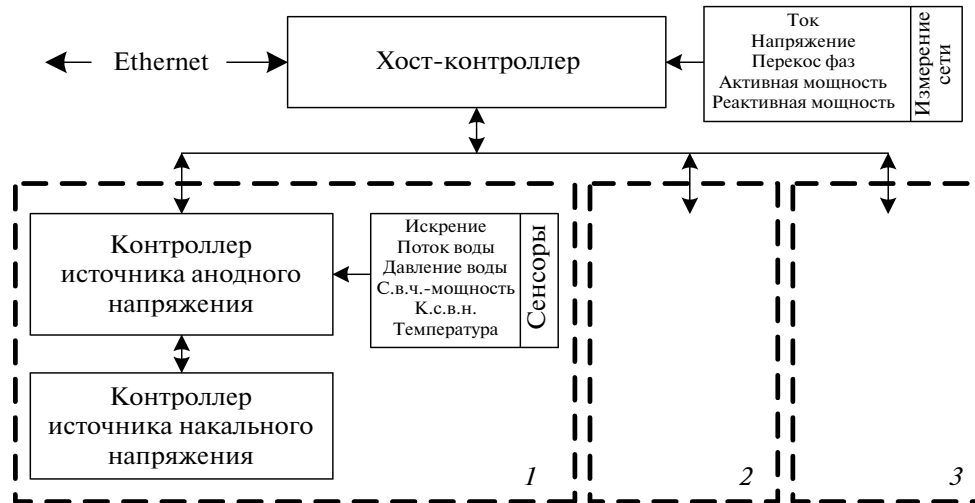


Рис. 6. Структура управления источником с указанием контролируемых параметров.

на рис. 6. основополагающим принципом построения цепей управления источником является положение о локальной обработке сигналов, относящихся к определенному узлу источника, в контроллере этого и только этого узла.

Например, сигнал детектора отраженной волны обрабатывается в контроллере анодного напряжения соответствующего преобразовательного модуля, поскольку превышение им заданного порога должно приводить к выключению упомянутого источника. Для остальных узлов, входящих в структуру управления, достаточно лишь получить уведомление о подобном событии. Такой подход повышает надежность, уменьшает время реакции, улучшает ремонтпригодность и облегчает настройку цепей источника. Список контролируемых параметров приведен на рис. 6.

Защита цепей магнетрона и источника от электрических и тепловых перегрузок основана на совместном применении аппаратных и программных средств. Наиболее критические параметры, такие как ток магнетрона или анодное напряжение, ограничиваются как на программном уровне путем сравнения измеренных величин с заранее заданными значениями, так и аппаратной проверкой соответствующих сигналов на превышение установленных максимальных порогов.

Каждый преобразовательный модуль допускает локальное либо удаленное управление. В режиме локального управления можно включать/выключать накальное и анодное напряжения магнетрона и регулировать выходную мощность либо прямым регулированием анодного тока магнетрона, либо по сигналу с внешнего датчика мощности. При включении этого режима удаленное

управление блокируется на аппаратном уровне для исключения возможности несанкционированного изменения режимов работы. В режиме локального управления для удаленного оператора доступны только функции протоколирования рабочих параметров источника. Собственно возможность удаленного управления определяется наличием у каждого преобразовательного модуля внешнего интерфейса управления общего назначения – RS-422.

Контроллеры преобразовательного модуля выполнены на основе микросхем серии C8051Fxxx (Signal Laboratories Inc.).

Контроллер-супервизор источника конструктивно расположен в блоке управления и выполнен на основе микросхемы AT91SAM7X256 (Atmel). Он обеспечивает функции управления, общие для преобразовательных модулей, например, контроль параметров питающей сети, равно как их согласованную работу для реализации конкретного сценария управления источником. Также контроллер поддерживает возможности управления источником по сети Ethernet.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ИСТОЧНИКА

Источник испытывался в три этапа. Первоначально каждый преобразовательный модуль испытывался с резистивной нагрузкой для проверки устойчивой долговременной работы во всем возможном диапазоне нагрузок.

На втором этапе к источнику подключались три магнетрона 2M290 (производство LG Electronics), каждый из которых имеет следующие параметры: подводимая мощность постоянного тока ~4.3 кВт; выходная с.в.ч.-мощность 3 кВт; ча-

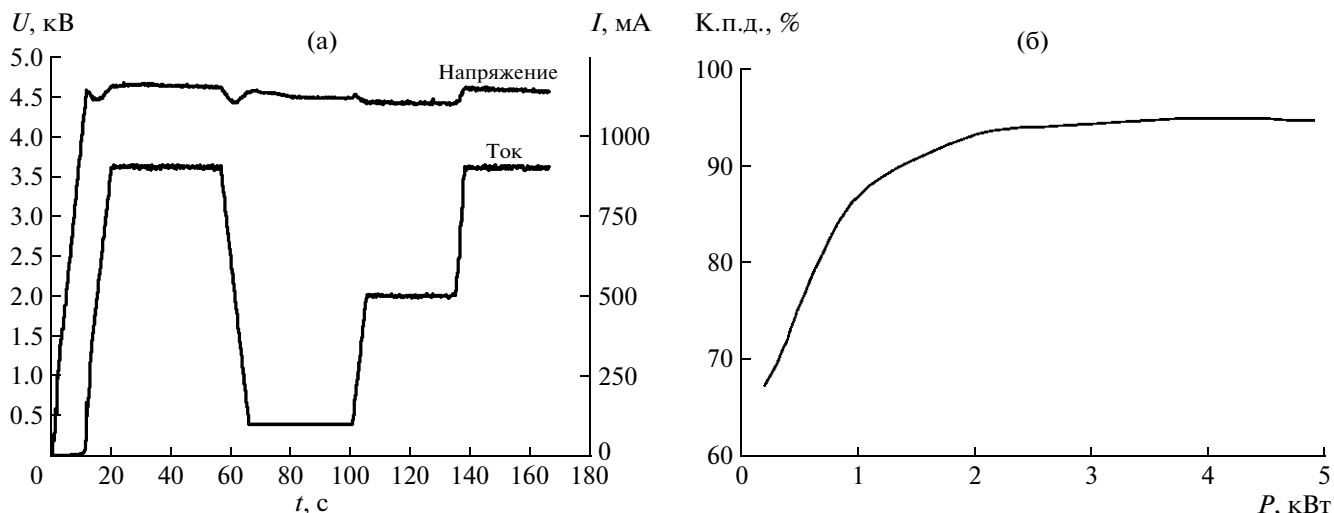


Рис. 7. Зависимости: а – анодного напряжения от времени при различных установочных значениях тока анода; б – к.п.д. источника питания от его выходной мощности.

стога генерации 2455 МГц; анодное напряжение 5.1 кВ (пиковое значение при питании выпрямленным напряжением однофазной сети); анодный ток 900 мА; напряжение накала 4.6–2 В; ток накала до 20 А.

В результате испытаний установлено, что при питании магнетрона постоянным напряжением источник должен работать в режиме управляемого источника тока. В режиме источника напряжения наблюдался неконтролируемый рост анодного тока магнетрона. В то же время очевидно, что до момента начала протекания анодного тока, или в случае его срыва, или отсутствия генерации режим источника напряжения является единственно возможным. Поэтому в контроллере источника анодного напряжения используются адаптивные алгоритмы, позволяющие гибко менять режимы его работы для обеспечения надежного функционирования магнетрона.

На рис. 7 приведен график зависимости анодного тока и напряжения от времени, включая запуск магнетрона и регулирование анодного тока, а, следовательно, и выходной мощности. Обращает на себя внимание стабильная работа магнетрона при малых токах, практически у самого порога возникновения генерации, где крутизна и нелинейность вольт-амперной характеристики магнетрона достигают наибольших значений. Подобное поведение источника позволяет специфицировать его для работы во всем возможном диапазоне выходной в.ч.-мощности магнетрона.

Измеренные значения к.п.д. источника питания во всем диапазоне его выходной мощности приведены на рис. 7б.

На третьем этапе испытаний источник нагружали на цепь последовательно соединенных газовых разрядников с суммарным напряжением пробоя 5 кВ для проверки его устойчивой работы в условиях пробоя в магнетроне. Установлено, что пробой разрядников не приводит к выходу из строя анодного источника, а также не вызывает сбоев в работе схемы управления.

## ВЫВОДЫ

Описанный источник питания для промышленных магнетронов отвечает требованиям, предъявляемым к аппаратуре для экспериментальных исследований. Достигнутая в устройстве высокая рабочая частота преобразователей, выполненных на основе IGBT, благоприятно сказывается на массогабаритных показателях источника и переходных характеристиках регулирования выходного напряжения. Применение резонансной схемы в преобразователях позволяет добиться лучшего, чем в других устройствах [9], к.п.д.

Использование локальных контроллеров, объединенных в общую сеть, повышает помехоустойчивость и общую надежность источника, позволяет сократить количество межсоединений и унифицировать межблочные, программные и физические интерфейсы, упростить настройку и локализацию неисправностей. Разработанные алгоритмы управления обеспечивают безопасную работу магнетрона и цепей источника в условиях промышленного окружения. Источник допускает как локальное, так и удаленное управление в режиме реального времени.

В заключение выражаем признательность А.П. Попову и В.Е. Семенюте за всестороннюю

помощь в разработке источника, Л.В. Шевцовой за конструкторскую поддержку разработки и А.М. Королёву за плодотворное обсуждение работы.

Разработка источника частично финансировалась Украинским Научно-технологическим центром в рамках проекта № 4728.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *C. Oliver Kappe, Alexander Stadler. Microwaves in Organic and Medicinal Chemistry. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.*
2. *Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I. et al. // Fuel. 2003. V. 82. P. 187.*
3. *Spellman. MG Series 10 kW–120 kW HV Power Supply Rack Mount; <http://www.spellmanhv.com/~media/Files/Products/MG.ashx>*
4. *Collins G.B. Microwave Magnetrons. N.Y.: McGraw Hill, 1948.*
5. *Rashid M.H. Power Electronics Handbook. N.Y.: Academic Press, 2001.*
6. *Texas Instruments. Phase Shifted, Zero Voltage Transition Design Considerations and the UC3875 PWM Controller. AN U-136A. Unitrode1997.*
7. *Severns R.P. // IEEE Trans. Power Electronics. 1992. V. 7. № 1. P. 89.*
8. *Pressman A. Switching Power Supply Design. N.Y.: McGraw-Hill Professional, 1997.*
9. *Dipolar. Magdrive1000; <http://www.dipolar.se/products/DipolarMagdrive1000.pdf>*