

# Экспериментальная установка для исследования высокочастотных устройств

А.С. Иванов, А.Д. Тупицын

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** представлены результаты разработки и реализации экспериментальной установки для исследования высокочастотных устройств промышленного нагрева сред с переменным волновым сопротивлением. Установка обеспечивает измерение коэффициента отражения при выходной мощности до 100 Вт на частоте 13,56 МГц.

**Ключевые слова:** высокочастотные устройства, измеритель коэффициента отражения, высокочастотный генератор, ламповый усилитель мощности, частота 13,56 МГц, устройство согласования

## 1. Введение

Сегодня в промышленности востребовано технологическое оборудование, объединяющее наукоемкие технологии и устройства. Разработка универсального высокочастотного оборудования обеспечивается и аналитическими приборами, и высококвалифицированными кадрами. Однако для апробации инновационных технологий не хватает специализированных установок, учитывающих особенности технологии.

Данная статья посвящена разработке и созданию экспериментальной установки для исследования высокочастотных устройств для нагрева сред с переменным волновым сопротивлением.

## 2. Блок-схема установки

Блок-схема экспериментальной установки (рис. 1) содержит генератор промышленной частоты 1, устройство для измерения коэффициента отражения нагрузки 2, устройство автоматического согласования нагрузки 3, устройство управления 4 и нагрузку 5.



Рисунок 1. Блок-схема высокочастотной экспериментальной установки.

## 3. Измеритель коэффициента отражения

В качестве основы для создания измерителя коэффициента отражения была выбрана описанная в [1] модель устройства для измерения мощности до 25 кВт. Принципиальная схема и эскиз устройства приводятся на рис. 2, а и б соответственно.

Измеритель представляет собой коаксиальную линию, в которой размещены трансформаторы тока T1 и T2. Высокочастотный ток Current в коаксиальной линии наводит напряжения на вторичных обмотках T1 и T2 (Rogowski Coil – катушка Роговского), пропорциональные току, цепи C1-C5, C2-C6 позволяют получать напряжения, пропорциональные напряжениям в линии передачи.

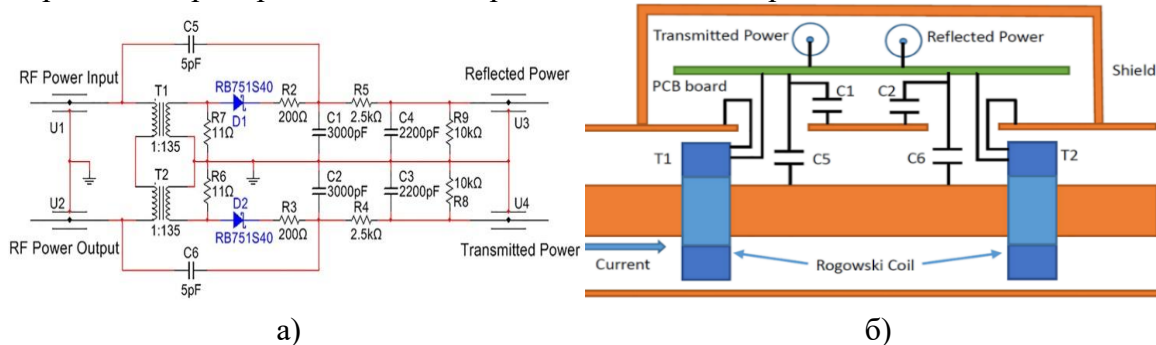


Рисунок 2. Принципиальная схема (а) эскиз измерителя коэффициента отражения (б).

На низкочастотных выходах Reflected Power и Transmitted Power формируются постоянные напряжения, пропорциональные отражённой и падающей волнам соответственно.

При проектировании макета измерителя было проведено моделирование в Microwave Office с целью оптимизации элементов схемы на рабочей частоте. В частности, был выбран коэффициент трансформации 1:50 для мощности 2 кВт на частоте 13,56 МГц при том, что в прототипе коэффициент трансформации составлял 1:135 для мощности 25 кВт на частоте 0,8 МГц. Расчёт трансформаторов тока проводился по методике, приведённой в [2]. Результаты моделирования в условиях согласования 50-омного тракта измерителя коэффициента отражения следующие: для напряжения на R8 6,162 В на R7 – 0,01033 В, что соответствует коэффициенту отражения 0,00168 или сопротивлению нагрузки 49,835 Ом.

На рис. 3 представлены графики расчётных зависимостей коэффициентов отражения нагрузки, определённые по выходным напряжениям измерителя от сопротивлений нагрузок при разных мощностях источника, а также зависимости коэффициента отражения, определённая с помощью Microwave Office.

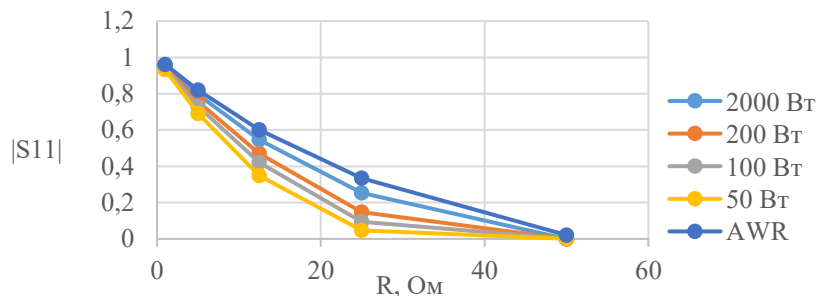


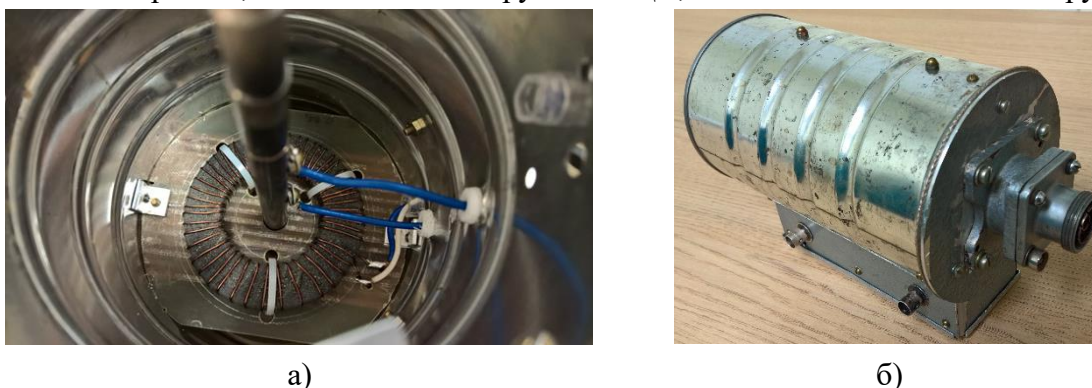
Рисунок 3. Расчётные зависимости коэффициентов отражения измерителя.

Приведенные графики характеризуют влияние нелинейностей вольтамперных характеристик диодов при уменьшении амплитуд сигналов на точность измерения и увеличение области нечувствительности измерителя вблизи согласованности нагрузки. Для увеличения точности следует увеличивать коэффициенты передачи цепей C1-C5, C2-C6 и снижать коэффициенты трансформации T1 и T2.

Трансформаторы тока изготовлены на основе ферритовых колец M200ВНП-3 типоразмерами K65x40x6 мм<sup>3</sup>, размещённых в цилиндрическом металлическом корпусе

на пластинах из стеклотекстолита (рис. 4. а).

Для исследования параметров измерителя коэффициентов отражения, внешний вид которого приведён на рис. 4, б, была собрана установка, состоящая из генератора, макета измерителя, согласованной нагрузки и АЦП, подключённого к компьютеру.



**Рисунок 4.** Размещение в корпусе трансформаторов тока и подключение конденсаторов С5, С6 к центральному проводнику коаксиальной линии измерителя (а); внешний вид макета измерителя коэффициентов отражения с разъёмами 7/16 на торцах (б).

В таблице 1 представлены результаты испытаний, полученные с помощью макета измерителя, теоретические значения коэффициентов отражения от различных нагрузок и измеренные с помощью анализатора микроволновых цепей R&S ZVB-8. Здесь  $U_{\text{вых.пад.}}$  – напряжение на выходе канала падающей волны,  $U_{\text{вых.отр.}}$  – отражённой.

**Таблица 1.** Результаты измерений

Нагрузка	Измеренные напряжения, В		Коэффициент отражения, дБ		
	$U_{\text{вых.пад.}}$ , В	$U_{\text{вых.отр.}}$ , В	Макет	R&S	Теоретически й
Трансформаторы тока на ферритовых кольцах с $\mu = 200$ размерами 60x45x5мм <sup>3</sup>					
50 Ом, (описана в п. 4)	0,9	0,23	- 11,85	- 11,9	- ∞
Холостой ход	0,4	0,4	0		0
50 Ом (резистор)	0,9	0,14	- 16,16	- 15,04	- ∞
100 Ом (резистор)	3,8	1,3	- 9,32		- 9,54
200 Ом (резистор)	3,5	2	- 4,86		- 4,44
Трансформаторы тока размерами 60x45x5мм <sup>3</sup> без сердечника					
50 Ом (резистор)	0,66	0,19	- 10,82	- 15,04	- ∞

Данные, приведённые в таблице 1, показывают приемлемую точность измерений и позволяют сделать вывод о возможности использовать бескаркасные катушки трансформаторов тока для измерений при больших уровнях мощностей в тракте.

#### 4. Согласованная нагрузка

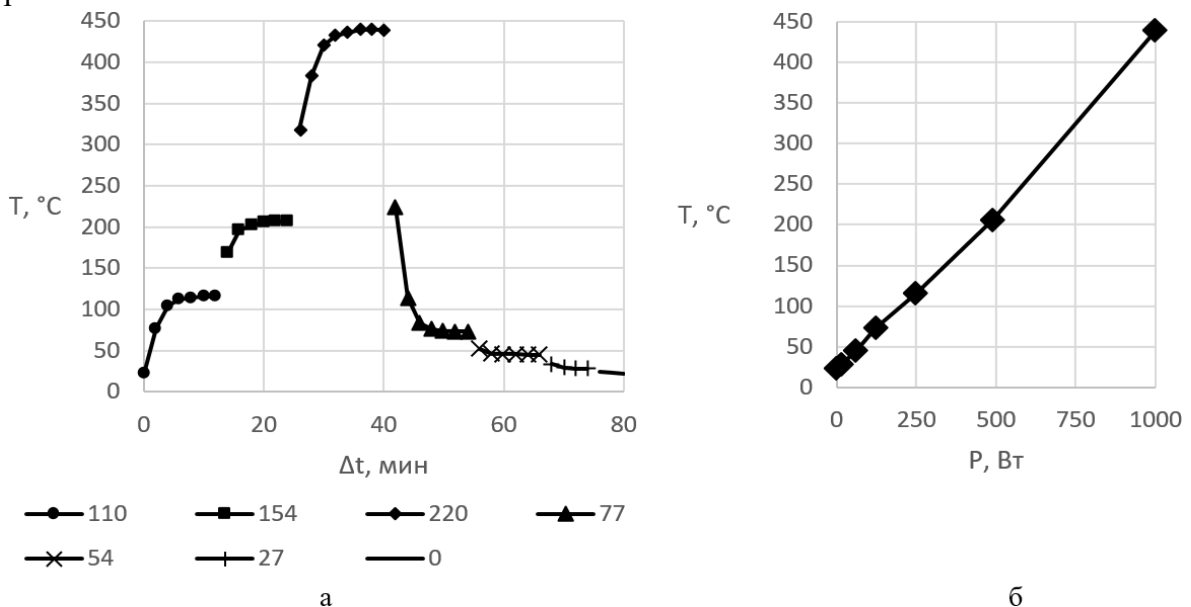
Макет согласованной нагрузки для калибровки установки и измерений (рис. 5) состоит из соосного с экраном нагревателя (1), пирометра на боковой поверхности экрана (2), цилиндрического экрана (3), диафрагмы воздушного охлаждения (4).



**Рисунок 5.** Макет согласованной нагрузки для калибровки установки и измерений.

Согласованная нагрузка изготовлена на основе стандартного нихромового нагревателя с охлаждающими рёбрами, длиной 600 мм, диаметром 12 мм, мощностью 1 кВт и позволяет измерять поглощаемую мощность. Нагреватель, охлаждаемый постоянным потоком воздуха, размещается в металлическом экранирующем корпусе и согласуется с трактом Г-образной LC-цепью на рабочей частоте установки. Поглощаемая нагрузкой мощность определяется по температуре нагревателя, измеряемой пирометром через малое отверстие. Коэффициент отражения нагрузки составлял – 12,1 дБ для результатов, представленных в таблице 1, а на момент публикации составляет – 21 дБ.

Для измерения поглощаемой мощности нагрузка калибруется путём подачи на неё мощности на частоте 50 Гц, что исключает отражения. Ток и напряжение на нагрузке измеряются цифровыми приборами. Температура нагрузки измеряется при достижении установившегося значения. Процесс калибровка нагрузки представлен на рис. 6.



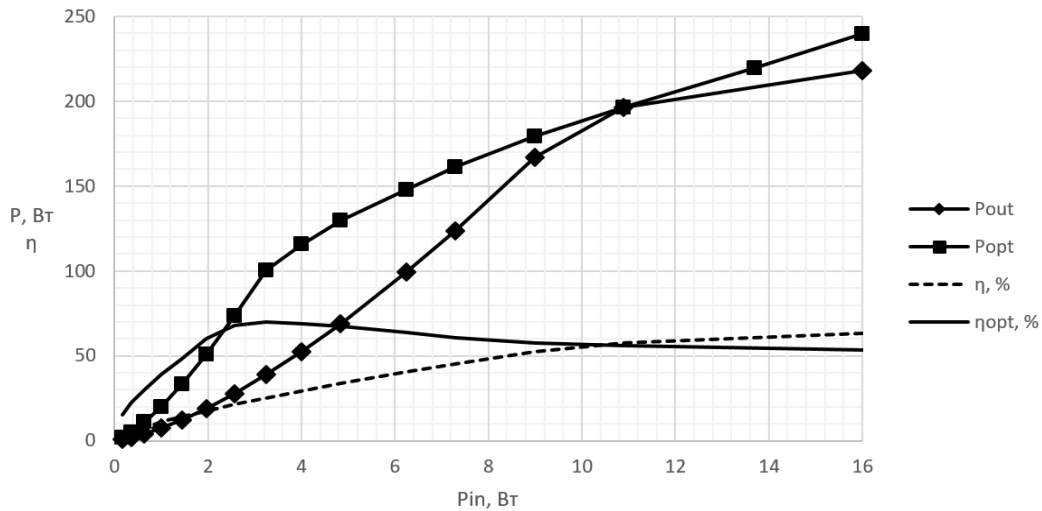
**Рисунок 6.** Зависимости температуры нагрузки  $T$  от времени  $\Delta t$  при различных приложенных напряжениях (а); калибровочная кривая нагрузки в виде зависимости температуры нагрузки  $T$  от поглощаемой мощности  $P$  (б).

Из рис. 6, б видно, что зависимость  $T$  от  $P$  – прямая линия. Соответственно для данной конструкции нагрузки коэффициент пропорциональности между температурой и мощностью постоянен. Недостатком конструкции является её невысокое быстродействие при измерениях.

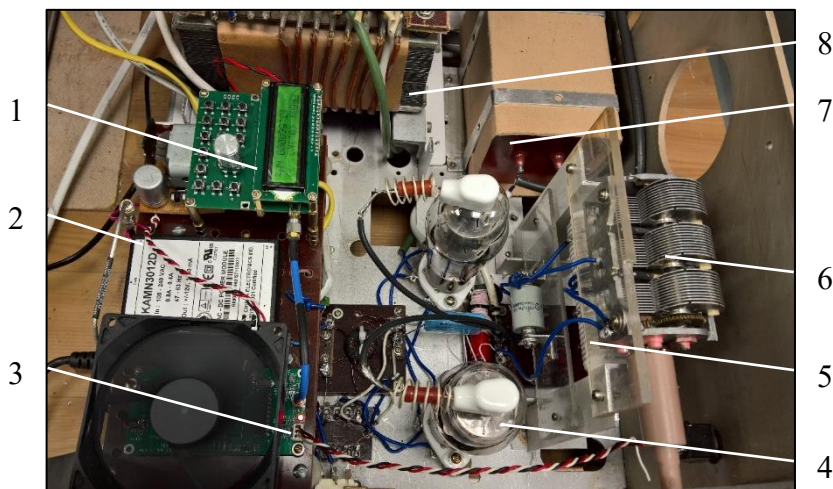
## 5. Генератор

Генератор экспериментальной установки включает высокостабильный задающий твердотельный генератор, предварительный твердотельный усилитель и ламповый усилитель мощности собранный по двухтактной схеме [3] на тетрадах Г 807, выбранной благодаря её простоте и большей устойчивости ламповых усилителей к изменению нагрузки. Выбор двухтактной схемы определялся возможностью снижения уровня нежелательных спектральных составляющих при выходной мощности в десятки ватт, достаточной для предварительных исследований. Макет генератора создавался частично из готовых доступных устройств. Его выходная мощность и рабочие частоты могут быть изменены в зависимости от исследуемой технологии.

Схема усилителя мощности оптимизировалась с использованием SPICE-моделей [4]. Результаты приводятся на рис. 7 в виде зависимостей выходной мощности  $P$  и КПД  $\eta$  от входной мощности  $P_{in}$ . Допустимая выходная мощность составляет 100 Вт и ограничена максимальными токами анодов тетродов. Измеренная выходная мощность макета генератора, представленного на рис. 8, составляет 87 Вт на частоте 13,56 МГц.



**Рисунок 7.** Зависимости выходной мощности  $P_{out}$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  исходного усилителя мощности и оптимизированных  $P_{opt}$  и  $\eta_{opt}$ .



**Рисунок 8.** Макет генератора: 1 – задающий генератор, 2 – преобразователь питания, 3 – предварительный усилитель, 4 – тетрод, 5 – катушка индуктивности анодного контура, 6 – конденсатор переменной ёмкости анодного контура, 7 – конденсатор фильтра анодного питания, 8 – трансформатор питания.

## 6. Заключение

Экспериментальная установка для исследования высокочастотных устройств промышленного нагрева сред с переменным волновым сопротивлением прошла апробацию и подтвердила работоспособность. Планируется включение в состав экспериментальной установки устройства автоматического согласования с нагрузкой.

### Список литературы

1. Ming Liu, Hongshen Yi, Munan Lin, et al. Ion cyclotron resonance heating (ICRH) systems for the Keda Mirror with AXisymmetry (KMAX) // Rev. Sci. Instrum. – 2017. – Т. 88, 053505. DOI: 10.1063/1.4983801.
2. Colonel Wm. T. McLyman. Transformer and Inductor Design Handbook, Fourth Edition. – CRC Press, 2011.
3. [https://ra1ohx.ru/dvukhtaktnyj\\_usilitel\\_kv\\_na\\_2\\_lampakh\\_g\\_807?ysclid=m1zg6h61ml257526939](https://ra1ohx.ru/dvukhtaktnyj_usilitel_kv_na_2_lampakh_g_807?ysclid=m1zg6h61ml257526939).
4. [https://gist.githubusercontent.com/chanmix51/6947361/raw/57aa4f0baec33aaacdfa64d99f4e0a2434be1a4/tetrodes\\_pentodes.sub](https://gist.githubusercontent.com/chanmix51/6947361/raw/57aa4f0baec33aaacdfa64d99f4e0a2434be1a4/tetrodes_pentodes.sub).