

Литература

1. Колесник Л.Л., Жулева Т.С., Предтеченский П.О., Мьо Чжо Хлаинг, Зао Пхо Аунг. Обработка технологии металлизации алюмооксидной керамики для элементов электровакуумных приборов и устройств силовой электроники // Вакуумная техника и технологии – 2017: Труды 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. / под. Ред. д-ра техн. наук А.А. Лисенкова. – Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. с. 208-210.
2. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M. Martin. - 3<sup>rd</sup> ed. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – xviii, 912 p.: ill. – Bibliogr. at the end of the chapters. ISBN 978-0-8155-2031-3
3. А. Г. Лучкин, Г. С. Лучкин, ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ.
4. Kolesnik L.L., Dejev V.A., Seleznev A.B. Analysis of the possibility of using the steam-jet deposition method for the metallization of substrates // Vacuum science and technology: Materials of the 20th scientific and technical conference with the participation of foreign specialists, 2013 . 165-167 p.
5. US. Patent 5571332 – Electron Jet Vapor Deposition System, 1996.
6. Danilin B.S., Syrchin V.K. Magnetronnyyeraspylitel'nyyesistemy; Radio isvyaz'. 1982. 72 p.
7. Marakhtanov M.K. Magnetronnyyesistemyionnogoraspyleniya (Osnovyteoriiirascheta). M. : BMSTU. 1990. 76 p.

## Системы питания ВЧ-напряжением для вакуумно-технологического оборудования

*В.С.Мачикин*

*ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ»*

*г.Москва, Садовническая ул., д.72, стр.1, оф.6*

*iver@mail.ru*

*Предприятие ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ» разработало и освоило выпуск с 2017 года двух систем питания ВЧ-напряжением.*

*Первая система, работающая на фиксированной частоте 13,56 МГц, состоит из ВЧ-генератора с активной выходной мощностью 600 Вт или 1000 Вт, автоматического согласующего устройства и соединительных кабелей. Варианты исполнения согласующего устройства позволяют работать системе на емкостной ВЧ-разряд, на ВЧ-магнетрон распыления и на индукционный ВЧ-разряд.*

*Вторая система, работающая в диапазоне частот 0,8 ÷ 2 МГц с автоподстройкой частоты на резонанс в нагрузочном ВЧ-индукторе, состоит из AC/DC-блока питания и управления, ВЧ-инвертора с активной выходной мощностью до 3 кВт и соединительных кабелей. Система ориентирована на питание ГРК ВЧ-источников ионов с индукционным разрядом.*

***Power supply systems for high-voltage equipment for vacuum processing equipment V.S.Machikin. LLC «PLASMA-TECH». The company PLAZMA-TECH LLC has developed and mastered the production of two high-voltage power supply systems since 2017.***

*The first system, operating at a fixed frequency of 13.56 MHz, consists of an RF generator with an active output power of 600 W or 1000 W, an automatic matching device and connecting cables. The variants of the matching device allow the system to operate on a capacitive HF discharge, on an RF magnetron sputtering and on an induction HF discharge.*

The second system, operating in the frequency range of  $0.8 \div 2$  MHz with auto-tuning of frequency to resonance in a load RF inductor, consists of an AC / DC power supply and control unit, an RF inverter with an active output power of up to 3 kW and connecting cables. The system is oriented to the supply of GRC HF sources of ions with an inductive discharge.

В 2017 году ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ» разработало и начало производство типо-ряда систем питания ВЧ-напряжением (током) с фиксированной частотой 13,56 МГц и также с плавающей частотой в диапазоне от 0,8 МГц до 2 МГц и с автогенераторной подстройкой частоты на резонанс в нагрузочном индукторе.

Разработанный типо-ряд систем питания с частотой 13,56 МГц ориентирован на широкий спектр нагрузок – устройств плазмо-химической обработки, ВЧ-магнетронного распыления, ВЧ-источников ионов, устройств очистки и модификации поверхности в ВЧ-плазме. Эти системы питания построены по классической структурной схеме: ВЧ-генератор содержащий AC/DC – конвертор, питаемый от промышленной однофазной сети для систем с выходной ВЧ-мощностью 600 Вт и 1 кВт и трехфазной – для ВЧ-мощности 2 кВт и выше. Далее питаемый от него ВЧ-инвертор с фиксированной частотой преобразования 13,56 МГц, выходной напряжением, с которого пройдя через узел измерителя ВЧ-сигнала, поступает через соединительный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом на автоматическое согласующее устройство (АСУ), а затем с его выхода - в нагрузку. Находящийся в ВЧ-генераторе модуль управления и сопряжения сигналов обеспечивает регулирование и стабилизацию его выходных параметров и полное управление системой, как в ручном режиме, так и от внешнего управления по интерфейсу «RS-485».

Структурно-функциональная схема ВЧ-генератора приведена на рис.1.

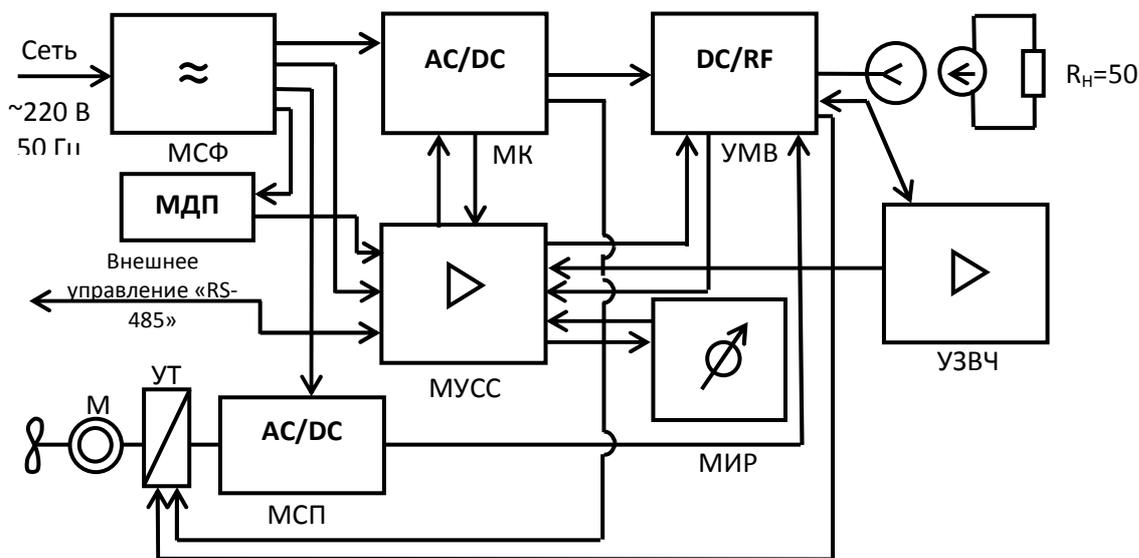


Рис.1

Однако, в этих системах питания имеются привнесенные схмотехнические и конструктивные особенности, свойственные разработкам ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ».

Первая. Традиционно AC/DC-конвертор имеет встроенный корректор коэффициента потребляемой по питающей сетимощности, что обеспечивает практически синусоидальный потребляемый ток.

Вторая. ВЧ-генератор обеспечивает регулирование и стабилизацию с погрешностью 2% следующих двух выходных параметров: активной средней эффективной ВЧ-мощности и амплитудного ВЧ-напряжения, а также внутреннего питающего ВЧ-инвертор DC-напряжения. Стабилизация именно активной ВЧ-мощности позволяет даже при нарушении со стороны АСУ оптимального согласования и колебаниях величины отраженной волны и сопротивления

нагрузки поддерживать постоянство выделяемой заданной ВЧ-мощности в нагрузке. Такого режима нет даже в импортных ВЧ-генераторах. Кроме того, значительно расширен диапазон величины отраженной волны по выходе ВЧ-генератора, что дает возможность работы при малых уровнях активной выходной ВЧ-мощности, практически не добиваясь оптимального согласования с нагрузкой или же поддерживать более широкий диапазон изменения импеданса нагрузки при работе системы. Возможность стабилизации и регулирования питающего ВЧ-инвертор DC-напряжения позволяет быстро производить начальное согласование ВЧ-генератора с нагрузкой, особенно когда ее импеданс изменяется в широком диапазоне.

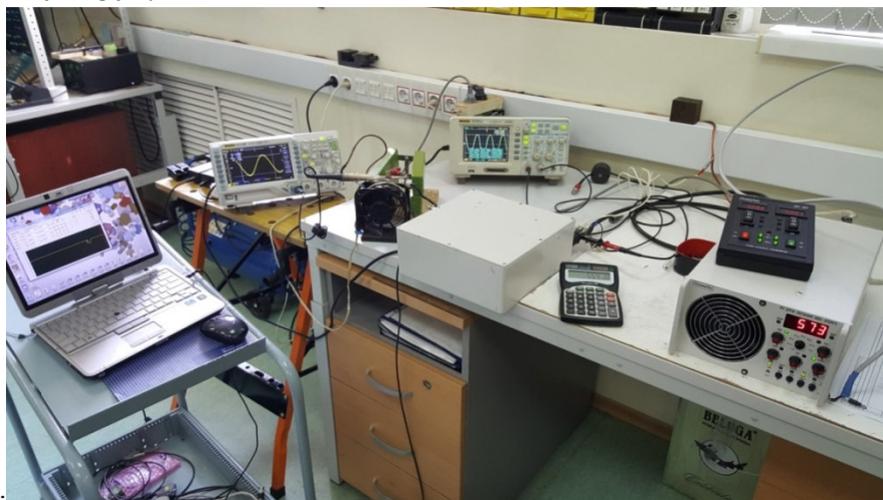
Третья. ВЧ-инвертор работает в режиме «класса D» или «класса E». Это позволило поднять КПД преобразования питаемой DC-мощности в активную ВЧ-мощность на уровень от 0,73 до 0,85 и применять в системах с выходной мощностью до 1 кВт только принудительное воздушное охлаждение, а также конструктивно разместить ВЧ-генератор в крейте  $\frac{1}{2}$  19", т.е. в «половинчатом».

Четвертая. ВЧ-генератор имеет разностороннюю защиту его силовых транзисторов – по теплу, напряжению, току, виду режима преобразования, что обеспечивает его безаварийную работу при полном «рассогласовании» нагрузки.

Пятая. Конструктивное исполнение АСУ в компактном литом алюминиевом корпусе позволяет оперативно переконфигурировать его под разные виды нагрузок – емкостную, индуктивную либо смешанную.

Кроме того, АСУ имеет встроенный КСВ-метр и микроконтроллер, а также внешний пульт ручного управления, позволяющий системе питания работать как в автоматическом, так и в ручном режиме, и оперативно переходить при работе из одного режима в другой.

На рисунках 2 и 3 представлена работающая на разных стеновых нагрузках система питания с активной выходной ВЧ-мощностью 600 Вт, состоящая из ВЧ-генератора «ИВЭ-070RFS», согласующего устройства «АСУ-171RF», соединительного кабеля и пульта ручного управления «ПРУ-АСУ».



*Рис.2 ( $C_n=60$  нФ,  $R_n=1,2$  кОм)*

АСУ для больших выходных реактивных мощностей может иметь исполнение с принудительным жидкостным охлаждением.

В настоящее время проводится разработка АСУ на переменных ВЧ-конденсаторах с твердым диэлектриком производства ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ», что позволит отказаться от дорогостоящих вакуумных конденсаторов и соответственно уменьшить его стоимость с сохранением габаритов при увеличении выходной реактивной мощности.

Описанная система питания мощностью 600 Вт, испытана на емкостной ВЧ-разряд с целью обработки в ВЧ-плазме разных изделий в Казанском политехническом институте и предприятии ПИ-ВИ-ЭС (рис.4). Такая же система испытана в ОАО «КОМПОЗИТ» (рис.5) на

кольцевой ВЧ-магнетрон распыления (рис.6), разработанный и изготовленный также ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ». Подобная система испытана в предприятии ООО «АВАНТ СПЭЙС СИСТЕМС» на высокочастотный ионный источник с индукционным ВЧ-разрядом.



Рис.3 ( $L_n=0,8$  мкГн)



Рис.4



Рис.5

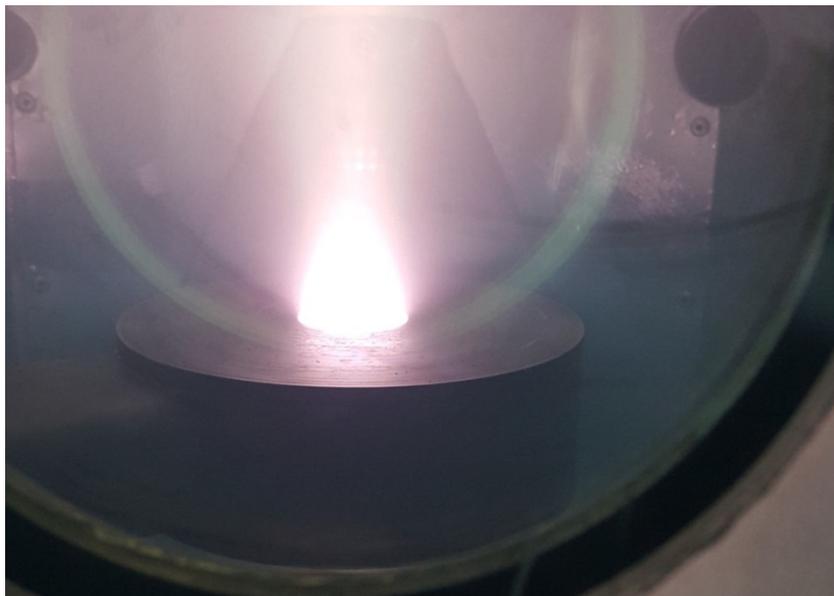


Рис.6

В 2018 году планируется освоить выпуск систем ВЧ-питания с выходной активной мощностью от 2 до 4 кВт.

Разработаны и производятся системы питания ВЧ-напряжением индукторов газоразрядных камер источников ионов с диаметром выходных электродов от 150 мм до 550 мм или индукторов технологических камер ВТО аналогичного типоразмера.

Отличительной особенностью этих систем питания является структура их построения, содержащая блок АС/DC-конвертора, питаемый от промышленной трехфазной сети и подключенный к его выходу через соединительные кабели ВЧ-инвертор непосредственно соединенный без какого-либо согласующего устройства к нагрузочному индуктору только через узел измерения ВЧ-сигнала. В блоке АС/DC-конвертора имеются модули управления и сопряжения сигналов, обеспечивающие стабилизацию и регулирование питающего ВЧ-инвертор DC-напряжения, выходной активной средней эффективной ВЧ-мощности и амплитуды ВЧ-напряжения на индукторе с погрешностью 2%. Структурно-функциональная схема приведена на рис.7.

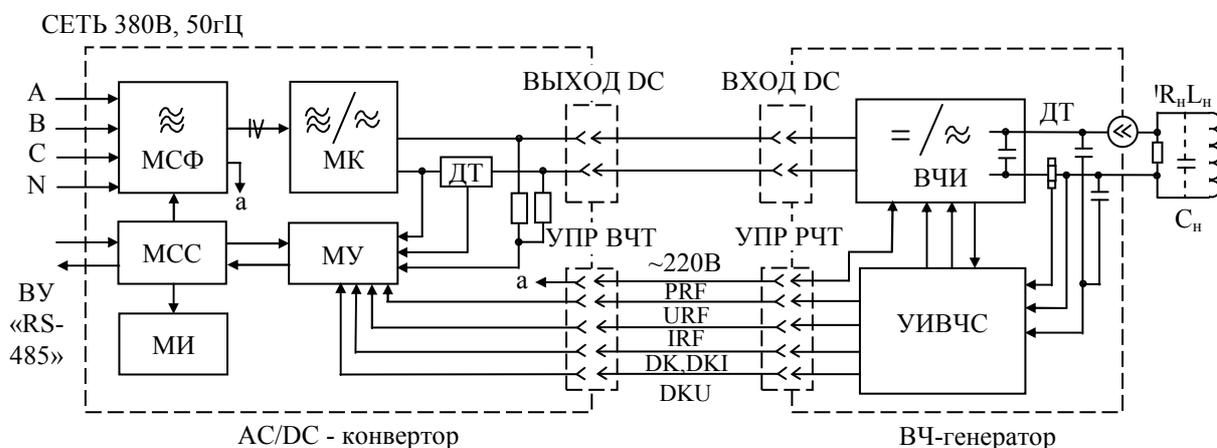


Рис.7

Кроме этого, ВЧ-инвертор, работающий в режиме «класса Е», имеет автогенераторную подстройку частоты на резонанс выходного нагрузочного контура, образованного индуктором и внутренней выходной емкостью ВЧ-инвертора. Естественно при этом нагрузочный индуктор, служащий для возбуждения и поддержания индукционного или индукционно-емкостного разряда в ГРК, является неотъемлемой частью ВЧ-инвертора. Эта особенность накладывает ряд требований при производстве (изготовлении) системы на требуемую частоту, так как при этом необходимо учитывать точные параметры нагрузочного индуктора. С другой стороны, это обеспечивает минимальные массо-габаритные показатели и наивысший КПД преобразования питающей DC-мощности в активную ВЧ-мощность, который при ее уровне в 3 кВт достигает 94÷96%. При этой мощности хватает принудительного воздушного охлаждения ВЧ-инвертора. Вес ВЧ-инвертора всего 3,5 кг, а габариты 135x135x360 мм. На рис.8 приведена фотография ВЧ-генератора на стенде с эквивалентом нагрузки.

Разработанные системы могут быть настроены на рабочую частоту в диапазоне от 0,8 МГц до 2 МГц, однако при необходимости предприятие может изготовить подобные системы на другой, требуемый диапазон частот.

Работа узла АПЧ заключается в том, что к началу следующего периода колебания ВЧ-напряжения в нагрузочном контуре включение и выключение силовых транзисторов ВЧ-инвертора производится так, чтобы обеспечить резонанс в контуре и соблюсти при этом режим работы «класса Е».



*Рис.8. ( $L_n=8$  мкГн,  $R_n=430$  Ом).*

Приведенные расчеты и испытания таких систем, к примеру, на частоте 1 МГц, показали, что при изменении активной ВЧ-мощности в нагрузочном индукторе от нуля до максимума показали незначительное, менее 3%, изменение рабочей частоты.

Резонансный режим работы ВЧ-инвертора с высокой добротностью нагрузочного контура обеспечивают довольно высокие реактивные ВЧ-мощности в нем. К примеру, на реально изготовленных системах она достигала 150 кВА, что обеспечивает стабильный и устойчивый индукционный ВЧ-разряд.

Аналогично, как и в системах питания ВЧ-напряжением с фиксированной частотой, AC/DC-конвертор имеет встроенный корректор коэффициента потребляемой по питающей сети мощности. А имеющаяся стабилизация по активной выходной ВЧ-мощности обеспечивает ее постоянство при изменении импеданса нагрузки, питающего сетевого напряжения, температуры. Работа узла АПЧ естественно исключает несогласованный режим работы, и фактические понятие «отраженной волны» здесь отсутствует. Также система имеет защиту ВЧ-инвертора по перегреву, перенапряжению, превышению коммутационных токов и

специально разработанную защиту выхода из режима «класса E». На рис.9 приведены осциллограммы напряжения и токов в нагрузочном индукторе и силовых транзисторах.



Рис.9

Система питания была разработана и испытана для питания ВЧИИ двух типоразмеров с индукторами 5 мкГн и 36 мкГн. Предприятие при необходимости может разработать и изготовить системы питания ВЧ-напряжением с плавающей частотой под разные конфигурации нагрузочного индуктора и на уровень выходной активной эффективной ВЧ-мощности от 100 Вт до 6 кВт.

На рис.10 показан внешний вид системы на 3 кВт с эквивалентом большого индуктора высокочастотного источника ионов.



Рис.10. ( $L_n=36\text{мкГн}$ ).