

# Опыт разработки и эксплуатации микроволновых технологических установок

В.А. Иванов, К.В. Рогожин, Д.С. Сидоренко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в работе рассмотрены проблемы использования микроволновых технологий и осуществлённые авторами варианты их решения в ряде технологий по преодолению неоднородности нагрева, высокой стоимости кВт\*час микроволновой энергии. В основу решений положено компьютерное моделирование электродинамических и термодинамических характеристик процесса, измерение диэлектрических параметров используемых материалов, автоматизированное управление технологическим процессом и работой магнетронов. Предложена инновационная методика измерения параметров материалов, анализ актуального сопротивления нагрузки магнетрона в многогенераторных установках. Рассмотрен опыт реализации представленного подхода на примере установок: «Муссон», «Манго», «Родник», «ГазоПерегреватель» и др.

**Ключевые слова:** микроволновые технологии, магнетрон, диэлектрические параметры, микроволновые реакторы, электродинамическая системы, компьютерное моделирование.

## 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 согласование магнетронов с технологическим реактором. Примерами такого рода систем являются установки микроволновой плавки металлов, газоперегреватели до температуры 1300°C, микроволновые установки спекания керамики [1]. 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 [5]. Кроме того, используя методику [2] возможно определить интегральное изменение диэлектрических параметров обрабатываемого материала.

## 1. Проблемы использования микроволновой энергии

Хорошо известны преимущества применения микроволновой энергии для различных технологических процессов. Это высокий КПД преобразования микроволновой энергии в тепловую, большая глубина проникновения энергии в множество материалов, т.н. объёмный нагрев, возможность создания компактных технологических реакторов. Примером использования этих преимуществ служит бытовая микроволновая печь с мощностью 0,5..1кВт, без которой сложно представить повседневную жизнь современного человека и сферы общественного питания. Стоимость 1кВт\*час энергии составляет порядка 300...500\$. Однако, при проецировании указанных преимуществ на технологические установки средней и большой мощности этот показатель по зарубежным источникам составляет уже 1500...2500\$. Это связано как с большой стоимостью мощных источников – магнетронов, их высоковольтных блоков питания, сопутствующих элементов (циркуляторы, балластные нагрузки, системы управления, специальные реакторы). В

настоящее время в использовании микроволновой энергии в технологическом процессе ищется компромисс между получаемыми преимуществами и стоимостью. Такой компромисс находится при использовании дешёвых «бытовых» магнетронов и суммированием их мощности в многогенераторных схемах, применением автоматизированных систем их управления [1], в повышении точности определения параметров обрабатываемых материалов, в разработке методов текущего контроля согласования магнетрона с реактором. В докладе рассматриваются эти подходы на примере разработанных и эксплуатируемых микроволновых установок с мощностью от 2 до 100кВт.

## 2. Применение современных программных сред для анализа работы магнетрона (CST) и термодинамических характеристик процесса (COMSOL)

Разработка микроволновых технологических установок основывается на применении современных программ анализа и оптимизации электродинамических систем, технологических процессов, а также программ конструирования и механического изготовления устройств. В данной работе для анализа ЭДС использовались программы AWR, CST. Для оптимизации термодинамических параметров техпроцессов с учётом электродинамики реакторов использовался пакет COMSOL. При конструировании механики пакет Solid Works и Компас. На рис. 1 показаны сетки разбиения ЭДС реактора для перегрева газов.

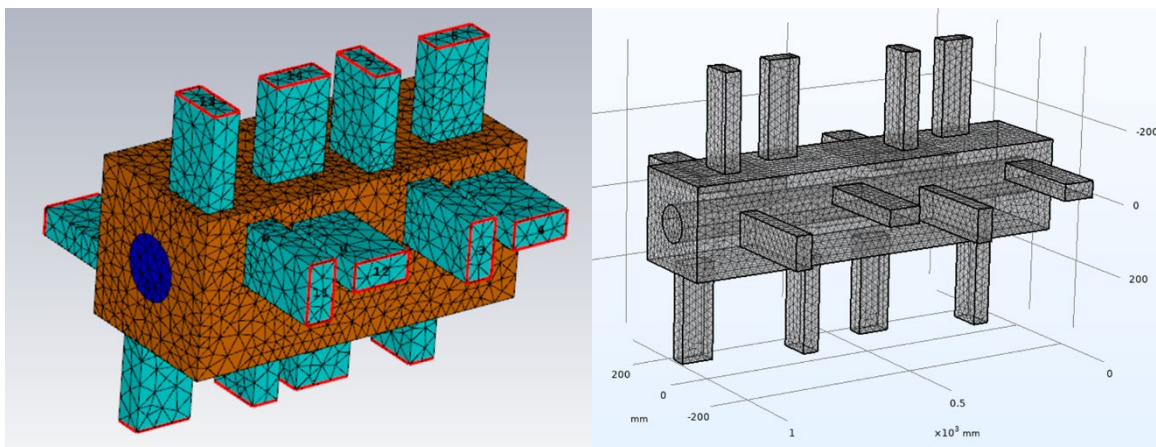


Рис.1. Структуры сеточного разбиения в программах CST и COMSOL

На первом этапе проводилось сравнение результатов моделирования по двум указанным программам. Установлено, что расхождения в структуре полей и внешних характеристик в широком диапазоне изменений не установлено. Однако, дружественный и «физичный» интерфейс CST обусловил использование этого пакета для оптимизации именно электродинамических характеристик реакторов.

## 3. Методика определения параметров обрабатываемых материалов

Основой для разработанной методики измерения диэлектрических параметров материалов [2] различного агрегатного состояния, формы служит волноводный метод измерения. Выбор этого метода связан с возможностью измерения различных видов материалов (с малыми и с большими потерями) и с возможностью проведения измерений в широком частотном диапазоне. В данной работе исследования проводились в ISM диапазоне на частотах вблизи 2.45 ГГц.

Основное отличие предлагаемого подхода от похожей методики [3,4] заключается в отсутствии необходимости использования 2-го порта. Отражение волны от

короткозамкнутого конца волновода обеспечивает «внутренний» естественный порт, который влияет на итоговую величину  $S_{11}$ .

Сущность методики:

- Калибровка векторного анализатора цепей (ВАЦ) в плоскости подключения Коаксиально Волноводного Перехода (КВП).
- Создание 3D модели измерительного тракта и ее верификация с помощью сравнения рассчитанных в CST и измеренных с помощью ВАЦ параметров  $S_{11}$  в полосе частот на пустой камере.
- Точное измерение формы и соответствующих размеров исследуемого образца (или формы емкости для жидких продуктов). Установка образца в измерительную камеру.
- Измерение  $S_{11}$  с исследуемым образцом в плоскости калибровки ВАЦ.
- Верификация параметров  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  в программе CST для получения соответствия S-параметров 3D модели и измеренных данных.

На рис.2 представлена картина распределения плотности удельных потерь в некотором экспериментальном образце, а на рис 3 сравнение измеренных и рассчитанных данных на диаграмме Смита для верифицированных параметров  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ . Такая же методика применялась при работе с металлическим порошком барита кобальта при отладке технологии плавления этого материала с помощью микроволновой энергии. При этом учитывались не только диэлектрические, но и магнитные свойства материала.

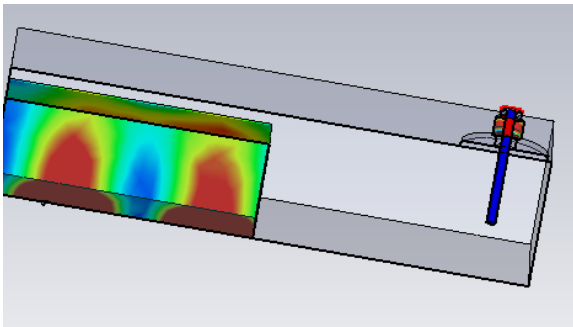


Рис. 2. Распределение удельных потерь мощности в исследуемом образце CST

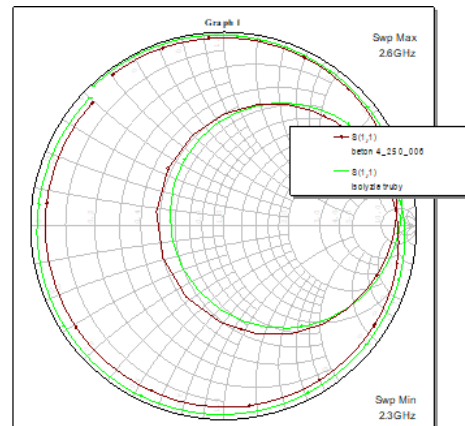


Рис. 3. Сравнение измеренных и рассчитанных значений  $S_{11}$  (AWR)

#### 4. Анализ условий работы магнетрона в актуальной электродинамической системе

В наших разработках [5] представлен метод определения вносимого сопротивления на основе конструкционных размеров антенны магнетрона и тестового адаптера [6], специфицированного фирмой производителем магнетрона. Решение поставленной задачи иллюстрируется на примере магнетрона 2M214 фирмы Samsung. Сочетание компьютерных методов электродинамического моделирования (CST), данных измерений на векторном анализаторе, программы анализа и оптимизации микроволновых цепей (AWR) с использованием данных конструктивного исполнения фирмой изготовителем тестового адаптера магнетрона – создана специальная измерительная оснастка – магнетронный зонд рис. 4. Он представляет КВП переход, помещаемый на место включения магнетрона в технологический реактор или волновод. Антенна зонда (нижняя часть зонда) – копия антенны магнетрона. Верхняя часть трансформатор сопротивлений, рассчитанный из условия получения

сопротивления 50 Ом на рабочей частоте при работе в тестовом адаптере Изготовителя рис.5. Актуальность такого зонда подтверждается работами в международных журналах по микроволновой электронике [7].

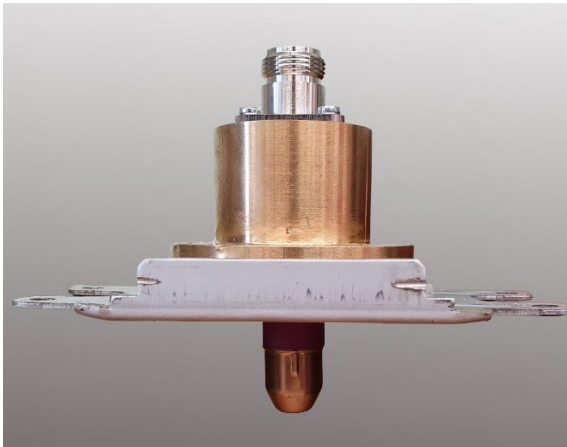


Рис. 4. Конструкция разработанного магнетронного зонда.

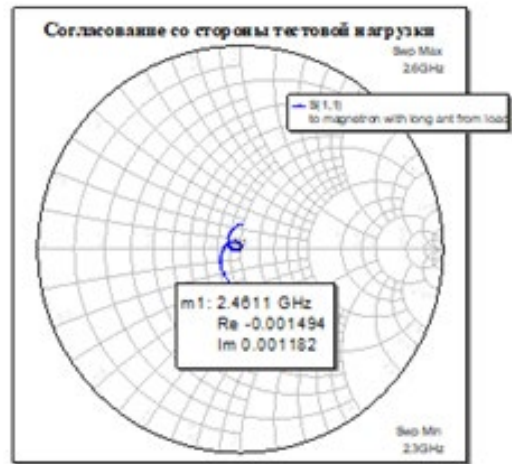


Рис. 5. Согласование в полосе в тестовом адаптере.

С помощью такого магнетронного зонда можно проводить исследования работы магнетрона на рассогласованную нагрузку. На кафедре МВЭ студенты проводят такие измерения на установке, схема которой показана на рис. 6. Изменение нагрузки осуществляется с помощью диэлектрического трансформатора, пластины которого помещены в волновод.

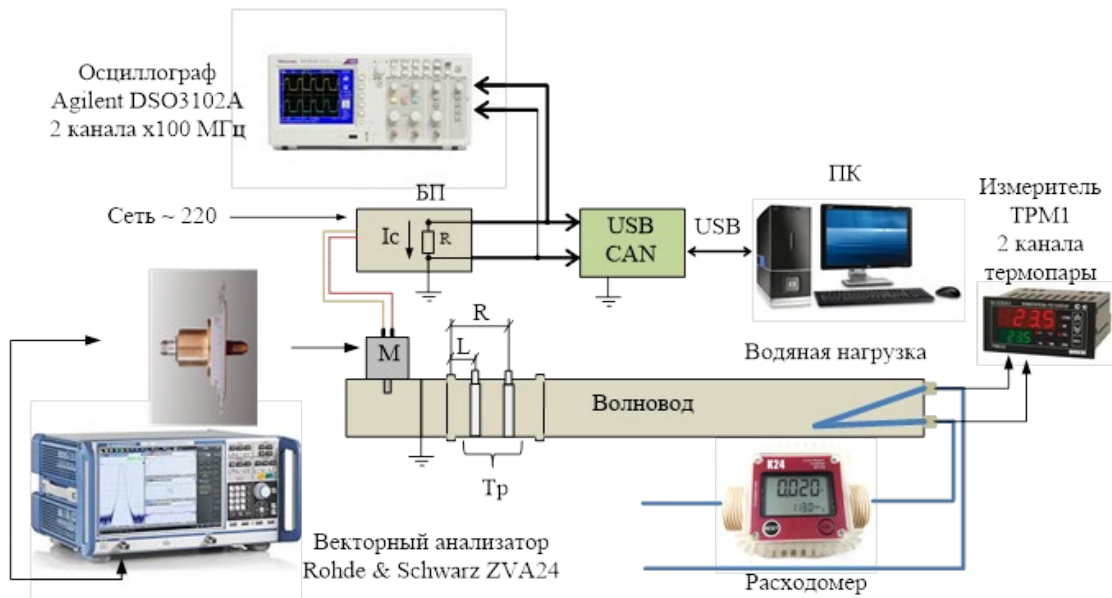


Рис. 6. Стенд для измерения параметров магнетрона при рассогласовании с нагрузкой.

Использование таких зондов в многогенераторных технологических установках позволяет смотреть согласование магнетронов с нагрузкой, а установка двух таких зондов – позволяет оценить уровень развязки между генераторами. При этом, такую процедуру можно осуществить не только в «холодном» режиме, но в реальном технологическом процессе. В качестве иллюстрации на рис. 7 представлена картина согласования в рабочей полосе при различной температуре материала в реакторе

200°C, 400°C, 800°C. Нагрев осуществлялся другими 15-ью магнетронами.

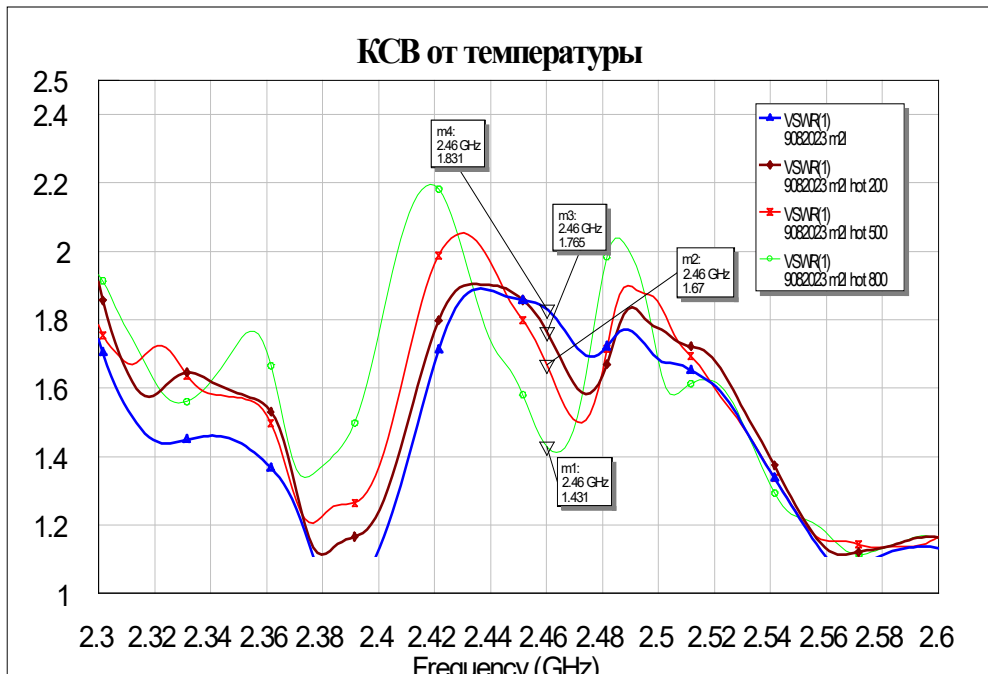


Рис. 7. Согласование магнетрона при разной температуре материала в реакторе.

## 5. Примеры реализации предлагаемого подхода при разработке многогенераторных микроволновых установок

Исторически первой установкой была установка микроволновой вакуумной сушки. В период конверсии Народного хозяйства СССР в содружестве с предприятиями ВПК были созданы 2 опытных образца, получен патент. Далее, патент и установка были выкуплены коммерческой организацией и развитие этого направления на кафедре происходило на договорной основе с фирмой производителем. На рис. 8 представлен внешний вид сдвоенной установки с 8-ю магнетронами. К настоящему времени выпущено порядка 200 таких установок в РФ, странах бывшего Союза, в ЮАР, Перу. Усовершенствованная конструкция установки на современных комплектующих называется «Манго», сертифицирована в ЕС, показана на рис. 9.

Хорошие эксплуатационные параметры по деконтаминации сухих растительных продуктов и лекарственных трав имеет установка «Родник» с 14 магнетронами с мощность по 1 кВт рис. 10. В установке реализован принцип быстрого микроволнового нагрева и резкого вакуумного охлаждения в радиопрозрачной и паропроницаемой упаковочной таре (к примеру – крафт мешки). Уменьшение бак обсеменённости для разных контаменантов от 100 10000 раз. рис. 11



Рис. 8. Установка «Муссон»



Рис. 9. Установка «Манго»



Рис. 10. Установка «Родник»

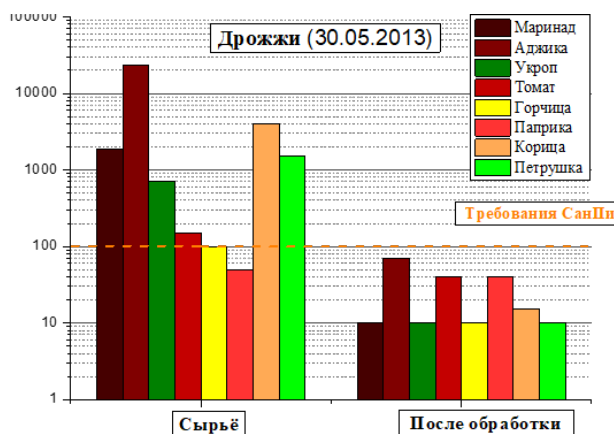


Рис. 11. Результаты деконтаминации на «Роднике»

Одна из последних разработок кафедры - микроволновый высокотемпературный перегреватель водяного пара и газов ГП-16 рис. 12 и 13. В основе работы лежит применение пористой SiC керамики для нагрева потока газов [8]. Параметры нагрева, достигнутые к настоящему времени  $T_{\max} 1000^{\circ}\text{C}$  для потока насыщенного пара  $100^{\circ}\text{C}$  25 кг в час. Используется 16 магнетронов по 1 кВт. Схема возбуждения показана на рис.1. При разработке этой установки использовались научные и инженерные наработки, представленные выше.

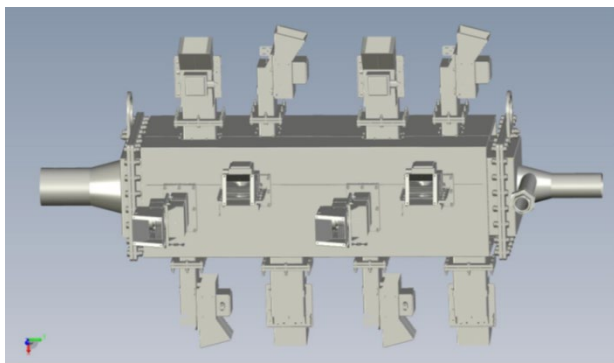


Рис. 12. 3D модель ГП-16



Рис. 13. Фото работающей установки ГП-16

## Заключение

В результате многолетней работы по исследованию работы магнетронов средней мощности на кафедре выработана инженерная методика и измерительная оснастка для создания микроволновых технологических установок для широкого круга применений. Разработаны универсальные блоки питания, интерфейсные платы управления работой магнетронов. Системы управления магнетронами и в целом технологическим процессом основаны на применении современных микропроцессоров и сенсорных экранов.

### Список литературы

1. Иванов В. А., Рогожин К. В., Сидоренко Д. С. Исследование энергетической эффективности магнетронного генератора в устройствах микроволнового нагрева // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6.
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. Алексеенков В. И. и др. Определение параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ на основе экспериментальных данных и параметрической оптимизации // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – №. 1. – С. 164-168.
4. Chen L.F. Microwave electronics. Measurements and materials characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan — John Wiley/
5. 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>
6. LG, Customer's Acceptance Specification, Magnetron 2M214.
7. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/853105/LG/2M214-21GKH/1>
8. Vladimir Bilik, Online measurement of magnetron Rieke reflection coefficient. AMPERE Newsletter Issue 94, December 18, 2017, pp. 4-10. [www.AmpereEurope.org](http://www.AmpereEurope.org)
9. 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>