

Исследование рабочих характеристик магнетрона в произвольном электродинамическом реакторе

В.А. Иванов, К.В. Рогожин, И. Горленко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в работе представлена методика оперативного определения условий работы «печных» магнетронов, работающих на реактор, представляющий произвольную электродинамическую систему. Методика создана на основе комплексного использования векторных анализаторов цепей и компьютерных средств анализа, а также разработанных авторами специальных измерительных адаптеров [1,2]. Методика позволяет по форме анодного тока отслеживать мощность, отдаваемую магнетроном в реактор при изменении диэлектрических параметров обрабатываемого материала. Действенность методики проиллюстрирована на примере реальных технологических установках.

Ключевые слова: магнетрон, мощность, диэлектрические параметры, микроволновая обработка, электродинамическая система.

1. Введение

Микроволновые технологии поступательно внедряются в современные методы обработки материалов. При этом осваиваются области высоких температур, когда происходят существенные изменения диэлектрических параметров и соответственно изменяется мощность, отдаваемая магнетроном в рабочую камеру. Примерами такого рода систем являются установки микроволновой плавки металлов, газо-перегреватели до температуры 1300 С, микроволновые установки спекания керамики [3,4]. Для определения изменения мощности, отдаваемой магнетроном, предлагается проанализировать изменение формы анодного тока магнетрона в зависимости от рассогласования его с нагрузкой и выработать алгоритм расчёта актуальной мощности, идущей в нагрузку. Для реализации такого подхода авторами разработан специальный адаптер, позволяющий отследить текущее сопротивление нагрузки магнетрона [1]. Кроме того, используя методику [2] возможно определить интегральное изменение диэлектрических параметров обрабатываемого материала.

2. Экспериментальное исследование взаимосвязи уровня мощности, передаваемой в нагрузку и анодного тока магнетрона.

2.1. Для выработки алгоритма отслеживания актуальной выходной мощности магнетрона был создан специальный стенд, позволяющий изменять и измерять уровень согласования магнетрона с нагрузкой, фиксировать изменения анодного тока, отслеживать изменение температурного режима. Кроме того, результаты наблюдений обрабатывались специальной разработанной программой для определения интересующих значений мощности. В рамках описываемого исследования не анализировалось изменение частоты генерации магнетрона за счёт реактивности нагрузки, что ограничивает применение методики для уровней КСВ до 4...5.

Измерительный стенд рис. 1 состоит из следующих компонентов:

Источник питания магнетрона (БП). Представляет собой «трансформаторный» или «инверторный» блок питания. В его функции включены: оцифровка анодного тока магнетрона, контроль состояния «включено»/«выключено», передача полученных данных на ПК.

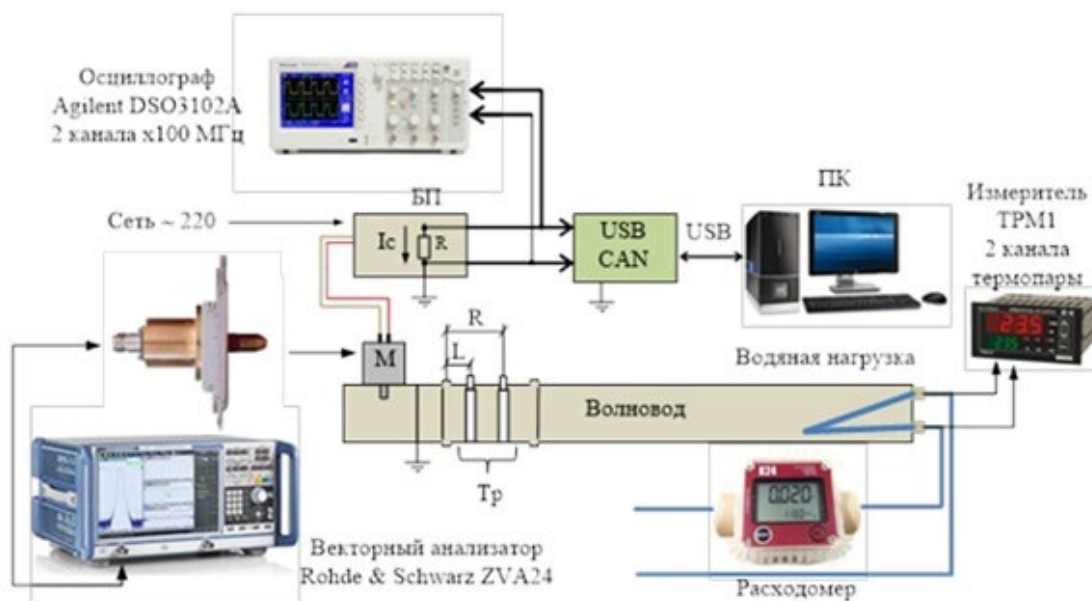


Рисунок 1. Схема измерительного стенда

Магнетрон (М), модель 2М214 – 21ГКН, расположенный на широкой стенке прямоугольного волновода 90х45мм. Для изменения уровня согласования в волновод встроен диэлектрический трансформатор (Тр), позволяющий регулировать согласование магнетрона с нагрузкой. Этот трансформатор выполнен на двух подвижных фторопластовых пластинах толщиной $\delta = \lambda_g / 4$, а в поперечном сечении перекрывающих сечение волновода. Пластины перемещаются вдоль волноводной, обеспечивая изменение уровня согласования магнетрона и нагрузки в диапазоне КСВ от 1,1 до 10. Указанные уровни согласования определяются в «холодном» режиме с помощью магнетронного адаптера [1] изменением положения пластин диэлектрического трансформатора Тр.

Водяная калориметрическая нагрузка с КСВ=1,1. В её состав входят два датчика температуры и ротаметр для калориметрического способа измерения мощности, отдаваемой магнетроном.

Векторный измеритель цепей (Rohde&Schwarz до 8 ГГц).

Персональный компьютер (ПК) для записи значений тока магнетрона и его визуализации с использованием специально разработанной программы и дальнейшей обработки данных.

Осциллограф (ОЦ) Agilent Technologies DSO3102A предназначен для визуализации тока магнетрона на осциллографе.

Петля связи с детекторным диодом VD и нагрузочным сопротивлением Rн для отображения формы импульса микроволновой мощности.

2.2. «Горячие» измерения на экспериментальном стенде.

На рис. 2 представлена иллюстрация взаимосвязи уровня согласования магнетрона и формы анодного тока. На форме анодного тока заметно характерное «седло», величина локальных максимумов и минимума которого зависит от КСВ. Такая форма анодного тока определена в первую очередь нелинейными свойствами трансформатора, работающего в режиме глубокого насыщения.

Важно подчеркнуть, что такое изменение характерно только для «трансформаторного» блока питания.

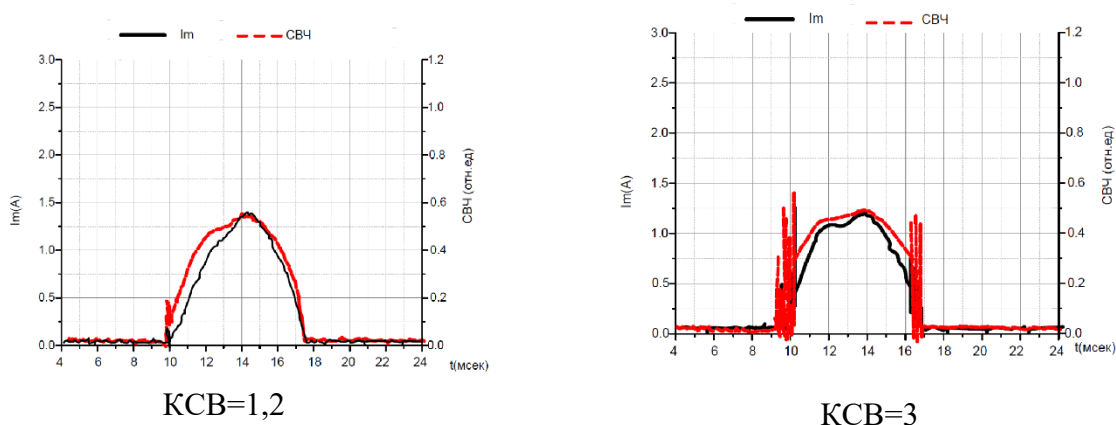


Рисунок 2. Изменение формы анодного тока и импульса мощности при изменении согласования при использовании «трансформаторного» блока питания.

Особенностью работы «инверторного» блока питания является его рабочая частота (20–40 кГц) преобразования входного напряжения в выходное. В таком блоке питания отсутствуют элементы, нелинейно ограничивающие ток магнетрона, что приводит к тому, что величина тока определяется только внутренним сопротивлением магнетрона. Исследования показали, что в случае использования инверторного блока питания такого изменения формы нет см. рис.3. При изменении KCB форма тока сохраняется, но изменяется его среднеквадратичное значение.

Детальный анализ зависимостей работы «трансформаторного» блока питания, представлен на рис.4 и рис.5. Эксперименты показали, что силовой трансформатор в схеме питания работает в режиме насыщения и ограничивает рост тока вторичной обмотки. Изменение тока в момент насыщения трансформатора определяется только уровнем KCB и поэтому на осциллограммах тока высоковольтного диода наблюдается изменение точки 2 (рис.4). В этот момент трансформатор находится в режиме насыщения рис.5 (красный/синий участок графиков). При ухудшении согласования ток начинает увеличиваться (рис.4, точка 2). С увеличением значения KCB потери мощности становятся больше и уровень тока в точке 2 (рис.4) растёт, что может служить критерием оценки ухудшения согласования и определения мощности, переданной в нагрузку. В оставшееся время рис.5 (зелёный участок графиков) будет происходить высвобождение накопившейся энергии цепей блока питания, тем самым определяя уровень точки 1 (рис.4).

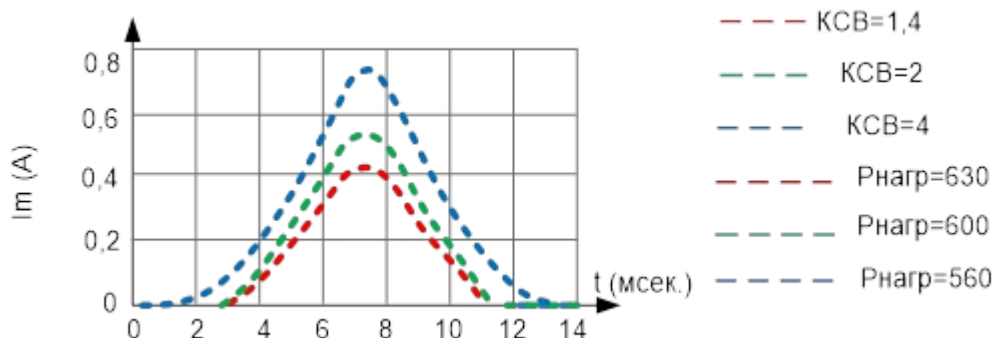


Рисунок 3. Изменение формы анодного тока при изменении уровня KCB для инверторного блока питания.

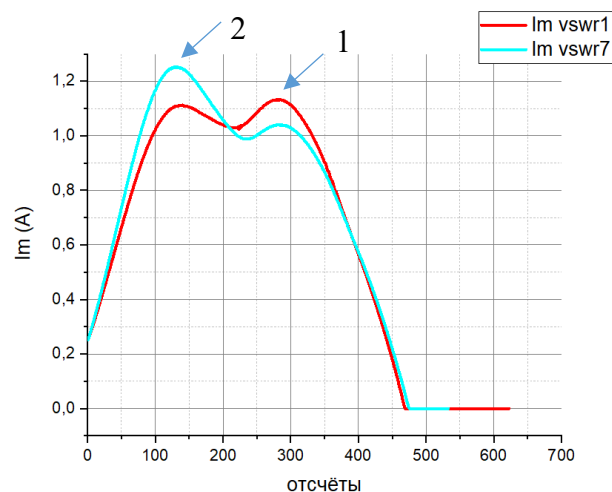
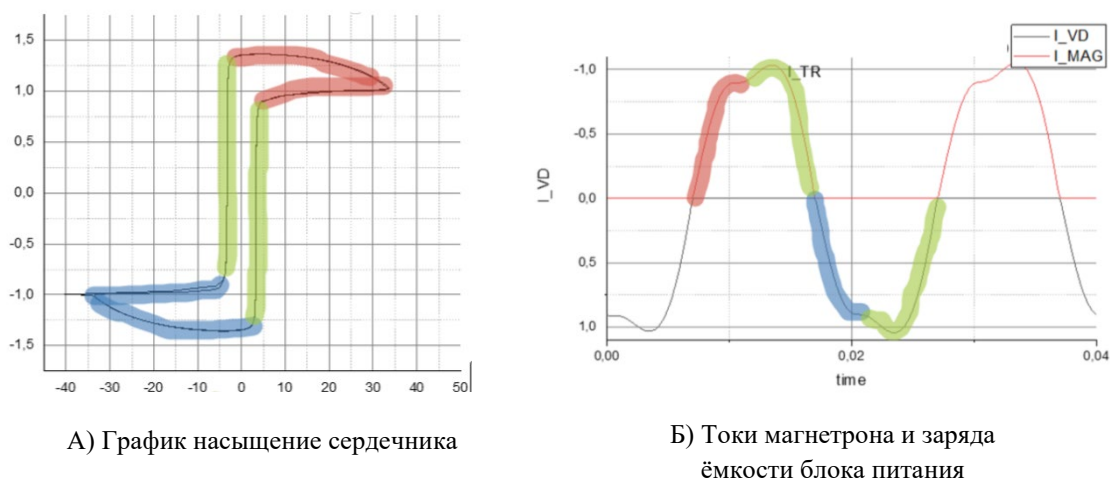


Рисунок 4. Изменение формы анодного тока и импульса мощности при изменении согласования



А) График насыщения сердечника

Б) Токи магнетрона и заряда ёмкости блока питания

Рисунок 5. Графики соответствия режимов работы трансформатора и токов в блоке питания магнетрона

В процессе исследований была разработана плата управления работой магнетрона. Плата позволяет проводить измерения уровня ключевых точек на форме тока «трансформаторного» блока питания, его температуры и передавать на управляющий персональный компьютер. Созданное соответствующее программное обеспечение позволило определять текущий уровень мощности, отдаваемой магнетроном. На рис. 6 представлен один из вариантов вывода информации. Рисунок соответствует переключению магнетрона с одного уровня согласования на другой в момент времени наблюдения 300с. Важно заметить, что выходная мощность изменяется практически мгновенно при изменении согласования, хотя происходят далее происходят изменения тока и температуры.

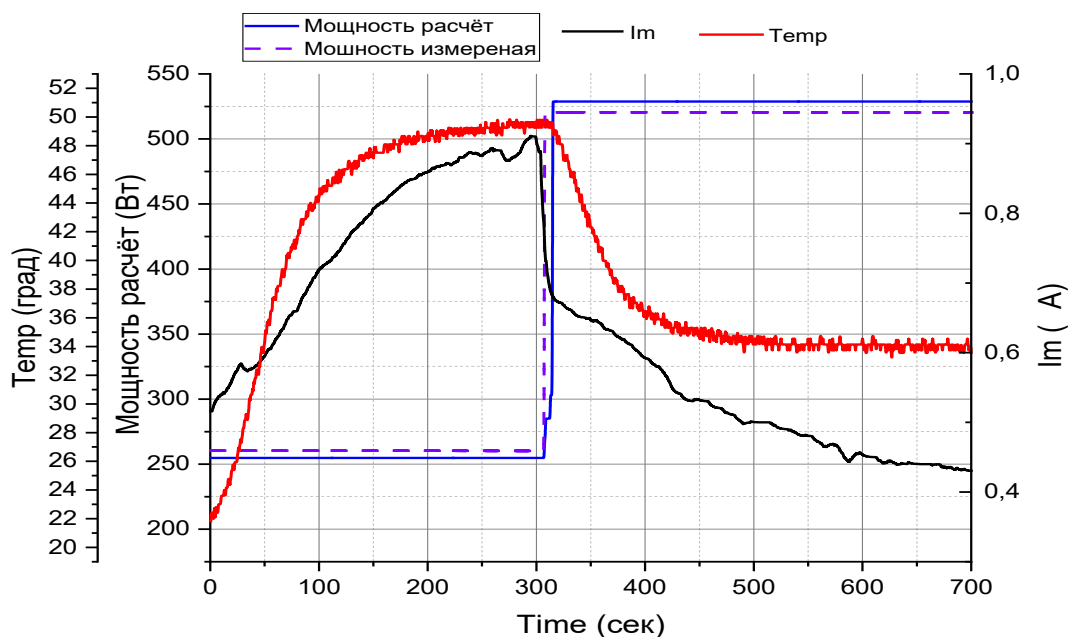


Рисунок 6. Скрин результатов анализа программы обработки результатов при изменении согласования в точке 300 сек

2.3. Результаты реализации

На основе полученных результатов были разработаны интерфейсная плата и типовой блок управления, которые представлены на рис.7. Эти элементы успешно прошли испытания в многогенераторных микроволновых установках, разработанных ООО ТСК.

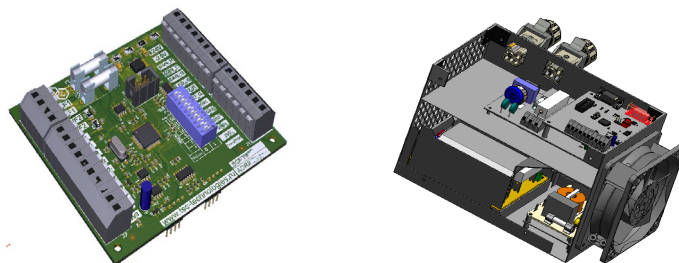


Рисунок 7. Плата управления и типовой блок питания магнетрона на 1кВт.

3. Заключение

Разработанная методика как её программная часть, так и разработанная интерфейсная плата управления были успешно внедрены в системы управления микроволновыми установками «Манго» и «Пароперегреватель ПП-24» производства ООО ТСК.

Список литературы

1. Иванов В.А., Шеримов Д., Токарев И.А., Рогожин К.В., Репин В.А. Определение сопротивления нагрузки магнетрона в произвольной электродинамической системе. <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/239-243.pdf>.
2. Иванов В.А., Токарев И.А., Шеримов Д., Репин В.А. Методика измерения диэлектрических свойств материалов на частоте 2.45 ГГц. <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2021/sbornik/papers/595-599.pdf>

3. Современная высокотемпературная и низковакуумная микроволновая печь для спекания. Китай.
https://ru.tmaxcn.com/state-of-the-art-high-temperature-low-vacuum-microwave-sintering-furnace-laboratory-system_p1447.html
4. Пат. РФ № 2735045 «Теплообменный элемент для установки в потоке газа, нагреваемого за счет энергии СВЧ-излучения, и устройство для СВЧ-нагрева газа», приоритет 10.03.2020;
<https://patents.google.com/patent/RU2735045C1/ru>
5. Иванов В. А., Рогожин К. В., Сидоренко Д. С. Исследование энергетической эффективности магнетронного генератора в устройствах микроволнового нагрева // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6.