

Измеритель коэффициента отражения для мощных высокочастотных технологических установок

Б. А. Слепченков

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
slepchenkov.boris@mail.ru

А. Д. Тупицын

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
talexandert@yandex.ru

А. С. Иванов

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический
университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
asivanov@etu.ru

Аннотация. Разработан и изготовлен экспериментальный макет высокочастотного измерителя коэффициента отражения для мощных высокочастотных технологических установок. Для исследования экспериментального макета измерителя коэффициента отражения на промышленной частоте 13,56 МГц собрана лабораторная установка, включающая генератор с выходной мощностью до 2,5 кВт и нагрузку на основе цилиндрического термоэлектрического нагревателя (ТЭН) с радиатором для воздушного охлаждения. Работоспособность макета высокочастотного измерителя коэффициента отражения подтверждена соответствием экспериментально измеренного с его помощью значения коэффициента отражения (-11,2 дБ) измеренному с помощью анализатора микроволновых цепей (-11,9 дБ) для используемой нагрузки. Опробованная конструкция макета высокочастотного измерителя коэффициента отражения может быть масштабирована на установки мощностью в десятки и сотни киловатт в диапазонах выделенных промышленных частот.

Ключевые слова: согласованная нагрузка, коэффициент стоячей волны, коэффициент отражения, измеритель коэффициента стоячей волны, измеритель коэффициента отражения

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем при создании радиовещательных комплексов различного назначения и разных уровней изучаемой мощности является согласование выхода передатчика с изучающей антенной. Согласование обеспечивает максимальную дальность связи, повышает коэффициент полезного действия системы, снижает максимальные напряжения в линии связи, соединяющей выходной каскад передатчика с антенной, снижая вероятность электрического пробоя, уменьшает вероятности ошибок при цифровой передаче информации и т. д. Для обеспечения согласования, прежде всего, необходимо знать, насколько волновое сопротивление антенны соответствует волновому сопротивлению выходного каскада. Для количественной оценки согласованности используются коэффициент стоячей волны или коэффициент отражения, которые однозначно связаны между собой. Для получения значений коэффициентов стоячей волны (отражения) применяются измерители различных конструкций, встраиваемые непосредственно в линию передачи, питающую антенну. Измерители имеют различное

конструктивное исполнение, рассчитаны на различные частотные диапазоны и диапазоны мощностей.

Повышение мощности генераторов высокой частоты в технологических установках высокочастотного нагрева диэлектрических и других материалов, плазматронов различного назначения и т. п., требует снижения потерь за счет обеспечения согласования выходного сопротивления генератора с нагрузкой, свойства которой изменяются в широких пределах, например при её нагреве, при изменении агрегатного состояния, при «зажигании» плазмы. Важной особенностью таких установок является необходимость оперативно изменять режим согласования в процессе работы, защищая генератор от выхода из строя при возникновении отражённой волны большой амплитуды при рассогласовании, для поддержания неизменной мощности в нагрузке при изменении её свойств и т. п. Это означает, что такие установки должны иметь в своём составе согласующую цепь, параметры которой автоматически изменяются в зависимости от коэффициента отражения, оперативно определяемого специализированным измерителем.

В современной литературе представлено большое количество принципиальных схем и конструкций измерителей коэффициента стоячей волны, например подробное описание можно найти на электронном ресурсе [1]. Как правило, они предназначены для радиолюбителей, работающих с устройствами с выходной мощностью до сотен ватт в диапазонах частот до десятков мегагерц. Другие, как представленные в шеститомном издании Гончаренко И.В. [2], содержат теоретическое описание принципов действия с примерами практических конструкций. Существуют электронные ресурсы коммерческих предприятий [3] с предложениями готовых устройств с максимальной мощностью до 2 кВт. Отдельные предлагаемые устройства, описанные, например в [4], обеспечивают измерения для максимальной проходящей мощности до 10 кВт в диапазоне частот до 30 МГц. Это функционально законченные изделия в корпусах, на которых расположены разъёмы и индикаторы, что не всегда удобно для встраивания в технологическое оборудование.

При этом многие современные технологические установки, в которых необходимо контролировать и

управлять коэффициентом отражения, работают с мощностями до 50 кВт и более. Подавляющее большинство таких устройств производится за рубежом. Описания измерителей, работающих с большими мощностями в десятки-сотни и киловатт, как правило, являются коммерческими секретами.

Решение перечисленных проблем потребовало выполнить разработку конструкции и изготовление макета измерителя коэффициента отражения для мощных высокочастотных технологических установок, создать лабораторную установку для тестирования макета измерителя коэффициента отражения, разработать и отладить методику измерения параметров и настройки согласованной нагрузки.

II. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования макета измерителя КСВ была создана лабораторная установка, содержащая источник электромагнитных колебаний требуемой мощности и соответствующей частоты, согласующую цепь, измерительные приборы и нагрузку.

В качестве источника электромагнитных колебаний была использована технологическая установка ВЧД-2,5/13-СД-ЛО1 с питанием от трёхфазной сети с частотой 50 Гц и потребляемой мощностью 6,5 кВт. Выходная мощность на частоте 13,56 МГц составляет до 2,5 кВт. Установка предназначена для нагрева диэлектриков и содержит в своём составе двухконтурный триодный генератор, систему воздушного охлаждения триода, органы настройки частоты и выходной мощности генератора. Описания аналогичных устройств можно найти, например, в [5].

Для исследования макета измерителя КСВ по выходу его необходимо нагружать мощной нагрузкой с известным сопротивлением и мощностью рассеяния не менее 2,5 кВт. Один из вариантов такой нагрузки предлагается в [6]. Заказные изделия РПН-1-1-20 и РПН-1-2-20 представляют собой непроволочные водоохлаждаемые углеродистые резисторы, способные рассеивать мощности до 20 кВт в частотном диапазоне 50 Гц...120 МГц. Однако продолжительные сроки поставки и высокая стоимость указанных изделий не позволили использовать их при разработке стенда.

Возможные отражения в высокочастотном тракте и реальная мощность, отдаваемая генератором на рабочей частоте, кратковременность режимов измерения, а также конструкция и материалы, из которых изготовлена нагрузка, позволяют снизить требования по мощности рассеяния нагрузки в 1,5–2 раза. Учитывая сказанное, а также – относительно невысокую частоту, в качестве нагрузки для измерительного тракта было предложено использовать широко распространённые и доступные по стоимости ТЭН. Нагреватели, рассчитанные на мощности 1...2 кВт, имеют на частоте 50 Гц сопротивления, близкие к 50 Ом. Но реактивные составляющие полного сопротивления ТЭН на частоте 13,56 МГц приводят к практически полному отражению на этой частоте. Полное сопротивление цилиндрического ТЭН с радиатором для воздушного охлаждения мощностью 1 кВт (рис. 1) составило $6,35 - j100,23$ Ом. Таким образом, возникла необходимость использования согласующей цепи.



Рис. 1. Теплоэлектрический нагреватель использованный в качестве согласованной нагрузки

На рис. 2 представлена Г-образная согласующая цепь. В качестве ёмкости C использован конденсатор К 15У-1-33 пФ, с рабочим напряжением 15 кВ и мощностью 12 кВАр. Катушка индуктивности L намотана эмалированным проводом диаметром 0,7 мм на цилиндрическом стеклотекстолитовом сердечнике диаметром 13 мм виток к витку. Индуктивность катушки выбрана так, чтобы несколько превышать расчётную для возможности точной настройки центральной частоты полосы согласования.

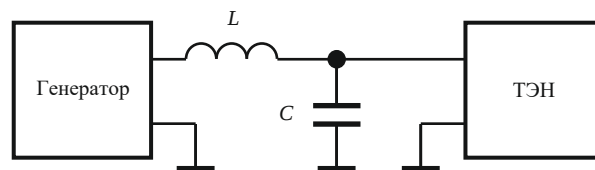


Рис. 2. Согласующая цепь

Расчёт согласующей цепи предварительно производился путём моделирования в Microwave Office с последующим измерением частотной зависимости коэффициента отражения S_{11} . В качестве исходных данных для расчёта использовано предварительно измеренное значение полного сопротивления ТЭН. Затем спроектированная согласующая цепь была виртуально встроена между измерительным портом векторного анализатора микроволновых цепей R&S ZVB8 и ТЭН, а впоследствии виртуальная согласующая цепь была заменена описанной ранее реальной, для проведения измерений параметров согласованной нагрузки и её настройки путём изменения числа витков индуктивности L . ТЭН с согласующей L - C -цепью размещён в тонкостенной металлической трубе диаметром 220 мм и длиной 620 мм, как показано на рис. 3.

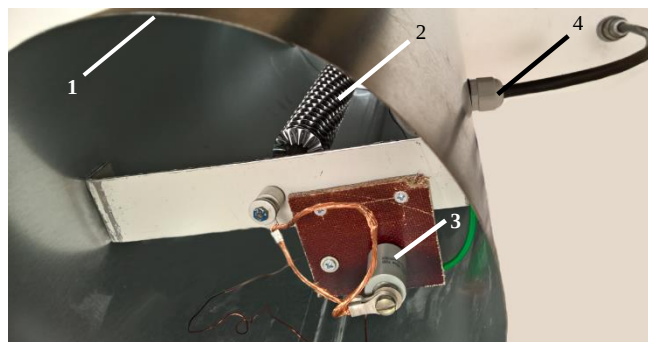


Рис. 3. Конструкция согласованной нагрузки

Здесь 1 – экранирующий металлический цилиндр, 2 – ТЭН, 3 – конденсатор C , 4 – ввод коаксиального кабеля для подключения к измерительному тракту. На рис. 3 не видна катушка индуктивности L , размещённая на обратной стороне изолирующей платы, на которой установлен конденсатор C .

Измерение параметров и настройка согласованной нагрузки проводились с помощью векторного анализатора микроволновых цепей R&S ZVB8.

Частотная зависимость S_{11} настроенной нагрузки изображена на рис. 4. Коэффициент отражения на центральной частоте полосы рабочих частот согласованной нагрузки составляет примерно -11,9 дБ, что может считаться хорошим значением для мощных согласованных нагрузок в целом и для проведения измерения параметров измерителя, коэффициентов отражения в частности.

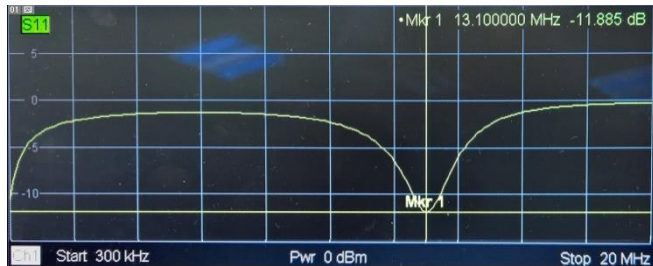


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения ТЭН с согласующей цепью

Как видно из рис. 4, полоса рабочих частот по уровню десятипроцентной отражённой мощности $S_{11} = -10$ дБ составляет примерно 1 МГц, что приемлемо для генератора промышленной частоты с точностью установкой частоты $\pm 5\%$.

III. ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Для выбора конструктивного исполнения измерителя коэффициента отражения рассматривались публикации, приведённые в [1], [2] и аналогичные. В качестве прототипа была выбрана конструкция, описанная в [7], эскиз которой представлен на рис. 5.

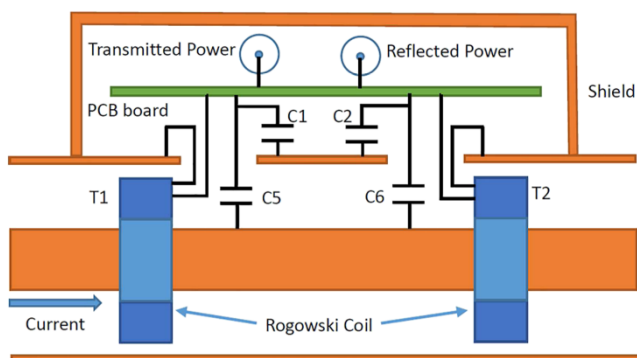


Рис. 5. Эскиз конструкции измерителя коэффициента отражения

Здесь приведён фрагмент коаксиальной линии, в которую встроены измеритель. Высокочастотный ток I_{current} , протекающий по центральному проводнику коаксиальной линии наводит напряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока T1 и T2 (Rogowski Coil – катушка Роговского). Напряжения пропорциональны току в центральном проводнике. Кроме этого, конденсаторы C5, C1 и C6, C2, образующие делители напряжения, позволяют получать напряжения, пропорциональные высокочастотным напряжениям в коаксиальной линии. Напряжения на выходах вторичных обмоток T1 и T2 могут быть пересчитаны в напряжения в линии на расстояниях $+\lambda/4$ и $-\lambda/4$ относительно расположения измерителя коэффициента отражения в коаксиальной линии. Здесь λ – длина волны в коаксиальной линии. Таким образом имеются четыре напряжения, пропорциональные напряжениям в

различных сечениях линии передачи – напряжение U_1 в сечении находящемся на четверть длины волны ближе к генератору, чем измеритель, два напряжения U_2 и U_3 , пропорциональных напряжениям в линии в месте расположения измерителя, и напряжение U_4 на расстоянии на четверть длины волны больше, чем расстояние генератор – измеритель. Высокочастотные напряжения $U_1 - U_2$ и $U_3 - U_4$ позволяют получить постоянные напряжения, пропорциональные напряжениям падающей и отражённой от нагрузки волн. Подробно выведение расчётных соотношений описано, например, в [1].

Схема измерителя коэффициента отражения, описанная в [7], изображена на рис. 6. Здесь напряжения U_1, U_2 прикладываются между анодом и катодом диода Шоттки D1, а напряжения U_3, U_4 – между анодом и катодом диода D2 и таким образом осуществляется одновременное вычитание и выпрямление напряжений.

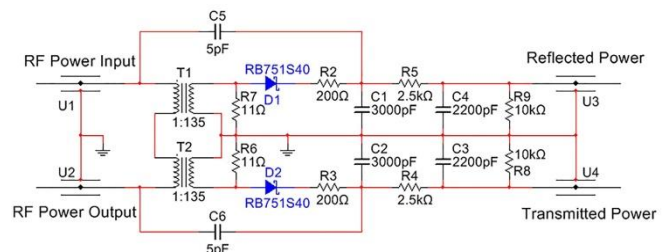


Рис. 6. Принципиальная схема измерителя коэффициента отражения

Значения номиналов элементов схемы для разработанного макета измерителя несколько отличаются от указанных на рис. 6. Это связано с тем, что авторы публикации представили измеритель на частоту 800 кГц. При этом в [7] приведены результаты работы измерителя при проходящей мощности около 25 кВт. Для макета измерителя, работающего на частоте 13,56 МГц и с мощностью до 2,5 кВт, коэффициенты трансформации T1 и T2 составляют 1:51, R2 и R3 составили по 220 Ом, R4 и R5 – по 2,7 кОм, C1 и C2 – по 2200 пФ, C5 и C6 – по 10 пФ.

Высокочастотные колебания от генератора, поступают на вход RF Power Input. К выходу RF Power Output подключается нагрузка. На низкочастотных выходах Reflected Power и Transmitted Power формируются постоянные напряжения, пропорциональные напряжениям отражённой и падающей волн соответственно.

Макет измерителя коэффициента отражения был размещен в металлическом цилиндрическом контейнере диаметром 105 мм и длиной 180 мм. В нём располагались два трансформатора тока с вторичными обмотками по 51 витку из эмалированного провода диаметром 0,7 мм на ферритовых кольцевых сердечниках. Материал сердечников M200ВНП имеет критическую частоту 15 МГц, определяющую верхнюю границу рабочего диапазона частот. Диаметры колец составляли 65 мм (внешний) и 40 мм (внутренний) при толщине 5 мм. Такие типоразмеры, как и размер контейнера (корпуса), были выбраны из расчёта увеличения в дальнейшем рабочей мощности измерителя.

Трансформаторы тока через соединительные текстолитовые пластины крепились к внутренней

поверхности корпуса с помощью металлических уголков, как показано на рис. 7. Центральный проводник коаксиальной линии, проходящий по оси корпуса измерителя и трансформаторов, служил их первичной обмоткой.



Рис. 7. Размещение трансформаторов тока в корпусе измерителя

На торцевых поверхностях цилиндрического корпуса измерителя располагались присоединительные высокочастотные разъемы 7/16 с максимальным рабочим напряжением 2700 В и среднеквадратичным напряжением пробоя 4000 В. Внешний вид измерителя приведен на рис. 8. Кроме высокочастотных разъемов у него имеются два низкочастотных коаксиальных разъема для присоединения внешних устройств – осциллографа, вольтметра или АЦП.

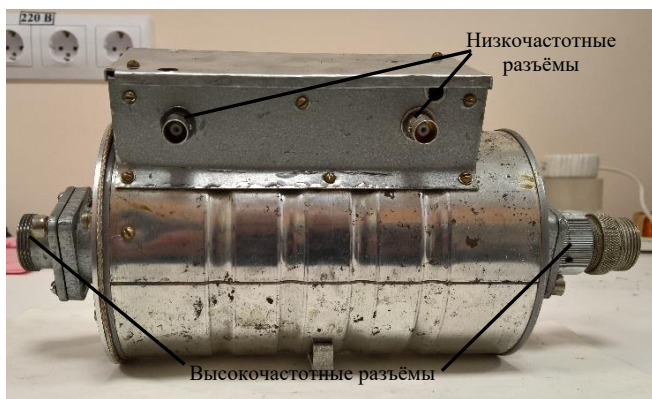


Рис. 8. Внешний вид макета измерителя коэффициента отражения

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из-за избыточных размеров элементов конструкции измерителя – большого диаметра корпуса и сердечников трансформаторов тока, в измерителе могут возникать потери на отражение части мощности проходящего сигнала, а также на нагрев сердечников.

Соотношение внутреннего диаметра корпуса и диаметра центрального проводника (8 мм) даёт волновое сопротивление измерителя, как отрезка коаксиальной линии, близкое к 160 Ом. Эти потери были оценены с помощью Microwave Office и затем измерены с помощью векторного анализатора микроволновых цепей Rohde&Schwarz ZVB8. Измеренное значение потерь на отражение S_{11} не превысило – 46 дБ в полосе частот 300 кГц...15 МГц, а значение коэффициента передачи S_{21} во всей полосе оказалось весьма близким к единице, что объясняется малой электрической длиной отличающегося по волновому сопротивлению от коаксиальной линии измерителя и малыми потерями в сердечниках.

В результате работы была создана лабораторная установка для исследования макетов и оптимизации конструкции измерителей коэффициентов отражения, внешний вид которой приведен на рис. 9.

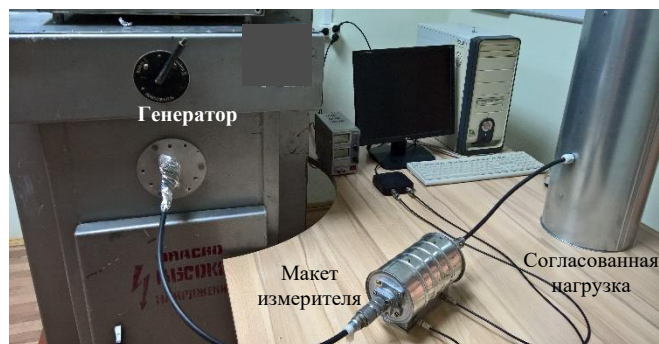


Рис. 9. Лабораторная установка для исследования измерителя

Тестирование макета измерителя на лабораторной установке с подключением двухканального осциллографа к низкочастотным выходным разъемам (рис. 8) показало хорошее совпадение экспериментальных данных с значением коэффициента отражения нагрузки (-11,9 дБ), полученным в результате измерений с помощью векторного анализатора микроволновых цепей R&S ZVB8 (рис. 4). Измеренные амплитуды напряжений составили 0,91 В для падающей и 0,25 В для отражённой волн. На рабочей частоте генератора 13,187 МГц это соответствует коэффициенту отражения равному -11,2 дБ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована и опробована конструкция измерителя коэффициента отражения для мощных высокочастотных технологических установок. Экспериментально подтверждена работоспособность макета и вполне допустимая погрешность измерений.

Создана лабораторная установка, которая при небольшой доработке послужит для калибровки измерителей коэффициентов отражения для высокочастотных технологических установок достаточно больших уровней мощности.

Отработана методика измерения параметров и настройки согласованной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гуткин Э.И. КСВ-метры: теория и практика. Как сделать достоверный КСВ-метр. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2025]. URL: <https://www.radiolamp.ru/shem1/pages/250/> (дата обращения: 06.02.2025).
- [2] Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Часть 2. Основы и практика М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио», 2005. 288 с.:ил.
- [3] Измеритель КСВ и мощности NISSEI DG-103 MAX. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2025]. URL: <https://lpd-radio.ru/product/izmeritel-ksv-i-moschnosti-nissei-dg-103-max> (дата обращения: 06.02.2025)
- [4] Power Monitor III - цифровой измеритель мощности и КСВ. [Электронный ресурс] // [сайт]. [2025]. URL: <https://ant-depot.ru/catalog/ksv-metry/power-monitor-iii-tsifrovoy-izmeritel-moschnosti-i-ksv/?oid=56301> (дата обращения: 06.02.2025)
- [5] Донской А.В. и др. Высокочастотные электротермические установки с ламповыми генераторами. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: «Энергия», 1974. 208 с. с ил.
- [6] Резисторы НПП "Юнион" // [сайт]. [2024]. URL: <https://myunion.ru/production/resistor/rezistor-uv-rpn-5-50-kvt-zhidkostnoe-okhlazhdenie/> (дата обращения: 06.02.2025)
- [7] Ion cyclotron resonance heating (ICRH) systems for the Keda Mirror with Axisymmetry (KMAX) / Ming Liu, Hongshen Yi, Munan Lin, et al. // Rev. Sci. Instrum. 2017. 88, 053505. DOI: 10.1063/1.4983801