

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности

Р.В. Бударагин¹, З.Ю. Саласенко¹, А.Д. Серов², И.А. Цветкова³

¹Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

²Научно-производственное предприятие «Юнион»,
ул. Нартова, 2, этаж 2, помещ. 5, г. Нижний Новгород 603098, Россия

³Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Саров,
ул. Парковая, 8, г. Саров 607328, Нижегородская область, Россия

Поступила 21.01.2024

Принята к печати 09.09.2024

Представлена разработка измерителя ВЧ-сигналов большой мощности, основанного на методе калориметрических измерений, который в ряде случаев является единственно возможным. Устройство представляет систему элементов, обменивающихся либо энергией, либо информацией, работа и взаимосвязь которых обеспечивает устойчивость его функционирования. Основными элементами измерителя являются: согласованная нагрузка и двухконтурная водовоздушная система охлаждения, преобразующие ВЧ-энергию сначала в тепловую энергию электрического тока, а затем во внутреннюю энергию теплоносителя (рабочего тела). Система измерения и управления обеспечивает отображение информации на монитор и выработку внутренних управляющих сигналов. В работе делается акцент на процессе преобразования энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию теплоносителя, так как согласованная ВЧ-нагрузка интегрируется в систему охлаждения и требует специальных конструктивных и технологических решений для обеспечения эффективной работы. Для испытания разработанного ВЧ-поглотителя мощностью до 5 кВт спроектирована система охлаждения и измерения ВЧ-сигнала. Параметры системы охлаждения определялись исходя из минимизации времени достижения теплового равновесия (времени установления показаний) и заданных параметров (входная температура не более 35 °С, перепад температуры не более 40 °С). По электродинамической модели, построенной методом частичных областей, определены геометрические размеры, при которых коэффициент стоячей волны по напряжению нагрузки в рабочем частотном диапазоне (от постоянного тока до 1300 МГц) будет наименьшим. Представлены результаты проектирования измерителя большой ВЧ-мощности, охлаждаемого жидкостью (водой), рассматриваются происходящие в ней теплофизические процессы и влияние наличия теплоносителя в контуре охлаждения.

Ключевые слова: метод калориметрического детектирования, система охлаждения, метод частичных областей, ВЧ-нагрузка

Адрес для переписки:

Саласенко З.Ю.
Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

Address for correspondence:

Salasenko Z.IU.
Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

Для цитирования:

Р.В. Бударагин, З.Ю. Саласенко, А.Д. Серов, И.А. Цветкова.
Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С. 248–258.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

For citation:

Budaragin RV, Salasenko ZIU, Serov AD, Tsvetkova IA.
Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):248–258. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal

R.V. Budaragin¹, Z.IU. Salasenko¹, A.D. Serov², I.A. Tsvetkova³

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

²Scientific and Production Enterprise “Union”,
Nartov str., 2, 5, Nizhny Novgorod 603098, Russia

³Branch of Lomonosov Moscow State University in Sarov,
Parkovaya str., 8, Sarov 607328, Nizhny Novgorod region, Russia

Received 21.01.2024

Accepted for publication 09.09.2024

Abstract

Development of a high-power RF signal meter based on the method of calorimetric measurements, which in some cases is the only possible one is presented. The device is as a system of elements exchanging either energy or information, the operation and interconnection of which ensures the stability of its functioning. The main elements of the device are: a coordinated load and a two-circuit water-air cooling system that convert RF energy first into thermal electrical energy, and then into internal energy of the coolant (working fluid). The measurement and control system provides information display on the monitor and generation of internal control signals. The work focuses on the process of converting electromagnetic energy into internal energy of the coolant, since the matched RF load is integrated into the cooling system and requires special design and technological solutions to ensure efficient operation. A cooling and measurement system has been designed to test the developed RF absorber with a power of up to 5 kW. The parameters of the cooling system were determined based on minimizing the time to achieve thermal equilibrium (time to establish readings) and the set parameters (input temperature no more than 35 °C, temperature difference no more than 40 °C). Based on calculations of the electrodynamic model constructed by the partial domain method, the geometric dimensions were determined at which the voltage standing wave ratio of the load in the operating frequency range (from DC to 1300 MHz) will be the smallest. The article presents the results of designing a high-frequency wattmeter cooled by a liquid (water), examines the thermophysical processes occurring in it and the influence of the presence of a coolant in the cooling circuit.

Keywords: calorimetric detection method, cooling system, partial domains method, microwave load

Адрес для переписки:

Саласенко З.Ю.
Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

Address for correspondence:

Salasenko Z.IU.
Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: zina.salasenko@mail.ru

Для цитирования:

Р.В. Бударагин, З.Ю. Саласенко, А.Д. Серов, И.А. Цветкова.
Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С. 248–258.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

For citation:

Budaragin RV, Salasenko ZIU, Serov AD, Tsvetkova IA.
Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):248–258. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-248-258

Введение

Метод калориметрического детектирования и измерения ВЧ-сигналов с большим (от десятков ватт до нескольких сотен киловатт) уровнем мощности является в ряде случаев единственно возможным методом [1], который основан на термодинамическом принципе действия. Он отличается от других методов повышенной точностью измерения [2], которая определяется эффективностью преобразования энергии электромагнитного излучения во внутреннюю энергию теплоносителя, а также точностью определения параметров охлаждающей жидкости (температуры, расхода). Важнейшим элементом данных систем измерения является мощный ВЧ-поглотитель (оконечная согласованная нагрузка) [3, 4], встроенный в систему охлаждения. Создание таких нагрузок вызывает определённые трудности, связанные с необходимостью внесения в конструкцию дополнительных элементов [5], обеспечивающих требуемый уровень теплоотдачи при хорошем согласовании нагрузки с ВЧ-трактом.

В данной статье приводятся результаты проектирования согласованной ВЧ-нагрузки большой мощности, охлаждаемой жидкостью (водой), описано влияние наличия теплоносителя на эффективность преобразования ВЧ-сигнала в тепловую энергию, а также рассмотрены теплофизические процессы [1, 6–11] в контуре охлаждения. Приведены

результаты проектирования системы измерения ВЧ-мощности с использованием данной ВЧ-нагрузки. Подобные системы могут быть успешно применены в области радиотехники [12].

Расчёт и определение технических параметров ваттметра

На рисунке 1 представлена структурная схема калориметрической системы измерения ВЧ-сигнала. Одним из основных элементов является ВЧ-поглотитель (1), состоящий из керамического резистивного элемента (ВЧ-резистора), помещённого в согласующий экран. Система охлаждения поглотителя представляет собой замкнутую схему циркуляции жидкого теплоносителя (воды) в сочетании с воздушным отводом тепла, который происходит в решётках радиатора (4) с помощью вентиляторов (2). Теплоноситель поступает из герметичного бака (5) на вход ВЧ-нагрузки (1) с помощью циркуляционного насоса центробежного типа (3), у которого вход – осевой, выход – радиальный. Напор при этом создаётся действием подъёмной силы лопасти рабочего колеса на жидкость, т. е. давление жидкости повышается в основном за счёт действия центробежных сил. Таким образом, в замкнутом контуре охлаждения преобладает вынужденная конвекция, так как движение жидкости осуществляется путём воздействия на неё внешних сил.

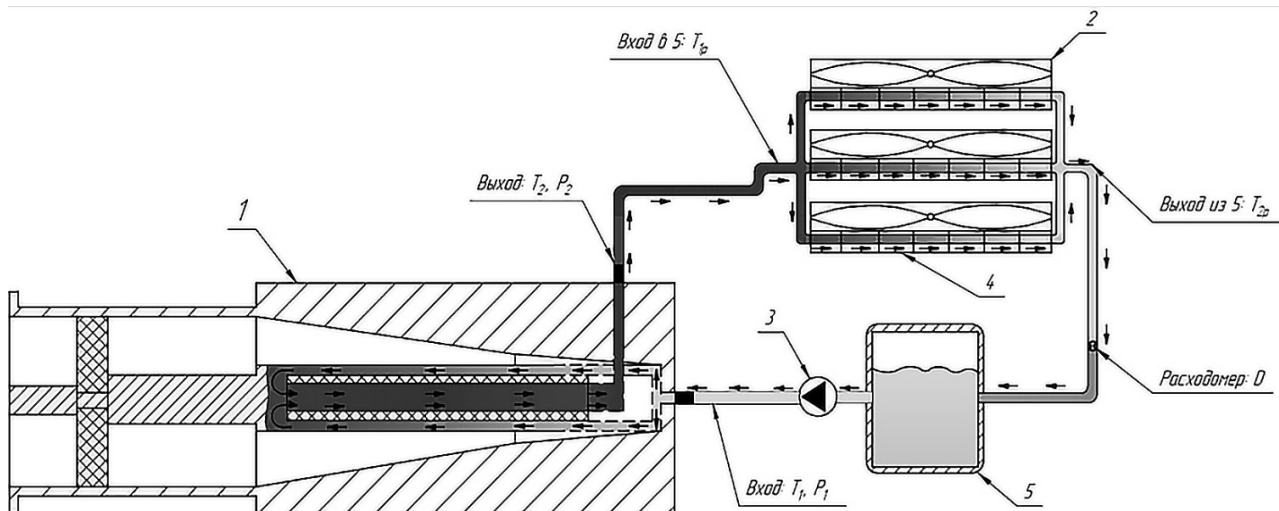


Рисунок 1 – Структурная схема калориметрической системы измерения ВЧ-сигнала: 1 – ВЧ поглотитель; 2 – вентиляторы; 3 – циркуляционный насос; 4 – радиатор; 5 – герметичный бак

Figure 1 – Block diagram of a calorimetric RF signal measurement system: 1 – HF absorber; 2 – fans; 3 – circulation pump; 4 – radiator; 5 – sealed tank

Процессы теплопередачи непосредственно связаны с условием движения жидкости. Фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность преобразования

электромагнитной энергии в тепловую, является турбулентность течения теплоносителя внутри кольцевого зазора и внутри резистора (рисунок 2).

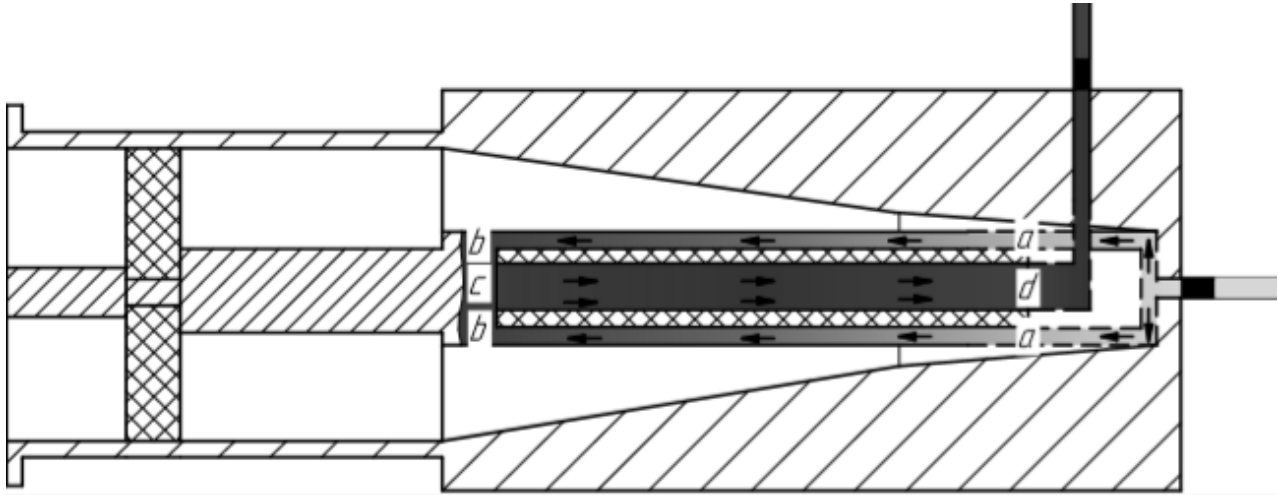


Рисунок 2 – Турбулентность течения теплоносителя внутри кольцевого зазора и резистора

Figure 2 – Turbulence of the coolant flow inside the annular gap and the resistor

Охлаждающая жидкость после входа в нагрузку проходит несколько участков, отмеченных на рисунке 2.

На участке *a-b* происходит первичное нагревание теплоносителя и соответственно охлаждение керамического резистивного элемента турбулентным потоком жидкости в зазоре с малой площадью проходного сечения. Нагрев теплоносителя происходит преимущественно с внутренней части трубопровода.

Участок *b-c-b* характеризуется смещением потоков жидкости, параметры которых равны из-за осевой симметрии и равномерного нагрева резистора.

Основная часть нагревания приходится на участок *c-d*, так как охлаждающая жидкость движется внутри трубопровода, внешним диаметром которого является внутренний диаметр горячего керамического элемента.

Поток охлаждающей жидкости внутри проходных каналов поглотителя, насыщенный беспорядочно движущимися вихрями, разделяется на две составляющих – вязкий подслой и ядро потока [6]. В вязком подслое происходит перенос теплоты посредством теплопроводности по нормали к стенке. В ядре турбулентного потока перенос тепла осуществляется интенсивным непрерывным

перемешиванием молекул жидкости. Данное явление сопровождается активным возникновением завихрений, которые переходят в ядро и, развиваясь, заполняют весь турбулентный поток. Из-за вязкости жидкости вихри постепенно затухают. Описанный процесс является непрерывным, но не основным при определении характера теплопередачи. Интенсивность теплопередачи в данном случае определяется термическим сопротивлением пристенного подслоя, где и происходит наибольшее изменение температуры вследствие теплопроводности.

Нагретый теплоноситель после охлаждения испытуемого образца попадает в распределительный коллектор, откуда поступает на три радиатора с воздушным охлаждением. Теплообмен между охлаждаемой жидкостью и охлаждающей средой протекает не за счёт их непосредственного соприкосновения [7], а путём передачи тепла через металлические стенки трубопровода, теплоём с которых осуществляется поперечным потоком атмосферного воздуха. Трубы на этом участке выполнены в виде змеевиков, что интенсифицирует теплопередачу, так как при повороте потока на 180° возникает центробежный эффект, т. е. поток жидкости будет

отжиматься к внешней стенке. При этом в поперечном сечении возникает вторичная циркуляция, за которой неизбежно следует увеличение скорости потока. Данные факторы способствуют увеличению турбулентности и среднего коэффициента теплоотдачи. Следует отметить, что подвод охлаждаемой жидкости в змеевик производится сверху, а отвод осуществляется снизу. Это обуславливается тем, что при охлаждении удельный вес воды увеличивается, её частицы стремятся вниз, что также увеличивает теплоотдачу.

Система циркуляции теплоносителя в данной установке замкнутая. После прохождения через воздушную систему охлаждения вода поступает в собирательный коллектор, откуда поступает в герметичный бак.

Как было отмечено ранее, перенос теплоты внутри теплоносителя осуществляется в основном путём перемешивания. Данный процесс должен быть интенсивен так, чтобы температура жидкости по сечению ядра потока оставалась практически постоянной. Резкое изменение температуры будет наблюдаться лишь внутри тонкого слоя у поверхности. Процесс конвективного теплообмена описывается системой дифференциальных уравнений: уравнением теплопроводности, уравнением Навье–Стокса, уравнением сплошности [1, 8, 9]:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \cdot \nabla^2 t; \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\omega}{d\tau} = \rho \cdot q + \text{grad } P + \mu \cdot \nabla^2 \omega; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; ρ – плотность вещества, q – плотность теплового потока; μ – динамическая вязкость; P – давление жидкости.

Чтобы ограничить задачу и дать полное математическое описание процесса преобразования электромагнитной энергии в энергию теплоносителя внутри ВЧ-поглотителя, были использованы краевые условия в совокупности с CFD моделированием. Это позволило визуализировать градиент температуры теплоносителя в рассматриваемой модели в виде цветового поля и добиться такой интенсивности процесса перемешивания, чтобы

поток теплоносителя носил турбулентный характер [10].

Условия однозначности состоят из:

1. Геометрических условий, т. е. известны внутренние и внешние диаметры трубы и кольцевого зазора, а также определены длины рассматриваемых участков.

2. Физических условий. В рассматриваемой установке рабочим телом является вода, она несжимаема и её физические свойства: теплопроводность $\lambda(t)$, теплоёмкость $C_p(t)$, динамическая вязкость $\mu(t)$, плотность $\rho(t)$ – зависят от температуры.

3. Граничных условий, которые характеризуют особенности протекания процесса на границах тела. То есть особый интерес будет представлять коэффициент теплоотдачи, который определяется из следующих положений. Поток теплоты, который будет передаваться от стенки к жидкости, проходит через вязкостный подслой, прилегающий к поверхности, и может быть определён по закону Фурье:

$$dQ = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0} dF d\tau.$$

Однако для этого же элемента поверхности dF справедлив закон Ньютона–Рихмана:

$$dQ = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) dF d\tau.$$

Приравняв правые части этих уравнений, получим:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{(t_c - t_{\text{ж}})} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n \rightarrow 0},$$

где λ – коэффициент теплопроводности (является физическим параметром); t_c , $t_{\text{ж}}$ – температуры стенки и жидкости соответственно.

Тепловой и гидродинамический расчёт позволили определить оптимальные геометрические параметры ВЧ-поглотителя, при которых преобразование электрической энергии в тепловую наиболее эффективно. Длина резистивного элемента (ВЧ-резистора) составляет 130 мм, внутренний диаметр 9 мм (63 мм^2), внешний диаметр 13 мм, диаметр трубопровода (полипропиленовый кожух, в который помещён СВЧ-резистор) равен 16 мм (площадь кольцевого зазора прохода воды равна 68 мм^2). С помощью CFD-моделирования установлено, что при теплоотдаче резистора $\approx 27 \text{ Вт/см}^2$ перепад температур не превышает $40 \text{ }^\circ\text{C}$,

гидравлические потери конструкции составили 0,327 атм.

Данные об изменении температуры при охлаждении керамического элемента дают возможность определить значение критериального числа Рейнольдса [11]. Расчёт проводился для значений максимально достигнутой мощности $P = 5$ кВт и перепаде температур 40 °С при максимально допустимой температуре на входе ВЧ-нагрузки 35 °С. Расход теплоносителя при этом составил $G \approx 2$ кг/мин, а рассчитываемое значение числа Рейнольдса превысило $Re_{расч} \approx 2,94 \cdot 10^3$.

Сравнивая полученный результат с критическим значением числа Рейнольдса

$Re_{расч} > Re_{кр} \approx 2 \cdot 10^3$, можно сделать вывод, что режим течения теплоносителя имеет турбулентный характер.

Для согласования ВЧ-поглотителя с волноводным трактом необходимо разработать его электродинамическую модель с учётом наличия охлаждающей жидкости в проходных зазорах, геометрические параметры которых строго определены исходя из тепловой схемы.

Согласно электродинамической модели, ВЧ-поглотитель, конструкция которого представлена на рисунке 3, можно представить в виде соединённых между собой отрезков частично заполненных волноводов круглого сечения.

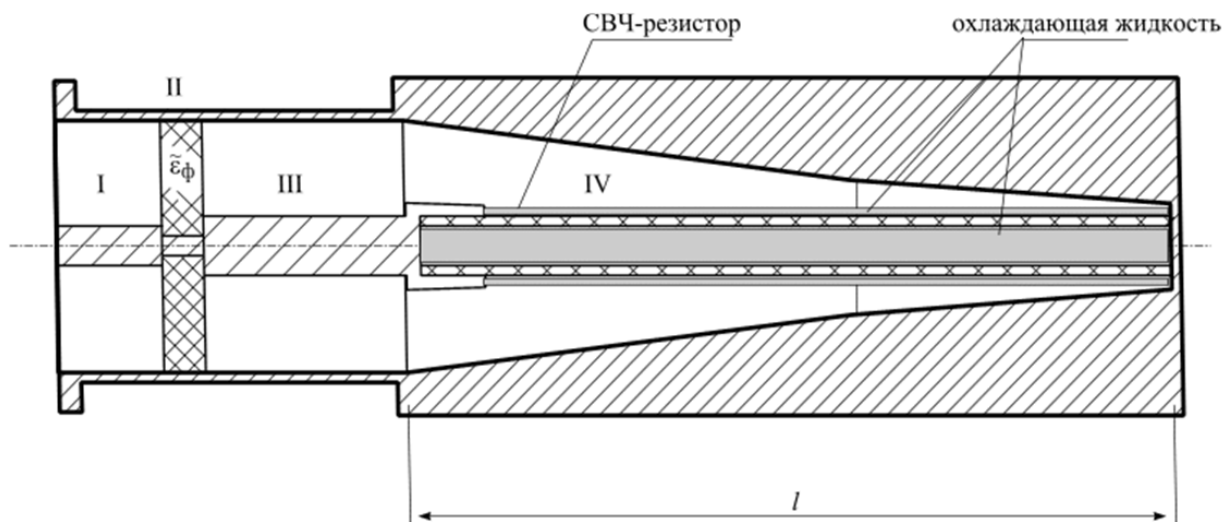


Рисунок 3 – Электродинамическая модель ВЧ-поглотителя: I, II, III – коаксиальные волноводы; IV – область поглощения ВЧ-энергии

Figure 3 – Electrodynamical model of the RF absorber: I, II, III are coaxial waveguides; IV is the RF energy absorption region

Области I, II, III – коаксиальные волноводы, параметры которых обеспечивают согласование нагрузки с подводящим трактом. Область IV – область, в которой происходит поглощение ВЧ-энергии и преобразование её в тепловую энергию охлаждающей жидкости. Эту область считаем круглым нерегулярным экранированным волноводом с четырёхслойным заполнением (схематический разрез представлен на рисунке 4). Внешний, четвёртый, слой заполнен воздухом. Второй слой представляет собой пористый керамический ВЧ-резистор, который при поглощении ВЧ-энергии постепенно нагревается до критической температуры. Первый и третий

слои являются частью контура охлаждения, по которому непрерывно циркулирует охлаждающая жидкость (вода).

Для построения электродинамической модели ВЧ-поглотителя применили метод частичных областей [4, 13]. Данный метод относится к группе численно-аналитических, т. е. на первом этапе реализации проводится аналитическое решение задачи, которое затем сводится к системе линейных алгебраических уравнений на втором этапе. Метод отличается большой универсальностью и рядом достоинств при численной реализации ввиду того, что позволяет легко получить общие соотношения амплитудных коэффициентов волн,

распространяющихся в рассматриваемом волноводном тракте. Кроме того, метод частичных областей – строгий электродинамический метод и для поставленной задачи является наиболее быстродействующим по сравнению с численными методами, лежащими в основе таких САПР, как HFSS, CST STUDIO и др.

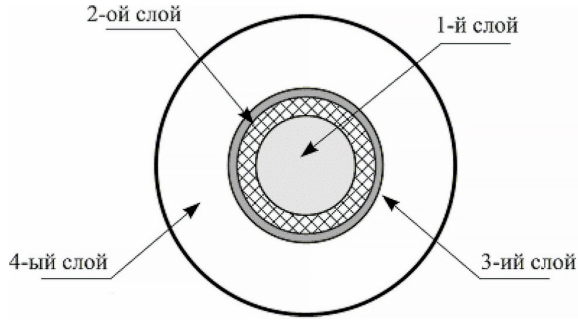


Рисунок 4 – Схематический разрез круглого нерегулярного экранированного волновода с четырёхслойным заполнением: 1, 3 слои – часть контура охлаждения, заполнены охлаждающей жидкостью; 2 слой – керамический ВЧ-резистор; 4 слой – заполнен воздухом

Figure 4 – Schematic section of a circular irregular shielded waveguide with a four-layer filling: 1, 3 layers are part of the cooling circuit, filled with coolant; 2 layer is a ceramic RF resistor; 4 layer is filled with air

Из бесконечного коаксиального волновода I на ВЧ-переход падает основная T -волна единичной мощности. В волноводе I дифракционное поле представим в виде падающей основной волны и суммы отражённых собственных волн коаксиального волновода:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \mathbf{E}^{(1)} \\ \mathbf{H}^{(1)} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_0^{(1)} \\ \mathbf{H}_0^{(1)} \end{Bmatrix} e^{-\beta_0^{(1)} z} + \\ &+ A_0 \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_0^{(1)} \\ -\mathbf{H}_0^{(1)} \end{Bmatrix} e^{\beta_0^{(1)} z} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(1)} \\ -\mathbf{H}_n^{(1)} \end{Bmatrix} e^{\beta_n^{(1)} z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{E}_0^{(j)}(r) = \hat{r}^2 \frac{1}{r}$, $\mathbf{H}_0^{(j)}(r) = i\hat{e} \mu_0 \hat{u}^{(j)} \cdot \frac{1}{r}$ – электрическое и магнитное поля основной волны коаксиального волновода; $\beta_0^{(j)} = k_0 \sqrt{\tilde{\epsilon}^{(j)}}$ – постоянная распространения основной волны коаксиального волновода вдоль оси z ; $\tilde{\epsilon}^{(j)}$ – диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего пространство между центральным проводником и экраном коаксиального волновода; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – постоянная распространения в свободном пространстве; ϵ_0, μ_0 – диэлектрическая

и магнитная постоянные; A_0 и A_n – амплитудные коэффициенты отражённых основной волны и волн высших типов, соответственно. Для волн типа $-E$ ($n > 1$):

$$E_n^{r(j)}(r) = i\beta_n^{(j)} \cdot \alpha_n^{(j)} \cdot (J_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r) \times Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r));$$

$$H_n^{\varphi(j)}(r) = i\omega \epsilon \alpha_n^{(j)} \times (J_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_1(\alpha_n^{(j)} \cdot r)),$$

где $\beta_n^{(j)} = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}^{(j)} \mu_0 - \alpha_n^{(j)}}$, $\alpha_n^{(j)}$ – постоянные распространения n -ой ($n > 1$) собственной волны в j -ом волноводе. Поперечная постоянная распространения $\alpha_n^{(j)}$ определяется из дисперсионного уравнения:

$$J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot d_j) - J_0(\alpha_n^{(j)} \cdot d_j) \cdot Y_0(\alpha_n^{(j)} \cdot D_j) = 0,$$

где $J_n(x)$, $Y_n(x)$ – функции Бесселя 1-го и 2-го рода. Штрих при функции означает нахождение производной по аргументу, стоящему в скобках; d_j, D_j – радиусы центрального проводника и экрана в j -ом регулярном коаксиальном волноводе.

В формуле (4), и далее в (5) и (6) учтено то, что вследствие симметрии рассматриваемой ВЧ-структуры, на стыках волноводов сравнения возбуждаются только симметричные собственные волны E -типа.

Поле дифракции в областях $j = \text{II, III}$ представили в виде бесконечной суммы прямых и обратных собственных волн коаксиального волновода:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \mathbf{E}^{(j)} \\ \mathbf{H}^{(j)} \end{Bmatrix} &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} B_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(j)} \\ \mathbf{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{-i\beta_n^{(j)} z} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_n^{(j)} \\ -\mathbf{H}_n^{(j)} \end{Bmatrix} e^{i\beta_n^{(j)} z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{E}_n^{(j)}, \mathbf{H}_n^{(j)}$ – запись электрического и магнитного полей рассматриваемого волновода – выражения для собственных функций электрического и магнитного полей T -волны и симметричных E -волн однородно заполненного коаксиального волновода; B_n и C_n – амплитудные коэффициенты падающих и отражённых волн, соответственно; $\beta_n^{(\text{II,III})}$ – постоянные распространения этих волн вдоль продольной оси z .

В области IV поле представили в виде бесконечного набора стоячих волн четырёхслойного круглого экранированного волновода (рисунок 4):

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{(IV)} \\ \mathbf{H}^{(IV)} \end{cases} = \sum_{n=1}^{\infty} N(z)_n \begin{cases} \mathbf{E}_n^{(IV)} \\ \mathbf{H}_n^{(IV)} \end{cases} \begin{cases} \sin(\beta_n^{IV}(z) \cdot z) \\ \cos(\beta_n^{IV}(z) \cdot z) \end{cases}, \quad (6)$$

где $N(z)_n$ – амплитудные коэффициенты этих волн, зависящие от продольной координаты; $\mathbf{E}_n^{(IV)}, \mathbf{H}_n^{(IV)}$ – собственные функции их электрического (магнитного) полей.

Записали условие равенства касательных компонент полей (4)–(6) на стыках волноводов I–IV, и умножив на соответствующие компоненты полей собственных волн регулярных волноводов, интегрировали по сечению соответствующего регулярного волновода. С учётом энергетической ортогональности собственных волн, получили систему линейных алгебраических уравнений относительно амплитуд волн в каждой области. Решив данную систему уравнений, нашли искомые коэффициенты $A_n, B_n^{(j)}, C_n^{(j)}$ и $N(z)_n$.

При записи полей собственных волн волноводов соответствующих областей I и IV полагалось, что металлические поверхности этих волноводов – идеально проводящие. Данное предположение вполне допустимо для указанных волноводов, так как удельное сопротивление меди, из которой изготовлены волноводы, много меньше удельного сопротивления углеродистого проводящего слоя ВЧ-резистора.

Область IV с плавным изменением профиля волновода рассматривалась как ступенчатый переход, аппроксимирующий данное плавное изменение, количество ступеней K определяется по внутренней сходимости решения задачи. Диэлектрическая проницаемость воды для рассматриваемого диапазона частот имеет только действительное значение равное 81 [14].

При проведении численных исследований влияния геометрических параметров поглотите-

ля на его согласование с подводящим трактом производился расчёт амплитуды отражённой основной волны A_0 в коаксиальном волноводе I (рисунок 3).

Результаты численных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) $КСВН = 1 + |A_0|/1 - |A_0|$, в диапазоне частот представлен в таблице.

Для проведения испытаний была спроектирована ВЧ-нагрузка для измерения ВЧ мощности до 5 кВт. Исходя из расчётов и оптимизации параметров электродинамической модели, были определены геометрические размеры, при которых КСВН нагрузки в рабочем частотном диапазоне (от постоянного тока до 1300 МГц) будет наименьшим ($< 1,1 \dots 1,15$). Конструкция нагрузки приведена на рисунке 5, где $a = 20,6$ мм, $b = 78,2$ мм, $c = 29,4$ мм, $d = 38,7$ мм, $\alpha_1 = 7^\circ 20'$, $\alpha_2 = 5^\circ 45'$. Входной волновод нагрузки – коаксиальный 38,5/17.

Таблица / Table

Результаты численных значений коэффициент стоячей волны по напряжению

Results of numerical values of voltage standing wave ratio

Частота, МГц Frequency, MHz	КСВН VSWR
50	1,021
100	1,032
200	1,052
400	1,108
700	1,032
1000	1,143
1300	1,154

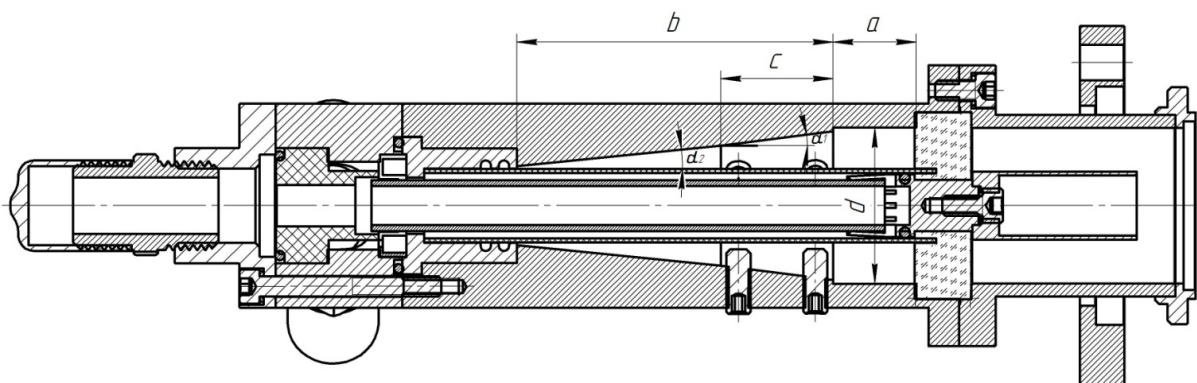


Рисунок 5 – Конструкция экспериментального образца ВЧ-нагрузки

Figure 5 – Design of the experimental RF load sample

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости КСВН экспериментального образца ВЧ-нагрузки в частотном диапазоне. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей ОБЗОР TR 1300/1 с комплектом калибровочных мер № 1.2 при нормальном атмосферном давлении, температуре окружающего воздуха 25 °С и влажности 42 %.

График на рисунке 6 соответствует измерению образца без охлаждающей жидкости. Следует отметить, что уровень КСВН в рабочем диапазоне частот достаточно высок и достигает значения более чем 1,5.

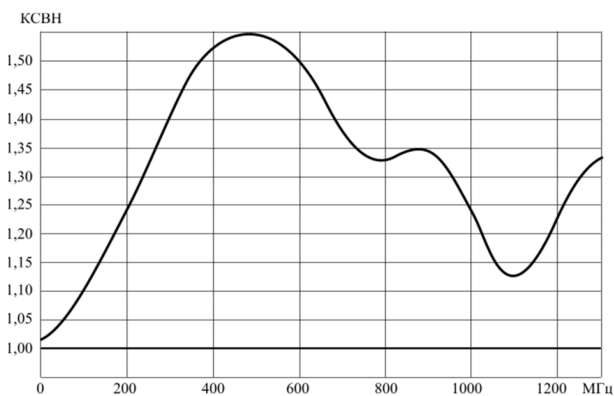


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению экспериментального образца ВЧ-нагрузки без охлаждающей жидкости в частоты

Figure 6 – Dependence of the voltage standing wave ratio for the experimental sample without coolant of the RF load on the frequency

График на рисунке 7 соответствует случаю, когда нагрузка полностью заполнена теплоносителем – дистиллированной водой при температуре 25 °С ($\rho_H = 6,5$, удельная электрическая проводимость при температуре 25 °С не более $5,1 \cdot 10^{-4}$ См/м). Из графика следует, что КСВН нагрузки не превышает 1,15 вплоть до 1300 МГц, а в диапазоне от постоянного тока до 400 МГц КСВН ниже 1,1, что соответствует уровню современных зарубежных аналогов таких нагрузок. Таким образом, наличие тонких (не более 2 мм) слоёв жидкости (воды) значительно влияет на частотные характеристики нагрузки.

Контроль параметров при испытании ВЧ-нагрузки осуществлялся с помощью датчиков расхода жидкости и давления, датчиков температуры охлаждающей жидкости на входе и на выходе образца.

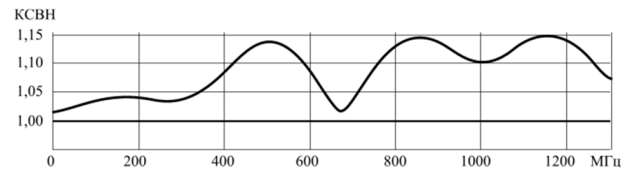


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению экспериментального образца ВЧ-нагрузки с охлаждающей жидкостью от частоты

Figure 7 – Dependence of the voltage standing wave ratio for the experimental sample with a coolant of the RF load on the frequency

Датчики, позволяющие получить значения теплоперепада при охлаждении резистора, расположены в ядре потока. Для получения точных значений, в контуре охлаждения установлен турбулентный режим течения жидкости. Это решение обусловлено тем, что при данном режиме распределение скорости по сечению трубы имеет вид усеченной параболы, т. е. в ядре турбулентного потока скорость жидкости будет практически неизменной для всех точек (исключением является тонкий вязкостный подслой вблизи стенки трубы). Ламинарный режим течения характерен тем, что каждый слой жидкости имеет различную скорость продольного движения, т. е. распределение носит параболический характер. Данный фактор усложняет расчёт температуры жидкости на исследуемом участке, так как появляется необходимость произвести усреднение температуры по сечению, что негативно влияет на точность полученных экспериментальных данных. Получение средней температуры при ламинарном режиме одним измерением без последующих вычислений возможно лишь в том случае, если перед местом измерения жидкость перемешать, это усложнит конструкцию установки и повлияет на требование экономичности.

В качестве основного блока управления датчиками использовался микроконтроллер ATmega328, который поддерживает работу с датчиками разных типов и интерфейс I2C. Для отображения полученных данных установлена индикация в виде монохромного символьного дисплея 1602a QAPASS, встроенного в корпус устройства. Работа с дисплеем производится по шине интерфейса I2C, что упрощает передачу данных с микроконтроллера.

В качестве датчиков температуры были выбраны термопары К-типа с диапазоном измерений от минус 250 °С до 1300 °С, принцип действия которых основан на термоэлектрическом эффекте. Возникающая при измерениях термо-ЭДС слишком мала для измерения микроконтроллером напрямую. Снимаемые с датчиков температуры значения усиливаются и оцифровываются при помощи аналого-цифрового преобразователя MAX6675.

Датчик расхода теплоносителя – цифровой, основанный на эффекте Холла. По количеству зарегистрированных импульсов прерываний в единицу времени определяется скорость потока жидкости и её расход.

Измерения расхода и значений температур теплоносителя на входе и выходе ВЧ-нагрузки дают возможность определить значения тепловой мощности, отводимой от керамического элемента системой охлаждения. Калибровка ВЧ-измерений проводилась на переменном токе 50 Гц подачи на устройство соответствующей мощности [12]. На рисунке 8 представлен график отношения $P_{\text{теп}}/P_{\text{эл}}$ мощности, измеренной на нагрузке с помощью вольтметра и амперметра, к мощности, определяемой по датчикам перепада температуры и расхода жидкости в зависимости от величины отводимой мощности $P_{\text{теп}}/P_{\text{max}}$, где $P_{\text{max}} = 5$ кВт. Время установления показаний не превышает одной минуты на мощностях ниже 1 кВт, и 10-и минут на максимальной мощности.

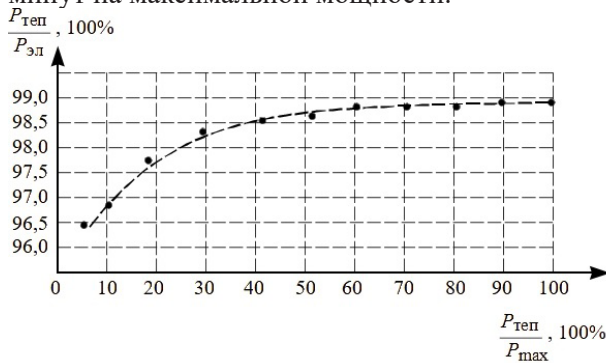


Рисунок 8 – Зависимость отношения мощностей $P_{\text{теп}}/P_{\text{эл}}$ к отношению мощностей $P_{\text{теп}}/P_{\text{max}}$

Figure 8 – Dependence of the ratio of powers $P_{\text{therm}}/P_{\text{el}}$ on of the ratio powers $P_{\text{therm}}/P_{\text{max}}$

Как следует из графика зависимости данное отношение достаточно близко к 100 %, особенно на больших уровнях мощности, что указывает на эффективность работы контура охлаждения.

Заключение

Представлена разработка измерителя ВЧ-сигнала большой мощности методом определения параметров охлаждающей жидкости. Предложенная электродинамическая модель ВЧ-нагрузки учитывает её технологические и конструктивные особенности – наличие слоёв поглощающего мощность пиролитического углерода и движущегося теплоносителя (воды), наличие которых существенно влияет на величину коэффициента стоячей волны по напряжению. Для экспериментальной проверки разработана и изготовлена двухконтурная замкнутая система охлаждения, позволяющая обеспечить уровень рассеиваемой ВЧ-мощности до 5 кВт. Также рассмотрены процессы, влияющие на эффективность преобразования ВЧ-мощности в тепловую и, соответственно, на точность измерений. В результате оптимизации системы точность измерений составила более 95 %.

Список использованных источников

1. Попов, И.А. Физические основы и промышленное применение интенсификации тепло-обмена: Интенсификация теплообмена: монография / И.А. Попов, Х.М. Махьянов, В.М. Гуреев; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
2. Власова, К.В. Структурная схема измерительного стенда для измерения электрической мощности калориметрическим методом / К.В. Власова // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 4. – С. 987–991.
3. Killinger A., Gantenbein G., Illy S., Ruess T., Weggen J., Martinez-Garcia V. Plasma Spraying of a Microwave Absorber Coating for an RF Dummy Load. THE Coatings, 11(7):801.
DOI: 10.3390/COATINGS11070801
4. Jiang H.C. Microwave power thin film resistors for high frequency and high power load applications / H.C. Jiang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 97, No. 17. – P. 173504-3.
DOI: 10.1063/1.3507883
5. Ryu S.K. High-voltage ultra wideband coaxial load with distributed ceramic-carbon-rod resistor / S.K. Ryu [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, No. 3. – Pp. 681–684.
DOI: 10.1109/TEMC.2012.2197001
6. Кириллов П.Л. Теплообмен в турбулентном потоке. Ч. 2. Распределение скорости и температуры / П.Л. Кириллов // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122. – № 4. – С. 192–203.