

## РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

## DEVELOPMENT OF SMALL-SIZED CAPACITORS FOR A MATCHING DEVICE OF A HIGH-FREQUENCY POWER SUPPLY

Я.Г.Рыбальченко, А.Д.Павленко, Д.Д.Васильев,  
К.М.Моисеев / yaroslav.rybalchenko@gmail.com

Ya.G. Rybalchenko, A.D. Pavlenko, D.D. Vasiliev, K.M. Moiseev,

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

*В данной статье описывается разработка малогабаритных конденсаторов, предназначенных для применения в согласующем устройстве высокочастотного блока питания системы плазменной обработки. Проводится оценка необходимых параметров конденсатора и описываются результаты испытаний опытного образца.*

*This article describes the development of small-sized capacitors intended for use in the matching device of a high-frequency power supply of a plasma processing system. The necessary parameters of the capacitor are evaluated and the test results of the prototype are described.*

Ключевые слова: *переменный конденсатор, вакуумный конденсатор, согласующее устройство, высокочастотный источник питания, плазма.*

Key words: *variable capacitor, vacuum capacitor, matching device, high-frequency power supply, plasma.*

### ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные (ВЧ) источники питания, генерирующие сигналы в диапазоне 3-30 МГц, на сегодняшний день применяются во многих отраслях науки и производства: они обеспечивают энергией радиоаппаратуру, различные виды установок распыления, источники ионов, лазерные системы, ускорители заряженных частиц и многое другое.

Одной из важных областей применения ВЧ-источников, являются малогабаритные установки плазменной обработки, предназначенные для проведения процессов активации и очистки поверхностей. Подобные системы позволяют добиться степеней чистоты, достижимых только жидкостной химической обработкой, но, при этом, не оставляют опасных для здоровья человека и окружающей среды продуктов выхода после окончания процесса обработки.

В системах плазменной обработки зачастую также используются низкочастотные (НЧ) (40 кГц) источники питания, однако высокочастотные (13,56 МГц) блоки обеспечивают характерную для подобных установок мощность в 200-350 Вт при значительно более низких показателях напряжения [1]. Для установок с ВЧ-источниками питания также характерна большая активность плазменных процессов: при одинаковых значениях мощности в ВЧ-системе может происходить травление материала, в то время как в НЧ-установке будет протекать только процесс плазменной очистки или активации.

Единственным существенным недостатком высокочастотных источников питания является необходимость согласования с нагрузкой при помощи специальных согласующих устройств (СУ) – данная проблема характерна не только для плазменных систем, но и для множества самых различных установок, использующих подобные источники. Согласующее устройство усложняет конструкцию системы питания, увеличивает стоимость установки и занимает лишнее место в ее корпусе, что негативно сказывается на габаритах и массе, особенно, в сравнении с аналогичными НЧ системами.

СУ предназначены для согласования выходного сопротивления генератора с волновым сопротивлением кабеля и импедансом нагрузки. Под согласованием понимается равенство импеданса нагрузки и волнового сопротивления кабеля выходному сопротивлению генератора [2]. При равенстве этих величин отраженная мощность стремится к нулю, а заданная ВЧ-источником мощность полностью расходуется в нагрузке. При отклонении импеданса нагрузки от выходного сопротивления генератора, поданная мощность частично рассеивается уже в выходной цепи генератора [3]. Существуют различные вариации конструкций СУ, однако, их основными элементами всегда являются реактивные сопротивления: катушки индуктивности и переменные конденсаторы, используемые для подстройки цепи под импеданс нагрузки, зависящий от параметров технологического процесса [4].

В СУ для ВЧ источников мощностью более 5 кВт, чаще всего используются вакуумные и воздушные конденсаторы переменной емкости. Первые, в сравнении с воздушными такой же емкости, имеют значительно меньшие габариты и вес, что, в свою очередь, позволяет уменьшить размеры и массу всего согласующего устройства. Однако, существенным недостатком вакуумных конденсаторов является их высокая стоимость, превышающая стоимость воздушных конденсаторов в десятки раз.

Разработка конденсаторов с меньшими габаритами и меньшей стоимостью, чем существующие на рынке варианты, на сегодняшний день является актуальной задачей: она позволит уменьшить размеры и снизить себестоимость СУ, сделав использующие их системы более доступными для конечных покупателей.

Целью данной работы является разработка малогабаритного конденсатора переменной емкости для согласующего устройства установки высокочастотной плазменной обработки. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: провести анализ СУ и их конденсаторов; определить необходимые параметры разрабатываемого конденсатора; разработать конструкцию конденсатора; провести испытания разработанного конденсатора.

## **1 АНАЛИЗ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ И КОНДЕНСАТОРОВ**

### **Анализ согласующих устройств**

Для определения требуемых параметров разрабатываемого конденсатора переменной емкости необходимо провести анализ характеристик существующих вариантов согласующих устройств ВЧ-источников питания мощностью до 5 кВт и оценить емкости применяемых в них конденсаторов.

Таблица 1.

Согласующие устройства ВЧ генераторов

Страна	Марка, компания	Мощность, кВт	Частота, МГц	Тип конденсаторов	Емкость, пФ (MAX)
США	Navigator II	1...5	0,4...60	Вакуумные	500
	Navio	1, 3, 5	13...60	Вакуумные	470
	СРМ-1000	0.6, 1, 1.25	2...40,48	Воздушные / Вакуумные	470
Р	ATS-3	0.3	1,7...40.68	Воздушные	300

Проведенный анализ СУ (табл. 1) показывает, что характерные для подобных установок значения максимальной емкости конденсаторов составляют порядка 470 – 500пФ.

#### **Анализ параметров вакуумных конденсаторов**

Для определения характерных габаритов вакуумных конденсаторов емкостью до 500 пФ, необходимо провести сравнение нескольких существующих на рынке моделей.

Таблица 2

Вакуумные конденсаторы переменной емкости.

Страна	Марка, модель	Предельный ток, А	Длина, мм	Диаметр, мм	Емкость, пФ (MAX)
США	Jennings, USL-500-3S-P	35	125	59	500
	Comet, CV05C-500XIH	57	150	55	500
	Jennings, USL-500-5S	40	127	60	500
	Jennings, UCS400-7.5	55	171	76	400
	Jennings, UCS500-7.5	50	228	76	500
	Jennings, UCS500-15S	60	228	76	500

Проведенный анализ габаритов вакуумных конденсаторов (табл. 2) показывает, что характерные для подобных устройств значения габаритов находятся в пределах 150 мм по длине и 60 мм по ширине.

Из анализа так же следует, что воздушные конденсаторы емкостью 400-500 пФ часто имеют избыточно высокие значения максимального тока – 35-60 Ампер, в то время как для малогабаритных систем плазменной обработки мощностью до 300 Ватт не требуется больше 15-20 Ампер: данный факт негативно влияет на цену конденсаторов, и, как следствие, на конечную стоимость установки.

## 2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРА

### 2.1 Определение требований к конденсатору

Согласно результатам проведенных анализа СУ, разрабатываемый конденсатор должен обеспечивать максимальное значение емкости не менее 470 пФ. Нижний предел емкости не столь важен, поэтому его значение целесообразно принять в диапазоне 0-100пФ.

Основой для конструкции следует принять стандартный плоский воздушный конденсатор: он прост изготовлении и позволит снизить конечную стоимость.

Из результатов анализа габаритов вакуумных конденсаторов следует, что габариты разрабатываемого конденсатора не должны превышать следующих значений: длина – 150 мм, ширина и высота – 60 мм.

В качестве диэлектрика целесообразно использование фторопластовой пленки Ф4: она проста в использовании, имеет небольшую стоимость и высокую относительную диэлектрическую проницаемость, равную 2.0. Помимо этого, применение Ф-4 упрощает обеспечение заданного расстояния между пластинами конденсатора, освобождая от необходимости их выравнивания.

### 2.2 Расчет емкости плоского переменного конденсатора

Расчет емкости проводится по формулам для конденсатора с плоскими пластинами, расчетная схема которого представлена на рис. 1.

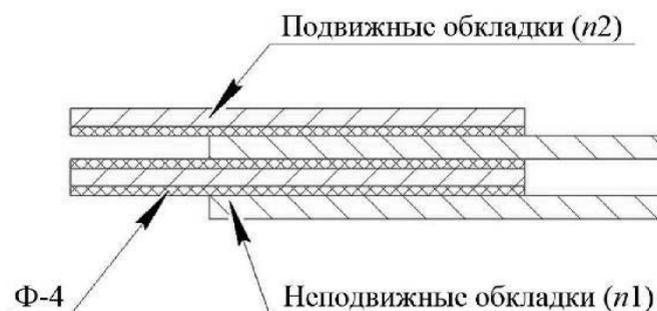


Рис. 1. Расчетная схема конденсатора.

Расчет емкости проводится по формуле [5]:

$$C = \frac{\varepsilon S(n-1)}{4\pi d} \cdot 1.11,$$

где  $C$  – емкость [пФ],  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества,  $n = n1 + n2$  – общее количество обкладок,  $S$  – площадь перекрытия обкладки [см<sup>2</sup>];  $d$  – расстояние между обкладками [см].

Взяты следующие параметры для расчета:

$$n = n1 + n2 = 4 + 3 = 7;$$

$$d = 0.01 \text{ см};$$

$$\varepsilon = 2.0;$$

Согласно расчетам, значение площади перекрытия пластин  $S$  для емкости конденсатора  $C = 90$  пФ составляет 84.5 мм<sup>2</sup>, для емкости  $C = 470$  пФ – 471,7 мм<sup>2</sup>. На основе расчета выбраны обкладки шириной 25 мм, длиной 33 мм и толщиной 1 мм.

Максимальная площадь перекрытия для выбранных обкладок равна составляет 825 мм<sup>2</sup>, минимальная – 125 мм<sup>2</sup>.

### 2.3 Конструкция конденсатора

Проектирование велось в среде Autodesk Inventor. Модель представлена на рис. 2, 3.

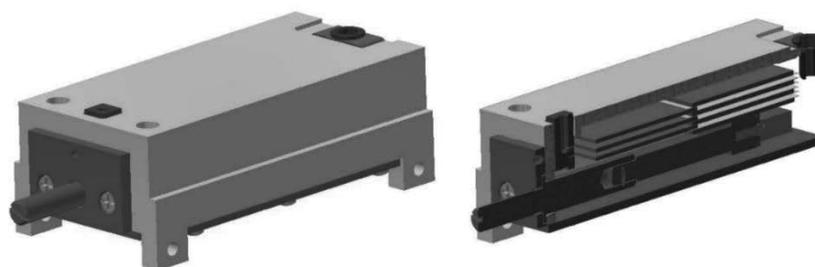


Рис. 2. Общий вид и разрез разработанного конденсатора.

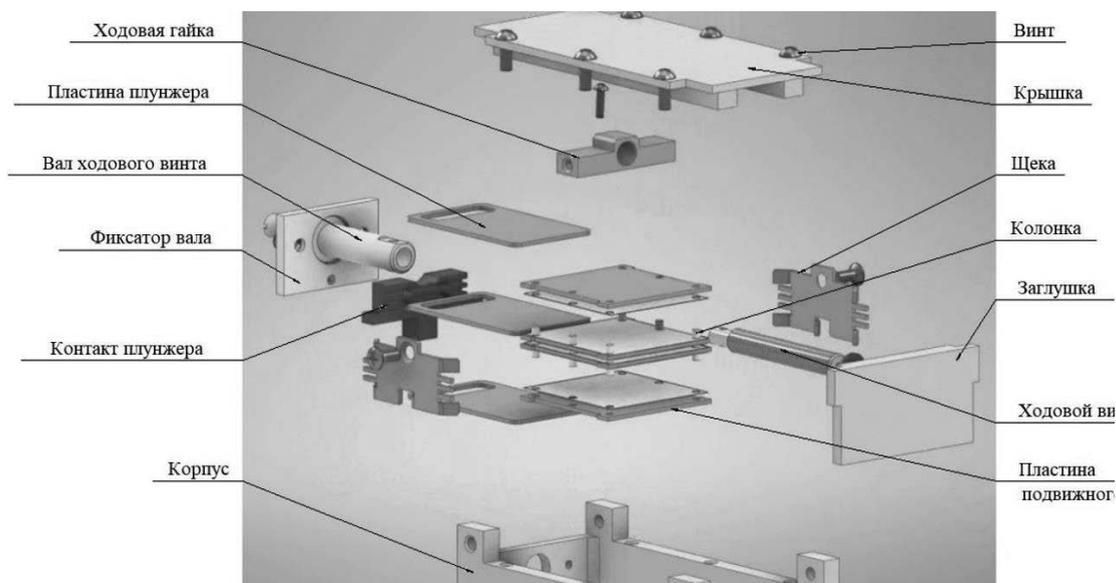


Рис. 3. Основные элементы разработанного конденсатора.

Контакты подводятся к элементам: «контакт плунжера» и «ходовая гайка». За счет вращения вала ходового винта подвижные пластины производят возвратно-поступательное движение посредством передачи винт-гайка.

Обкладки конденсатора, контакт плунжера, ходовая гайка и щека сделаны из латуни, корпусные элементы из полистирола, а вал ходового винта, фиксатор вала и диэлектрические прокладки между пластинами сделаны из фторопласта Ф-4.

Габариты, разработанного конденсатора следующие: длина – 93 мм, ширина – 46 мм, высота – 34 мм.

По разработанным рабочим чертежам, изготовлен опытный образец конденсатора и при помощи измерителя иммитанса LCR-800 проведены замеры емкости: диапазон емкости опытного образца составляет 62-476 пФ, что соответствует требуемому диапазону от 90 до 470 пФ.

### 3 ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

Созданный опытный образец конденсатора испытан на прототипе малогабаритной установки плазменной обработки, схема которого представлена на рис.4. В качестве генератора используется ВЧ источник питания Advanced Energy Cesar RF мощностью 300Вт.

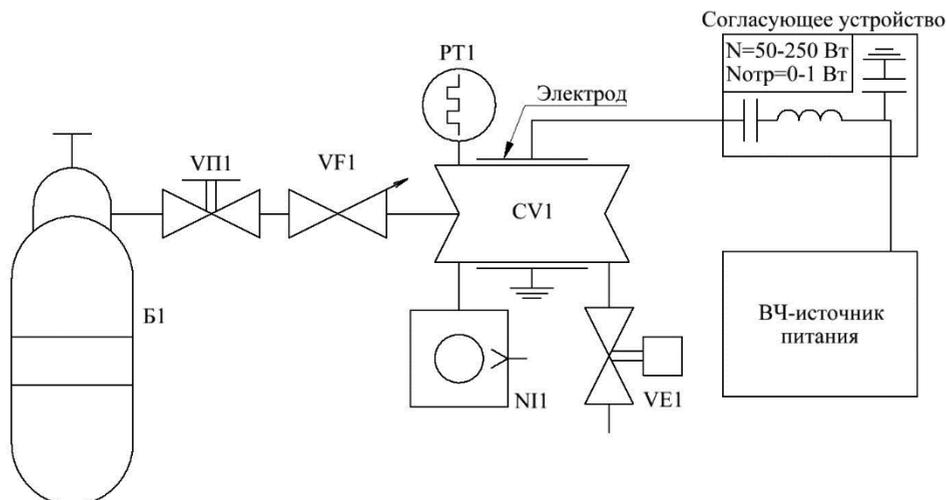


Рис. 4. Схема прототипа установки плазменной обработки и схема СУ: VF1 – РРГ, VE1 – электромагнитный клапан, VPI – механический клапан, CV1 – вакуумная камера, PT1 – термопарный датчик, Б1 – баллон с рабочим газом (Ar).

Изготовленный образец установлен вместо оригинального конденсатора на 250 пФ в ручное согласующее устройство, схема которого также представлена на рис. 4. Катушка, применяемая в данном СУ, имеет индуктивность 0,84 мкГн.

В результате проведенных испытаний определено, что разработанный конденсатор обеспечивает эффективное согласование импедансов ВЧ-источника и нагрузки электродов: во всем диапазоне рабочих мощностей (50 – 250 Вт) значение отраженной мощности держалось в рамках 0-1 Вт.

В ходе испытаний также проведен замер рабочих температур конденсатора и установлено, что значения температуры при максимальной мощности ВЧ источника в 250 Вт после 19 минут горения плазменного разряда не превышают 44,1°C. График зависимости температуры конденсатора от времени при мощности 250 Вт представлен на рис. 5.

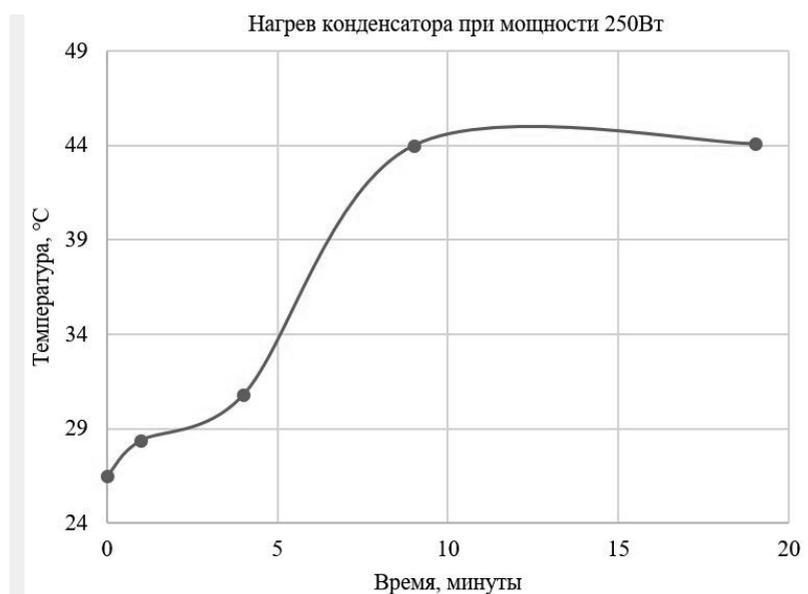


Рис. 5. График зависимости температуры конденсатора от времени при мощности 250 Вт.

## **ВЫВОДЫ**

Высокочастотные источники питания применяются во многих областях науки, техники и производства. Одним из главных недостатков систем с ВЧ источниками питания является необходимость согласования импедансов нагрузки и источника для уменьшения отраженной мощности. Для согласования импедансов служит согласующее устройство (СУ), состоящее из элементов с реактивными сопротивлениями – катушек и конденсаторов.

В согласующих устройствах для установок мощностью менее 5 кВт чаще всего используются переменные воздушные и вакуумные конденсаторы с максимальной емкостью в районе 470 пФ. Преимуществом вакуумных конденсаторов являются их существенно меньшие габариты и вес, недостатком – более высокая стоимость. Характерные размеры вакуумных конденсаторов составляют 150х60 мм.

Разработанная модель фторопластового конденсатора обеспечивает необходимый для согласования диапазон ёмкости в 62-476 пФ, а ее габариты не превышают характерные размеры вакуумных конденсаторов подобной емкости.

В ходе проведенных испытаний опытного образца фторопластового конденсатора определено, что СУ на его основе способно согласовывать импедансы ВЧ генератора и нагрузки в прототипе малогабаритной плазменной обработки для диапазона мощностей 50-250 Вт.

Испытания также выявили, что при длительной обработке более 19 минут, значения температуры в конденсаторе не поднимаются выше 44,1°С.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Рыбальченко Я.Г., Мухтаров К.С., Павленко А.Д., Васильев Д.Д. Влияние технологических параметров процесса плазменной обработки на мощность тлеющего разряда при использовании низкочастотного блока питания и внешнего расположения электродов // *Материалы XI Всероссийской конференции «Будущее машиностроения»*. Москва, 24-27 сентября 2019 г.

2. Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения // *Москва: Техносфера, 2018, 464 с.*

3. Морозов В.А., Михеев Г.М. Определение схемы замещения высокочастотного плазменного конденсатора // *Химическая физика и мезоскопия, 2019, №1, С 142-155.*

4. Ланин В.Л. Согласование высокочастотных генераторов с нагрузкой // *Технологии электронной промышленности, 2012, №6, С. 4-6.*

5. Расчет емкости конденсатора // *Школа для электрика: все об электротехнике и электронике URL: <http://electricalschool.info/ecalc/1297-raschet-emkosti-kondensatora.html> (дата обращения 01.03.2020).*