

УДК 533.9.07 : 621.373.4

Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов

В. Н. Тихонов, И. А. Иванов, А. Е. Крюков, А. В. Тихонов

В качестве дешевых источников СВЧ-энергии для микроволновых плазмотронов предлагается использовать генераторы, построенные на базе основных компонентов бытовых микроволновых печей. Разработаны схемы трехфазных высоковольтных источников питания, которые позволяют получать до 3 кВт непрерывной СВЧ-мощности от магнетронов с номинальной мощностью 1 кВт и методы модификации таких магнетронов с воздушного охлаждения на жидкостное. Проведены огневые испытания различных конструкций вихревых плазмотронов, работающих на атмосферном давлении.

PACS: 52.50.Sw; 84.40.-x

Ключевые слова: СВЧ-генератор, магнетрон, микроволновый плазмотрон, СВЧ-разряд.

Введение

В настоящее время существует острая необходимость в экономичных, простых и надежных источниках низкотемпературной плазмы для применения в перспективных направлениях развития науки и промышленности, например, при разработке новых материалов и технологий, а также для интенсификации существующих традиционных технологических процессов.

На сегодняшний день наибольшее применение получили три вида генераторов плазмы [1, 2]:

- электродуговые — на постоянном и переменном токе,
- высокочастотные (ВЧ),
- сверхвысокочастотные (СВЧ, микроволновые) плазмотроны.

Исторически первыми с этой целью были использованы электродуговые разряды постоянного тока и переменного тока промышленной частоты. В настоящее время они наиболее полно изучены и находят достаточно широкое применение в промышленности.

С появлением ламповых генераторов началось использование разрядов высокой частоты (ВЧ) — от 60 кГц до 60 МГц, что позволило изо-

лировать ионизированную область газа от электродов и стенок разрядной камеры и получать относительно чистую безэлектродную плазму, не имеющую теплового и электрического контакта с элементами конструкции плазмотрона. В качестве источников энергии высокой частоты в настоящее время все более широко используются твердотельные ВЧ-генераторы на мощных полупроводниковых приборах [3, 4].

Использование сверхвысокочастотных (СВЧ) плазмотронов дает возможность сочетать преимущества чистого безэлектродного разряда с удобством подвода электромагнитной энергии по волноводным или коаксиальным фидерным линиям [5]. В разрешенных для промышленного применения диапазонах частот 930 и 2450 МГц в качестве источников энергии для СВЧ-плазмотронов практически повсеместно используются мощные генераторы на магнетронах.

Базовую стоимость как ВЧ- так и СВЧ-генераторов киловаттного уровня мощности можно оценить по их удельной стоимости, которая составляет величину от 50 (на вторичном рынке, б/у источники) до 500 и более рублей за 1 Вт генерируемой мощности (например, полупроводниковые ВЧ-генераторы компании Comdel, серия CPS [6]).

В то же время цена бытовой микроволновой печи с СВЧ-мощностью 1 кВт (куда помимо магнетрона входят достаточно сложный корпус, высоковольтный трансформатор, системы вентиляции, блокировки и управления) может составлять менее 4000 рублей, т. е. порядка 4 рубля за 1 Вт полезной мощности.

Поэтому представляется разумным использовать в качестве дешевого источника СВЧ-энергии для микроволновых плазмотронов основные компоненты бытовых микроволновых печей. Массовое производство и острая конкуренция ве-

Тихонов Виктор Николаевич, научный сотрудник.
Иванов Игорь Анатольевич, главный специалист.
Крюков Александр Евгеньевич, научный сотрудник.
Тихонов Александр Викторович, научный сотрудник.
Всероссийский НИИ радиологии и агроэкологии.
Россия, 249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км.
Тел. 8 (484) 399-69-36, факс 8 (484) 396-80-66.
E-mail: v.n.tihonov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 5 августа 2015 г.

© Тихонов В. Н., Иванов И. А., Крюков А. Е., Тихонов А. В., 2015

дущих фирм-производителей на мировом рынке обеспечивают высокую надежность их продукции при весьма низкой стоимости. Потребности ремонта и обслуживания огромного парка СВЧ-печей обуславливают дешевизну и доступность запасных частей, а также несложность технологии ремонта, например, путем простой замены компонентов.

Целью данной работы является исследование возможностей реализации т. н. бюджетных генераторов для микроволновых плазмотронов на базе основных компонентов бытовых микроволновых печей, для чего было необходимо решить несколько специфических задач.

Обеспечение непрерывного режима работы магнетрона

Схема питания магнетрона обычной микроволновой печи от однофазной сети основана на повышающем трансформаторе, вторичная обмотка которого нагружена на однополупериодный выпрямитель с удвоением напряжения. Поэтому огибающая типового СВЧ-сигнала представляет собой импульсы микроволновой энергии длительностью порядка 1 мс с периодом повторения 2 мс. В этих условиях поддержание самостоятельного устойчивого горения плазмы в подкритичном плазмотроне на атмосферном давлении практически невозможно.

Преимущества удвоения: вдвое меньшие рабочие напряжения трансформатора и конденсатора — снижение весогабаритных и стоимостных показателей.

Недостатки: импульсный режим работы магнетрона — половина периода питающего напряжения приходится на процесс накопления энергии в конденсаторе. Такой режим не подходит для питания плазменных установок, работающих при атмосферном давлении — за время паузы (~ 1 мс) ионы в области разряда успевают рекомбинировать или же сама область разряда выдувается из разрядной камеры потоком рабочего газа.

Известна схема питания магнетрона от двух таких трансформаторов, включенных противофазно в питающую сеть (220 В/50 Гц). Она использовалась, в частности, в отечественных СВЧ-источниках "Хазар-0.6" [7]. Несмотря на очень высокий (до 100 %) уровень пульсаций, в некоторых типах плазмотронов при такой запитке все же удается поддерживать плазменный разряд на атмосферном давлении при использовании в качестве плазмообразующих газов окиси углерода и воздуха — раздельно и в сочетании. Однако такой разряд недостаточно устойчив и весьма критичен к параметрам формируемого потока рабочих газов.

Гораздо более подходящей для целей поддержания непрерывного плазменного разряда на атмосферном давлении является схема высоковольтного питания магнетрона от трехфазной сети переменного тока с помощью трех повышающих трансформаторов, работающих по схеме, которую можно условно назвать "три четвертьмоста с удвоением, параллельно" [8]. Уровень пульсаций при этом оказывается порядка 15 % без применения каких-либо дополнительных схемотехнических приемов и средств. Это более чем достаточно для поддержания непрерывного плазменного разряда, который получается устойчивым даже для такого весьма капризного рабочего тела, как перегретый водяной пар.

Управление уровнем мощности

Все без исключения магнетроны для бытовых печей выпускаются на постоянных магнитах, поэтому регулирование мощности у них возможно только путем периодического включения и выключения, т. е. изменением соотношения времени работы на полную мощность и продолжительности паузы до следующего включения.

Эта задача была решена за счет дискретного изменения соотношения параметров емкостных накопителей в удвоителях напряжения по каждой фазе. Переключение двух или трех комплектов высоковольтных конденсаторов позволяет обеспечить несколько (реально 3—5) дискретных уровней рабочей мощности магнетронного генератора.

Поскольку коммутацию схемы мы производим с помощью обычных трехфазных промышленных контакторов, выпускаемых для сети 220/380 В, переход на другой уровень мощности должен производиться только после снятия высокого напряжения, т. е. выключения питания магнетрона. Использование специальных высоковольтных коммутаторов, возможно, позволило бы осуществлять переключение уровней мощности без выключения генерации, но по стоимостным и весогабаритным показателям такой источник питания сразу же переходит в другую «весовую категорию».

Для продления срока службы магнетрона, особенно в условиях продолжительной (многочасовой и круглосуточной) непрерывной работы, возможно изготовление источника питания с отключаемым или же регулируемым накалом катода. Также возможно оснащение источника питания приборами для измерения величины тока накала и анодного тока. Такой «продвинутый» источник питания, с четырьмя уровнями рабочей мощности, с плавной регулировкой тока накала и индикацией его величины, а также с прямым измерением анодного тока магнетрона представлен на рис. 1

слева. На этом же рисунке справа показан источник питания магнетрона с двумя уровнями мощности, причем в самом «бюджетном» исполнении.



Рис. 1. Источники питания магнетронных генераторов: слева — с независимым регулированием тока накала и индикацией величины анодного тока; справа — в максимально «бюджетном» исполнении

Повышение эффективности системы охлаждения

При работе в таком истинно-непрерывном режиме достигнуто более чем двукратное увеличение выходной мощности магнетрона по сравнению с паспортным квазинепрерывным режимом. Но в той же пропорции возросла и тепловая нагрузка на все его конструктивные элементы. В этих условиях штатное воздушное охлаждение оказалось совершенно недостаточным.

Для работы при повышенных уровнях мощности был разработан метод модификации системы охлаждения серийных СВЧ-магнетронов, используемых в бытовых и промышленных микроволновых печах, а именно, с воздушной на водяную систему охлаждения.

Для сравнения: Компания LG выпускает, например, магнетроны типа 2M278 с выходной мощностью **2 кВт**, причем в варианте воздушного охлаждения на нашем внутреннем рынке они предлагались по цене **14 тыс. руб.**, а в варианте с водяным охлаждением — по цене **37 тыс. руб.** за штуку. Та же фирма выпускает магнетроны 2M285 с воздушным охлаждением на **3 кВт** рабочей мощности по цене **21 тыс. руб.** К тому же нужно учесть, что для этих магнетронов необходимы специальные трансформаторы, которые на нашем отечественном рынке отсутствуют.

Первые предпринятые нами модификации магнетрона с воздушного на водяное охлаждение были выполнены с использованием навивки тонкостенной медной трубки непосредственно на корпус прибора. На рис. 2 слева показан отечественный магнетрон М-105, переделанный под водяное охлаждение. Для улучшения теплового контакта трубки с корпусом использовались термопасты КПТ-8, Thermaltake и др. Однако та-

кая конструкция не обеспечивала достаточно охлаждения постоянных магнитов, которые оказались наиболее критичны к перегреву при повышенных уровнях мощности.



Рис. 2. Варианты модификации серийных магнетронов для работы с водяным охлаждением при повышенных уровнях генерируемой мощности

Ввиду вышеуказанного обстоятельства, была разработана и испытана конструкция водяного радиатора в виде разрезного моноблока из алюминиевого сплава. Такой радиатор имеет достаточно хороший тепловой контакт с обоими магнитами (за счет большой площади контакта) и плотную посадку на корпус магнетрона за счет силовой стяжки разрезной конструкции. На рис. 2 справа представлен магнетрон фирмы Samsung типа OM-75P(31) с номинальной выходной мощностью 1000 Вт, оснащенный моноблочным водяным радиатором. В ходе испытаний он развивал мощность **2,5 кВт** на протяжении более 8 часов непрерывной работы на согласованную нагрузку.

Результаты совместной работы с плазмотронами

В результате проведенных исследований и разработок удалось обеспечить возможность осуществления истинно-непрерывного режима работы общедоступных и недорогих магнетронов при питании от трехфазной сети переменного тока. Трансформаторы, диоды и конденсаторы также используются штатные, общедоступные и недорогие. При этом было достигнуто повышение выходной мощности магнетрона более чем в два с половиной раза по сравнению с паспортным значением, причем тепловая нагрузка на каждый из высоковольтных трансформаторов блока питания при этом может быть снижена до величины порядка 0,7 от штатного режима. Последнее обстоятельство дает возможность осуществлять непрерывные технологические процессы в течение многих суток без остановки.

Изготовлены и прошли промышленные испытания СВЧ-генераторы непрерывного действия с дискретным регулированием выходной мощно-

сти от 0,3 до 3 кВт. Проведены огневые испытания с использованием нескольких конструкций вихревых плазмотронов, работающих на атмосферном давлении (см. рис. 3), при этом в качестве рабочего газа использовались воздух, аргон, водяной пар, углекислый газ и др.



Рис. 3. Микроволновый плазмотрон, работающий на атмосферном давлении, расход воздуха 20—30 л/мин

Заключение

Проведенные исследования и опыты позволили нам разработать простые, надёжные, недорогие и высокоэффективные СВЧ-генераторы для питания микроволновых плазмотронов, а также и для иных промышленных и исследовательских микроволновых установок различного назначения. Разработаны схемы трехфазных высоковольтных источников питания, которые позволяют получать

до 3 кВт непрерывной СВЧ-мощности от магнетронов для бытовых СВЧ-печей с номинальной мощностью 1 кВт и методы модификации таких магнетронов с воздушного охлаждения на жидкостное. Проведены огневые испытания различных конструкций вихревых плазмотронов, работающих на атмосферном давлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том, кн. 2. Под ред. акад. Форгова В. Е. — М.: МАИК "Наука / Интерпериодика", 2000.
2. Форгов В. Е. (глав. ред.) Энциклопедия низкотемпературной плазмы (в 9-ти книгах). — М.: МАИК "Наука / Интерпериодика", 2000—2008.
3. Power Supply [Электронный ресурс]: Applied Plasma Technologies, LLC (APT). URL: http://www.plasmacombustion.com/product-power_supply.html
4. High Frequency RF Power Supplies [Электронный ресурс]: Comdel Inc. URL: <http://www.comdel.com/high-frequency-rf-power-supplies>
5. Батенин В. М., Климовский И. И., Лысов Г. В. и др. СВЧ-генераторы плазмы: Физика, техника, применение. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Высокочастотные источники серий СВ, СХ и СРС [Электронный ресурс]: ООО «Современное вакуумное оборудование». URL: <http://www.cryosystems.ru/equipments/vacuequip/vysokochastotnye-generatory-i-istochniki-pitanija/>
7. Источники СВЧ-энергии серии «Хазар» [Электронный ресурс]: ФГУП НПП «Контакт». URL: <http://www.kontakt-saratov.ru/produkt/okb/402/Hazar.htm>
8. Тихонов В. Н., Пугашкин Д. В., Четокин Я. А. Микроволновый генератор. Государственный реестр изобретений Российской Федерации, патент РФ № 2480890 от 09.12.2011, опубл. 27.04.2013.

Low cost microwave generators for plasma torches

V. N. Tikhonov, I. A. Ivanov, A. E. Kryukov, and A. V. Tikhonov

Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology
109-th km, Kiev highway, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia
E-mail: v.n.tihonov@yandex.ru

Received August 5, 2015

We have designed a special high-voltage power supply component, based on domestic microwave ovens. It can produce up to 3 kW of continuous microwave power from conventional, household magnetrons with a rated power of 1 kW. We have been developed technology modification of such magnetrons from air to water cooling. The microwave generators with a discrete control of the output power from 0.3 to 3 kW have been manufactured and tested in industrial environment. These microwave generators have been tested with different vortex plasmotrons, which operate at atmospheric pressure, using the actual gases such as air, argon, water vapor, carbon dioxide, etc.

PACS: 52.50.Sw; 84.40.-x

Keywords: microwave generator, microwave discharge, plasma, torch.

REFERENCES

1. *Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma. Entrance Volume, Book 2*. Ed. by V. E. Fortov. (MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, 2000) [in Russian].
2. *Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma. Books 1-9*. Ed. by V. E. Fortov. (MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, 2000-2008) [in Russian].
3. *Power Supply: Applied Plasma Technologies*, LLC (APT). http://www.plasmacombustion.com/product-power_supply.html
4. *High Frequency RF Power Supplies*. Comdel Inc. URL: <http://www.comdel.com/high-frequency-rf-power-supplies>
5. V. M. Batenin, I. I. Klimovskii, G. V. Lysov, et al., *Microwave Generators of Plasma* (Energoatomizdat, Moscow, 1988) [in Russian].
6. *High Frequency RF Power Supplies series of CB, CX and CPS*. <http://www.cryosystems.ru/equipments/vacuequip/vysokochastotnyegeneratory-i-istochniki-pitanija/>
7. *Microwave Power Supplies series of "Khazar"*. <http://www.kontakt-saratov.ru/produkt/okb/402/Hazar.htm>
8. V. N. Tikhonov, D. V. Pugashkin, and Ya. A. Chetokin, RF Patent No. 2480890, December 9, 2011.