

# Определение сопротивления нагрузки магнетрона в произвольной электродинамической системе

В.А. Иванов<sup>1,2</sup>, Д. Шеримов<sup>1,2</sup>, И.А. Токарев<sup>2</sup>, К.В. Рогожин<sup>1</sup>, В.А. Репин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>ООО «Технологические Системы и Комплексы»

**Аннотация:** Данное исследование направлено на разработку специального измерительного зонда, позволяющего определить сопротивление нагрузки магнетрона. В данной работе используется сочетание компьютерных методов электродинамического моделирования (CST Studio Suite), экспериментальных данных измерений на векторном анализаторе (ZBV8 Rhode&Schwarz) и программ анализа и оптимизации микроволновых цепей (AWR MICROWAVE OFFICE). Представлена конструкция зонда и методика его использования при конструировании микроволновых технологических установок.

**Ключевые слова:** магнетрон, векторный анализатор, СВЧ, резонатор, произвольный реактор, измерительный зонд

## 1. Введение

Электромагнитная энергия от магнетрона в микроволновый реактор передается с помощью антенны, которая помещается в реактор. Согласование генератора (магнетрона) и нагрузки обеспечивает максимальный КПД этой передачи. При этом магнетрон с внутренним эквивалентным сопротивлением  $R_{mag}$  должен быть нагружен на внешнюю цепь  $R_{in\ opt} = R_{mag}$ . Вне резонанса вносимые реактивные составляющие компенсируются соответствующей расстройкой электродинамической системы (ЭДС), обеспечивая выполнение фазового условия генерации. Вносимое сопротивление  $R_{in}$  определяется конструкцией антенны магнетрона, граничными условиями в области ее расположения, трансформирующими свойствами конструктивных элементов магнетрона.

Данное исследование направлено на разработку метода определения вносимого сопротивления на основе конструктивных размеров антенны магнетрона и тестового адаптера, специфицированного фирмой производителем. Решение поставленной задачи иллюстрируется на примере магнетрона 2M214 фирмы Samsung, [1].

В данной работе используется сочетание компьютерных методов электродинамического моделирования (CST Studio Suite), данных измерений на векторном анализаторе (ZBV8 Rohde&Schwarz) и программ анализа и оптимизации микроволновых цепей (AWR MICROWAVE OFFICE).

## 2. Анализ конструкции

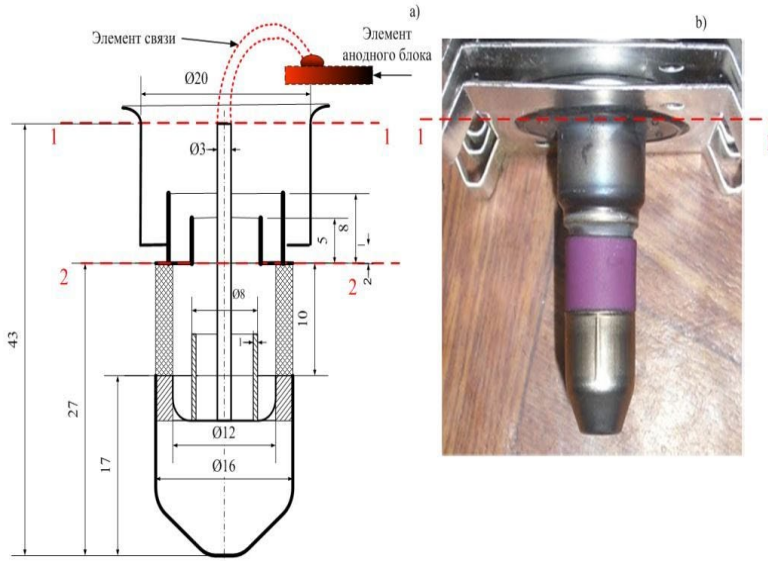
Эскиз антенны исследуемого магнетрона показан на рис. 1а, а фото выходной системы магнетрона на рис. 1б. Собственно антенной будем называть часть выходной системы, помещаемой в волновод или иную ЭДС по плоскости 2-2. Эта часть включает в себя керамический цилиндр и металлический колпак. Далее идут элементы микроволнового тракта, соединяющего антенну с телом магнетрона по плоскости 1-1. Пунктиром на рисунке показан кондуктивный элемент связи, соединяющий центральный проводник микроволнового тракта с анодным блоком магнетрона.

Для корректного использования понятия «сопротивление» будет использоваться плоскость 1-1. Здесь микроволновый тракт представляет собой коаксиальную линию с некоторым волновым сопротивлением  $Z_{0mtr}$ .

Следует отметить, что использование понятия «сопротивление» возможно только

на участках передающей линии от антенны до магнетрона, где тракт можно считать отрезком одномодовой регулярной линии.

В плоскости 1-1 можно применять (рассчитывать или измерять) коэффициент отражения, входное сопротивление и т.п. Встраивание антенны магнетрона в различные технологические реакторы (или адаптеры) будет обеспечивать в плоскости 1-1 различные входные сопротивления. Для того чтобы узнать, насколько получаемые сопротивления оптимальны для магнетрона с точки зрения отбора от него максимальной мощности, необходимо сравнить эти сопротивления в плоскости 1-1 с «эталонным сопротивлением», которое обеспечивается при установке магнетрона в «тестовый адаптер». Форма и размеры такого оптимального адаптера (DS адаптер) указаны производителем магнетрона в эксплуатационной документации [1]. На таком адаптере опытным путем за счет изменения размеров нерегулярного волновода достигается максимальная генерируемая магнетроном мощность при согласованной нагрузке в регулярной части волновода. Зависимость генерируемой мощности и частоты от рассогласования волновода представляют в виде диаграммы Рике. Коэффициент отражения на указанной диаграмме рассчитывается и приводится к осевой плоскости расположения антенны [2, 3] в адаптере. В



**Рисунок 1.** Антенны с соединительным трактом типового магнетрона, работающего на частоте 2450 МГц: а) эскиз ; б) фото антенны

данной работе предложена методика измерения и расчета вносимого в магнетрон сопротивления при произвольном реакторе, на который установлен магнетрон.

### 3. Анализ сопротивления нагрузки магнетрона

Определим входное сопротивление антенны магнетрона в ранее упомянутой плоскости 1-1, где отрезок регулярной линии переходит в элемент связи в виде кондуктивной петли. Для этого используем эквивалентное представление элемента связи и резонансного контура магнетрона, как это представлено в [4] и на рис. 3. ЭДС магнетрона представлена колебательным контуром с эквивалентным сопротивлением  $R_{gen}$ . Сопротивление  $X_{св}$  учитывает трансформирующие свойства кондуктивного элемента связи. Правая часть, относительно плоскости 1-1, соответствует эквивалентному входному сопротивлению  $Z_{load}$  антенного тракта, помещенного в адаптер или произвольный реактор.

Определение численных значений элементов проведем по следующему алгоритму:

- Сопротивление  $Z_{load}$  и матрица рассеяния антенны с тестовым адаптером  $|S|_{DS}$  рассчитывается с помощью программы электромагнитного моделирования (CST Studio Suite).
- На резонансной частоте параллельное соединение  $C_0$  и  $L_0$  представляет

собой бесконечное сопротивление, которое не влияет на режим работы схемы.

- Неизвестные элементы  $R_{gen}$  и  $X_{св}$  определим, используя параметрическую оптимизацию. Целевая функция оптимизации - достижение идеального согласования со стороны тестового адаптера. Если использовать найденные значения  $R_{gen}$   $X_{св}$ , и входное сопротивление магнетрона рассматривать как внутреннее сопротивление генератора, то в соответствии с принципом взаимности для цепей без потерь, получим режим согласования со стороны магнетрона. Это условие соответствует передаче максимальной мощности от магнетрона в нагрузку  $Z_{load}$ , а значит и тестового адаптера.

Рассчитаем коэффициент отражения  $Z_{load}$  в плоскости 1-1, используя программу

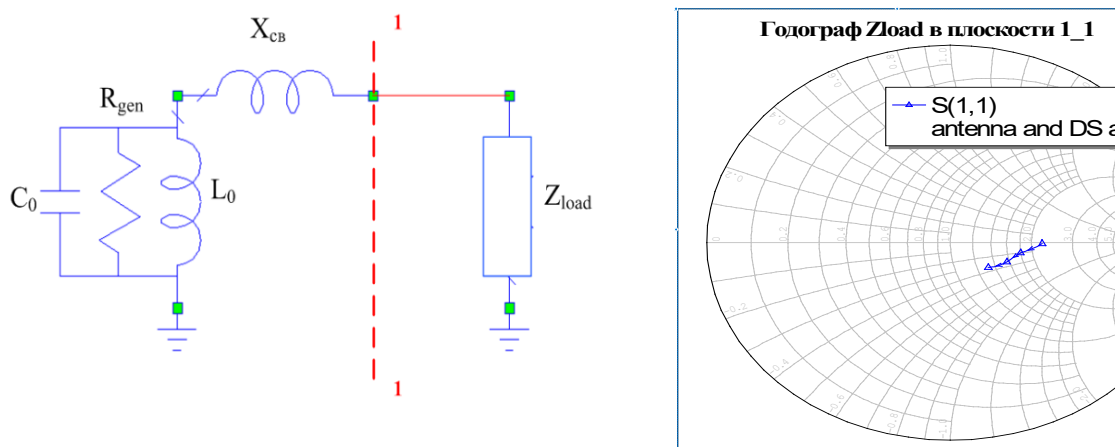


Рисунок 2. Эквивалентная схема связи ЭДС магнетрона с нагрузкой

CST Studio Suite. Порт 1 находится в плоскости 1-1, порт 2 в торце волновода. Волновой импеданс портов, согласно расчету, равен 113 Ом и 443 Ом. Размеры антенны и тестового DS адаптера, взяты из технической документации производителя.

Годограф искомого коэффициента отражения в плоскости 1-1 для входной линии с волновым сопротивлением 113 Ом и нагрузкой 443 Ом (согласованной) на порту 2 показан на рис. 3. Расчеты проводились с использованием матрицы рассеяния полученной в CST Studio Suite.

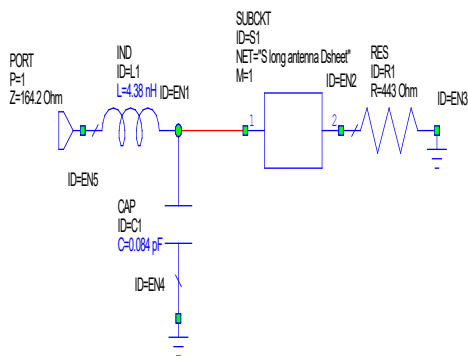
Используя полученные результаты, в программе AWR MICROWAVE OFFICE проводилась параметрическая оптимизация с варьированием  $R_{gen}$  и  $X_{св}$  для получения согласования на центральной частоте 2460 МГц. В результате было получено КСВ менее 1.1 на рабочей частоте. В результате на центральной частоте получено практически идеальное согласование (критическая связь ЭДС магнетрона и подводящей линии).

Верификация элементов эквивалентной схемы позволила установить искомое эквивалентное сопротивление 164.2 Ом, индуктивность элемента связи 4.38 нГ. Исходя из анализа конструкции магнетрона, было предложено учесть емкость элемента связи 0,084 пФ. Эта емкость незначительно, но улучшает согласование. Полученные значения КСВ 1..1,03 в рабочей полосе магнетрона свидетельствуют о достаточно точном определении параметров эквивалентной схемы.

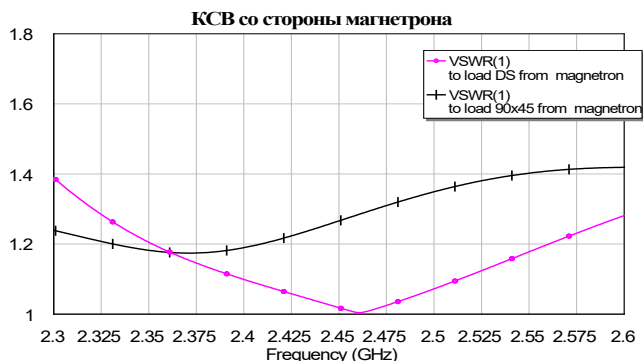
Как и следовало ожидать, для найденных значений параметров эквивалентной схемы со стороны ЭДС магнетрона также наблюдается согласование, что свидетельствует об оптимальном сопротивлении нагрузки.

Таким образом, найденные параметры эквивалентной схемы соответствуют согласованному режиму работы магнетрона при установке его антенны в тестовый

адаптер.



**Рисунок 4.** Эквивалентная схема при анализе КСВ со стороны магнетрона.

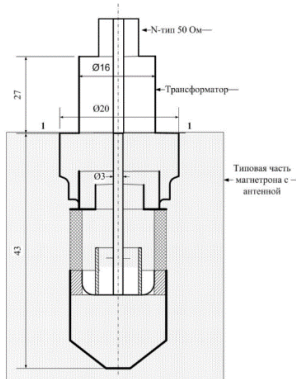


**Рисунок 5.** Сравнение согласования в тестовом (DS) адаптере и адаптере на волноводе 90x45.

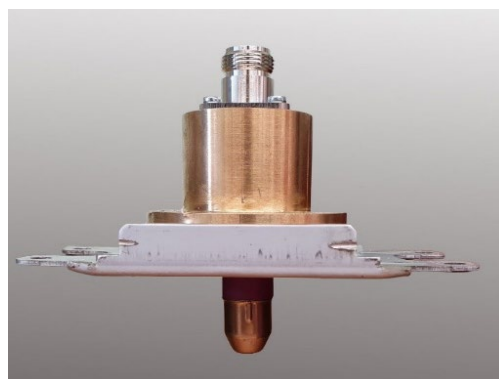
Проанализируем, как изменится сопротивление нагрузки магнетрона на «стандартном» волноводе 90x45мм. Коротко замыкающая пластина располагается на расстоянии 18 мм от оси антенны. Получаемый в этом КСВ 1,2...1,4 несколько превышает значения, полученные на тестовом адаптере.

### 3. Анализ сопротивления нагрузки магнетрона с использованием «магнетронного» зонда.

В практической работе с магнетронными генераторами есть необходимость в методике определения согласования магнетрона в произвольном реакторе. Подходом к разработке такой методики является использование измерительного («магнетронного») зонда, у которого антенна копирует антенную часть магнетрона. Другая часть представляет собой трансформатор сопротивлений с известными свойствами. Этот трансформатор преобразовывает сопротивление в плоскости 1-1 в типовое сопротивление стандартного тракта, подключаемого к векторному анализатору цепей. Свойства трансформатора выбираются так, чтобы на рабочей частоте магнетрона обеспечивалось активное входное сопротивление равное волновому сопротивлению измерительного тракта при оптимальном сопротивлении в плоскости 1-1 (см. рис. 1). Требуемое преобразование сопротивлений выполняет дополнительный отрезок линии, волновое сопротивление и длина которого подбираются для выполнения заявленной функции трансформации.



**Рисунок 6.** Эскиз магнетронного зонда.



**Рисунок 7.** Конструкция разработанного зонда.

AWR модель такого зонда представлена на рис. 8. Расчет трансформирующих свойств отрезка линии проводился с учетом влияния неоднородностей на границе соединяющихся коаксиальных линий.

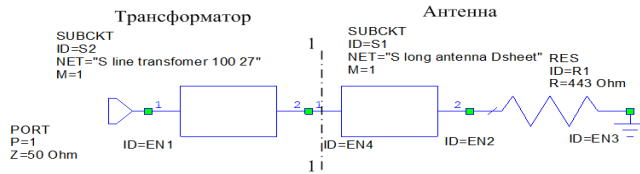


Рисунок 8. AWR модель магнетронного зонда.

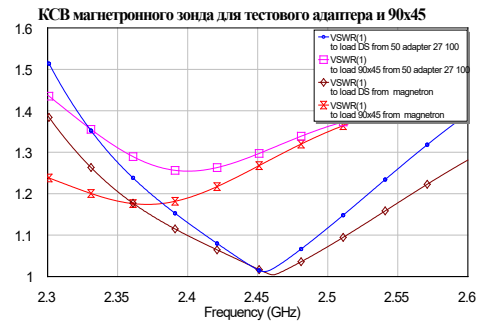


Рисунок 9. Трансформация оптимального сопротивления тестового адаптера «оптимальным» зондом.

Верифицированное значение волнового сопротивления среднего звена:  $Z_0 = 100 \text{ Ом}$ , длина отрезка  $l_0 = 27 \text{ мм}$ . Такой зонд обеспечивает трансформацию сопротивления в плоскости 1-1 к сопротивлению 50 Ом. В результате в конструкцию существующего зонда между отрезками коаксиалов с волновым сопротивлением 50 Ом и волновым сопротивлением 113 Ома, должно быть введено звено с указанными выше параметрами. Такую измерительную оснастку назвали оптимальным или «магнетронным» зондом.

## Заключение

На рис. 9 представлено сравнение КСВ нагрузки, которую «чувствует» магнетрон, с КСВ на 50-омном входе магнетронного зонда. Сравнение представлено для двух типов адаптеров: тестового и выполненного на волноводе 90x45. Представленные результаты позволяют заключить, что по КСВ магнетронного зонда можно с большой точностью судить об условиях согласования магнетрона в произвольном реакторе

## Список литературы

1. LG, Customer's Acceptance Specification, Magnetron 2M214.
2. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/853105/LG/2M214-21GKH/1>
3. Vladimir Bilik, Demystifying the Magnetron Probe. AMPERE Newsletter Issue 90, October 10, 2016, pp. 11-14. [www.AmpereEurope.org](http://www.AmpereEurope.org)
4. 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)
5. Andrey D. Grigoriev, Vyacheslav A. Ivanov, Sergey I. Molokovsky Microwave Electronics, Springer International Publishing AG, 2018. <https://www.springer.com/in/book/9783319688909#aboutBook>