

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет  
Кафедра общей физики  
Тюкавкин Андрей Викторович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Согласование генератора высокой частоты с плазменным  
эмиттером**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19310

**Научный руководитель:**

Маслаков Иван Дмитриевич

Оценка научного руководителя

*Отлично*

«14» декабря 2020 г.

**Преподаватель практикума**

Руменских М.С.

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Данная работа состоит из введения, теоретической части, практической части, анализа результатов и заключения. Общий объем работы – 14 страниц.

Целью работы является расчёт параметров согласующего устройства и конденсаторного экрана для согласования в ВЧ трактах.

Задачи исследования – изучить поведение различных типов согласования при меняющихся параметрах нагрузки, учитывая параметры высоковольтного развязывающего трансформатора.

Для решения поставленных задач была использован векторный анализатор цепей “Обзор - 804”. Были измерены и аналитически посчитаны характеристики согласующих устройств, сделан вывод об их применимости для согласования в условиях меняющейся нагрузки. Также рассмотрена конфигурация конденсаторного экрана и учтено влияние развязывающего трансформатора, измерены и вычислены параметры реального тракта передачи мощности.

Значимость данной работы состоит в увеличении передаваемой мощности путем согласования и подбора оптимальной конфигурации конденсаторного экрана для достижения необходимого резонанса.

Ключевые слова: согласование, ВЧ тракт, передача мощности, развязывающий трансформатор, конденсаторный экран.

# **Оглавление**

## **0.Введение**

## **1.Теоретическая часть**

**1.1** Определение сопротивления нагрузки для выделения на ней максимальной мощности.

**1.2** Расчет цепей согласования на пассивных элементах. Г-согласование.

**1.3** П-согласование.

## **2.Практическая часть.**

**2.1** Схема установки.

**2.2** Конденсаторный экран.

**2.3** Разделительный трансформатор

**2.4** Согласующее устройство

## **3.Анализ результатов и графики.**

## **4.Заключение.**

## **Введение.**

Плазменный эмиттер повсеместно используется в физике плазмы для генерации в больших объемах однородной плазмы при низких давлениях газа.

Чтобы максимально эффективно передавать мощность в нагрузку необходимо оптимизировать тракт передачи мощности в плазменный эмиттер, улучшить согласование плазменного эмиттера с генератором при изменении выходной мощности. В связи с тем, что во время работы плазменного эмиттера, его характеристики сильно меняются, на согласующее устройство накладывается ряд дополнительных условий (широкая полоса согласования, незначительная расстройка при увеличении нагрузки). Так как входное сопротивление эмиттера имеет индуктивный характер с потерями, то мы не можем напрямую соединить его с 50  $\Omega$  кабелем без существенного ухудшения передачи энергии. Для согласования нагрузки (плазменный эмиттер) с генератором высоких частот на рабочей частоте используется схема согласования на сосредоточенных элементах.

Необходимой частью цепи согласования является разделительный трансформатор. Его задача изолировать выход генератора от высокого постоянного напряжения на эмиттере ( $\sim 50$  кВ).

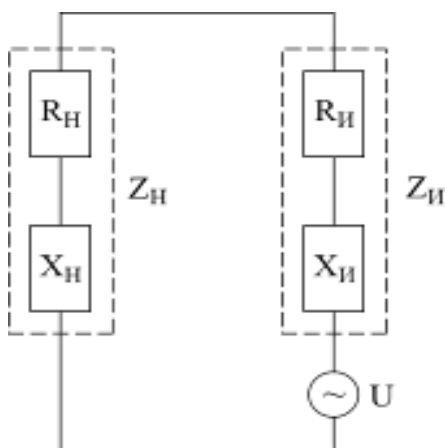
При работе ВЧ эмиттера на высоком и низком уровне мощности параметры плазменной нагрузки различны, например, индуктивность меняется  $\sim 5$  %, то и частота согласования меняется. Так как выбран режим работы генератора на фиксированной частоте, то с изменением выходной мощности нарушается согласование тракта.

Основной задачей данной работы является расчет элементов для построения тракта передачи мощности, выбор схемы согласующего устройства, определение параметров конденсаторного моста для наиболее эффективного согласования плазменного эмиттера с генератором высоких частот (ВЧ).

## 1. Теоретическая часть.

### 1.1 Определение сопротивления нагрузки для выделения на ней максимальной мощности.

Для цепи переменного тока определим величину сопротивления, которую нужно подобрать к источнику переменного тока, чтобы получить максимальную мощность, на нагрузке.  $R_{нагрузки}$  и  $R_{источника}$  можно разбить на активное и реактивное сопротивление.



Тогда импеданс этой цепи:

$$z = \sqrt{\square}$$

Ток в этой цепи:

$$i = \frac{u}{Z} = \frac{U}{Z} \cos \omega t$$

Выпишем значение мощности и усредним его за период.

$$p = i^2 R_n = \frac{U^2 R_n}{Z^2} \cos^2 \omega t = \frac{U^2 R_n}{Z^2} \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t)$$

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{2} \frac{U^2 R_n}{Z^2} = \frac{1}{2} \frac{U^2 R_n}{(R_u + R_n)^2 + (X_u + X_n)^2}$$

Максимальная мощность выделяется при компенсации реактивного сопротивления, т.е.  $X_u = -X_n$ .

$$P_{cp} = \frac{1}{2} \frac{U^2 R_n}{(R_u + R_n)^2}$$

Продифференцировав по  $R_u$  и приравняв производную нулю получим, что для выделения максимальной мощности необходимо взять  $R_n = R_u$ .

Сопротивление генератора высоких частот  $R_u = 50$  Ом, поэтому для получения максимальной мощности необходимо, чтобы сопротивление всей остальной цепи равнялось 50 Ом. Для этого и используется согласование в данной работе.

## 1.2 Расчет цепей согласования на пассивных элементах. Г-согласование

Чтобы понять основные свойства согласующих Г- и П-образных цепей на реактивных элементах и создать устройство в первую очередь необходимо использовать следующий принцип: произвольную цепь из последовательно включенных активного  $R_q$  и реактивного  $X_q$  сопротивлений можно заменить эквивалентной цепью, состоящей из параллельно включенных активного  $R_g$  и реактивного  $X_g$  сопротивлений. Для последовательной цепи  $Z = R_q + jX_q$ .

$$|Z| = \sqrt{R_q^2 + X_q^2} \quad (1)$$

Для параллельной цепи  $Z = \frac{j(R_g X_g)}{R_g + jX_g}$ , а значит,

$$|Z| = \frac{X_g R_g}{\sqrt{R_g^2 + X_g^2}} \quad (2)$$

Приравняв (1) и (2) получим:

$$\sqrt{R_q^2 + X_q^2} = \frac{X_g R_g}{R_g + jX_g} \quad (3)$$

Определим понятие добротности для цепей.  $Q = 2\pi fW/P$ , где  $W$  - энергия, запасенная в колебательном контуре,  $P$  - рассеиваемая мощность,  $f$  - резонансная частота колебаний.

Тогда для последовательной цепи

$$Q = \frac{X_q}{R_q} \quad (4)$$

Для параллельной цепи

$$Q = \frac{R_g}{X_g} \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (3) в итоге получим

$$Q^2 + 1 = \frac{R_p}{R_s} \quad (6)$$

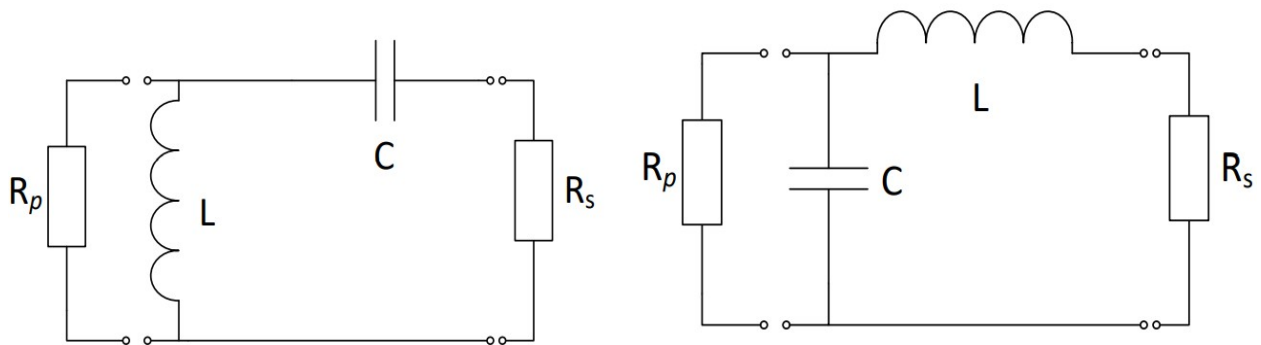


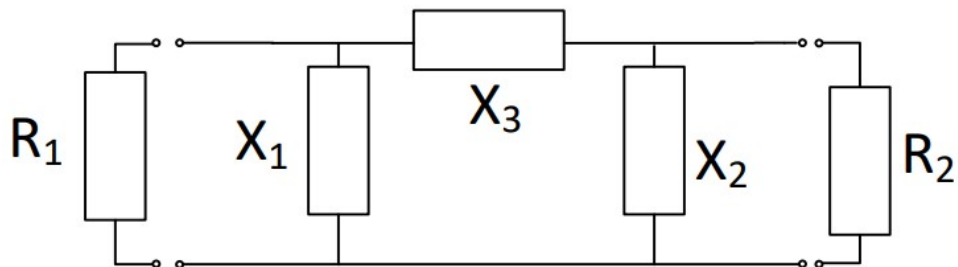
Схема Г-согласования.

Из (6) следует, что два активных сопротивления могут быть согласованы, если обеспечивается требуемая добротность цепи при выполнении условия  $R_g < R_q$ .

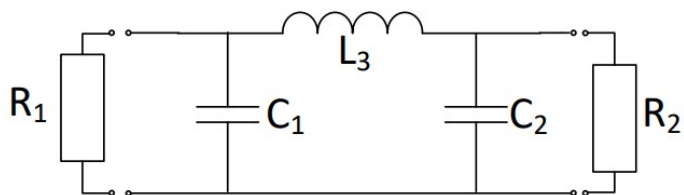
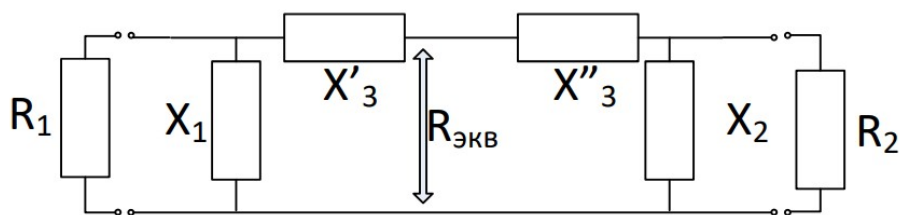
Недостатком согласующих LC-цепей является тот факт, что добротность зависит только от отношения входного и выходного сопротивлений, а значит сопротивления, согласуемые такими устройствами должны заметно отличаться. Недостатком Г-согласования является невозможность выбирать добротность нашей цепи. Это очень сильно сужает диапазон частот на которых возможно согласование источника с плазменным эмиттером. Плазменный эмиттер является катушкой с газом внутри. При подаче на него напряжения внутри катушки образуется плазма, которая экранирует магнитное поле, т.е. внутри нашей индуктивности образуется еще одна индуктивность. Индуктивность плазмы крайне сложно оценить теоретически, поэтому для успешного согласования нужен максимально широкий диапазон частот, в котором это согласование осуществляется. По этой причине невозможность регулировать добротность Г-согласования является очень весомым недостатком.

### 1.3 П-согласование

Теперь рассмотрим схему П-согласования.



Для удобства расчетов разделим эту схему на две Г-цепочки, нагруженных на  $R_{\text{экв}}$ .



Пользуясь формулами приведенными выше для расчетов Г-цепочек.

Вычислим  $R_{\text{экв}}$  для левой Г-части .

Зная значения  $R_1$  и  $R_2$  и добротности  $Q_1$  находим

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1}{Q_1^2 + 1} \quad (21)$$

Далее, используя (4) и (5) определяем

$$X'_3 = Q_1 R_{\text{экв}} \quad (22)$$

$$X_1 = R_1 Q_1 \quad (23)$$



Для правой Г-части из (6) следует

$$Q_2^2 = \frac{R_2}{R_{\text{экв}}} - 1 \quad (24)$$

С помощью (24) из (4) и (5) находим

$$X_3'' = R_{\text{экв}} Q_2 \quad (25)$$

$$X_2 = R_2 Q_2 \quad (26)$$

В конце для П-согласователя вычислим  $X_3$ :  $X_3 = X_3' + X_3''$

П-согласование является более гибким аналогом Г-согласования, по причине того, что позволяет изменять добротность цепи, что обеспечивает больший диапазон частот для согласования.

Для согласования плазменного эмиттера в этой работе будет использоваться именно П-согласование, как наиболее эффективное.

## **2. Практическая часть.**

### **2.1 Схема установки**

Источник запитан от генератора радиочастот, сконфигурированного как модульная система, состоящая из одинаковых радиочастотных модулей «RF Module» с суммированием мощности в нагрузке, блоков управления и источника питания постоянного тока [1]. Управление мощностью ВЧ на нагрузке осуществляется путем регулировки напряжения источника питания постоянного тока. Напряжение питания задается аналоговым сигналом, выдаваемым системой управления.

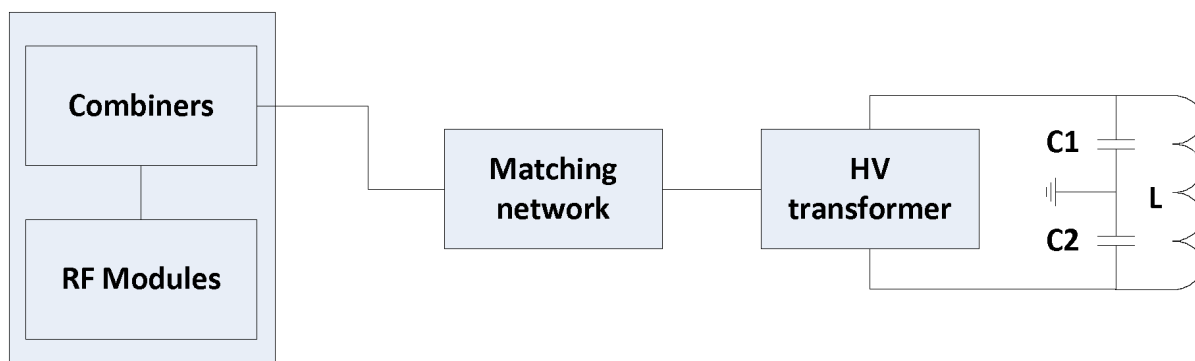


Рис.1 Общая схема установки

Выходной сигнал генератора подается через фидер в «Matching network», который преобразует последующее сопротивление цепи в характеристический импеданс фидера. Затем сигнал через высоковольтный разделительный трансформатор «HV Transformer» подается на плазменный эмиттер, который находится под потенциалом 30-60 кВ. Индуктивность эмиттера плазмы  $L$ , емкости  $C_1$  и  $C_2$  образуют резонансный контур, настроенный на рабочую частоту 4 МГц. Выходной сигнал «Combiner2» измеряется датчиками напряжения и тока. Сигналы от этих датчиков подаются на блок «RF-Control» для контроля частоты и измерения выходной мощности, импеданса нагрузки, КСВ и т. д.

## 2.2 Конденсаторный экран

Для создания резонансного контура с плазменным эмиттером и изменения диапазона амплитуд синусоидального сигнала из  $[0 - 2A]$  в  $[-A - A]$  в работе был рассчитан и сконструирован конденсаторный экран. Для расчетов необходимых емкостей использовался векторный анализатор цепей.

Метод сборки конденсаторного экрана:

1. Подсоединили 4 конденсатора на **470 мФ**.
2. С помощью векторного анализатора и источника синусоидального сигнала получили АЧХ конденсаторного экрана.

3. По АЧХ определили частоту резонанса, с помощью добавления емкостей в конденсаторный экран добиваемся резонанса на частоте 4MHz.

В итоге была получена АЧХ следующего вида:

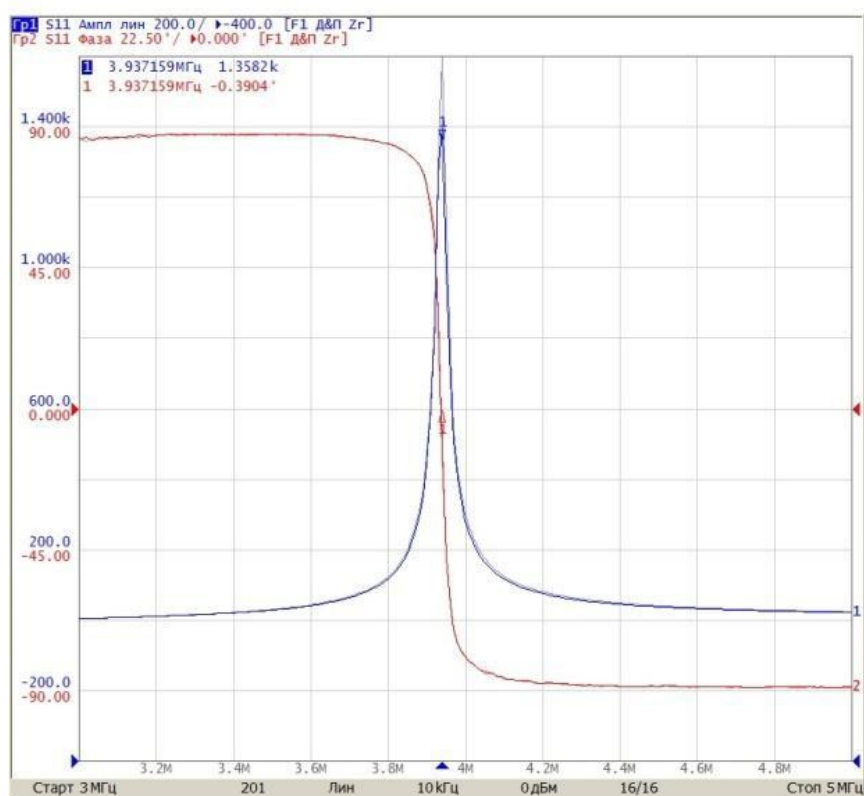


Рис.2 АЧХ конденсаторного экрана.

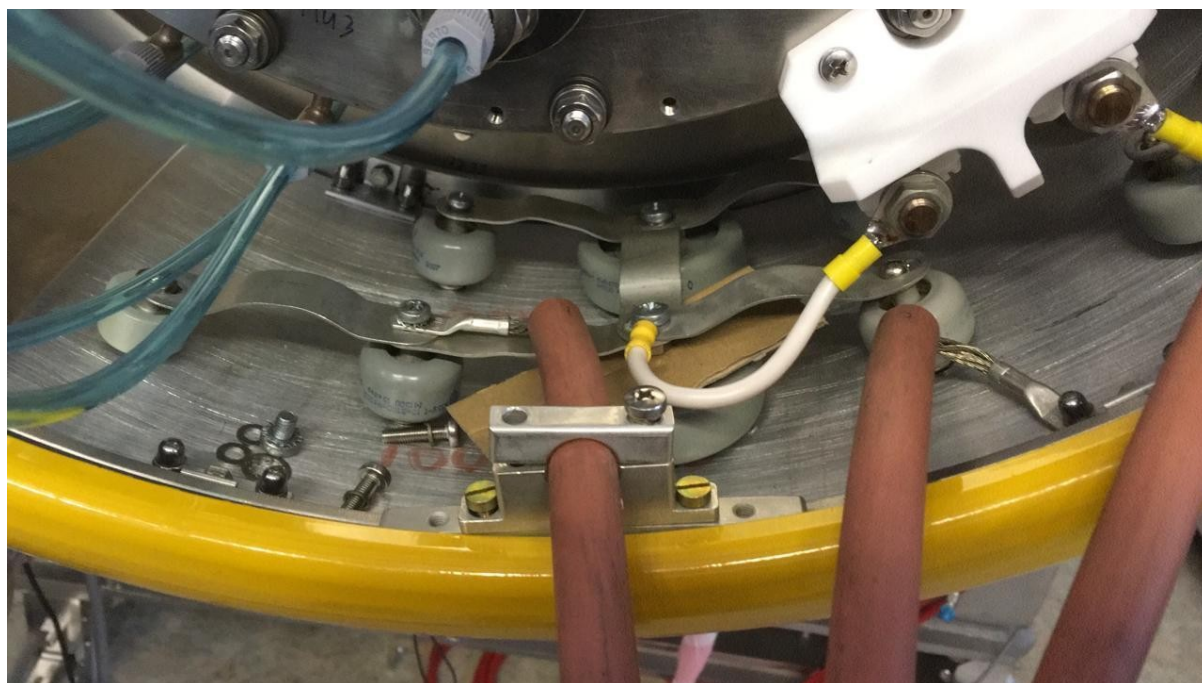


Рис3.Конденсаторный экран.

### 2.3 Разделительный трансформатор

Одним из важнейших элементов схемы является разделительный (изолирующий) трансформатор. Так как плазменный эмиттер находится под высоким потенциалом (30-60 кВ) его необходимо изолировать от остальной установки. Также соотношение витков 1 к 2 позволяет увеличить диапазон колебаний входного импеданса в 4 раза, что значительно упрощает задачу согласования.

### 2.4 Согласующее устройство

Для успешного согласования необходимо смоделировать наличие в эмиттере плазмы. В нулевом приближении это можно сделать путем параллельного подключения резистора 800 Ом и индуктивности 60 мкГн, которая создает эффект экранирования магнитного поля плазмой.

Основой согласующего устройства является П- согласователь представимый в виде CLC-контура. Векторным анализатором цепей измерили импеданс цепи. После этого высчитали параметры согласующего устройства. Собрали и подключили согласующее устройство. Измерили итоговый импеданс, получили  $50 \pm 0.5$  Ом.

Параметры согласующего устройства:

$C1 = 2600 \text{ пФ}$

$C2 = 458 \text{ пФ}$

$L3 = 1.9 \text{ мкГ}$

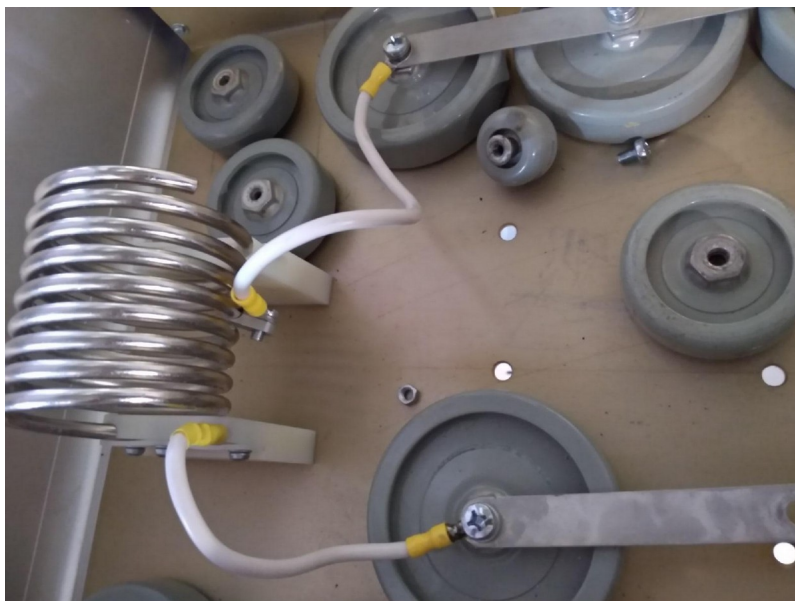


Рис.4. Согласующее устройство.

### 3. Анализ результатов и графики

В ходе работы был собран конденсаторный экран и П-согласователь. Схема была подключена и проверена на “холостом ходе” без плазмы, с дополнительной нагрузкой и индуктивностью. После этого финальная проверка- согласование со включенным плазменным эмиттером. Результаты согласования представлены АЧХ снятыми с помощью векторного анализатора цепей. Согласование прошло успешно; векторный анализатор на частоте 4МГц выдает импеданс 50.442 Ома, сдвига по фазе практически не наблюдается.

Полученная АЧХ представлена ниже:

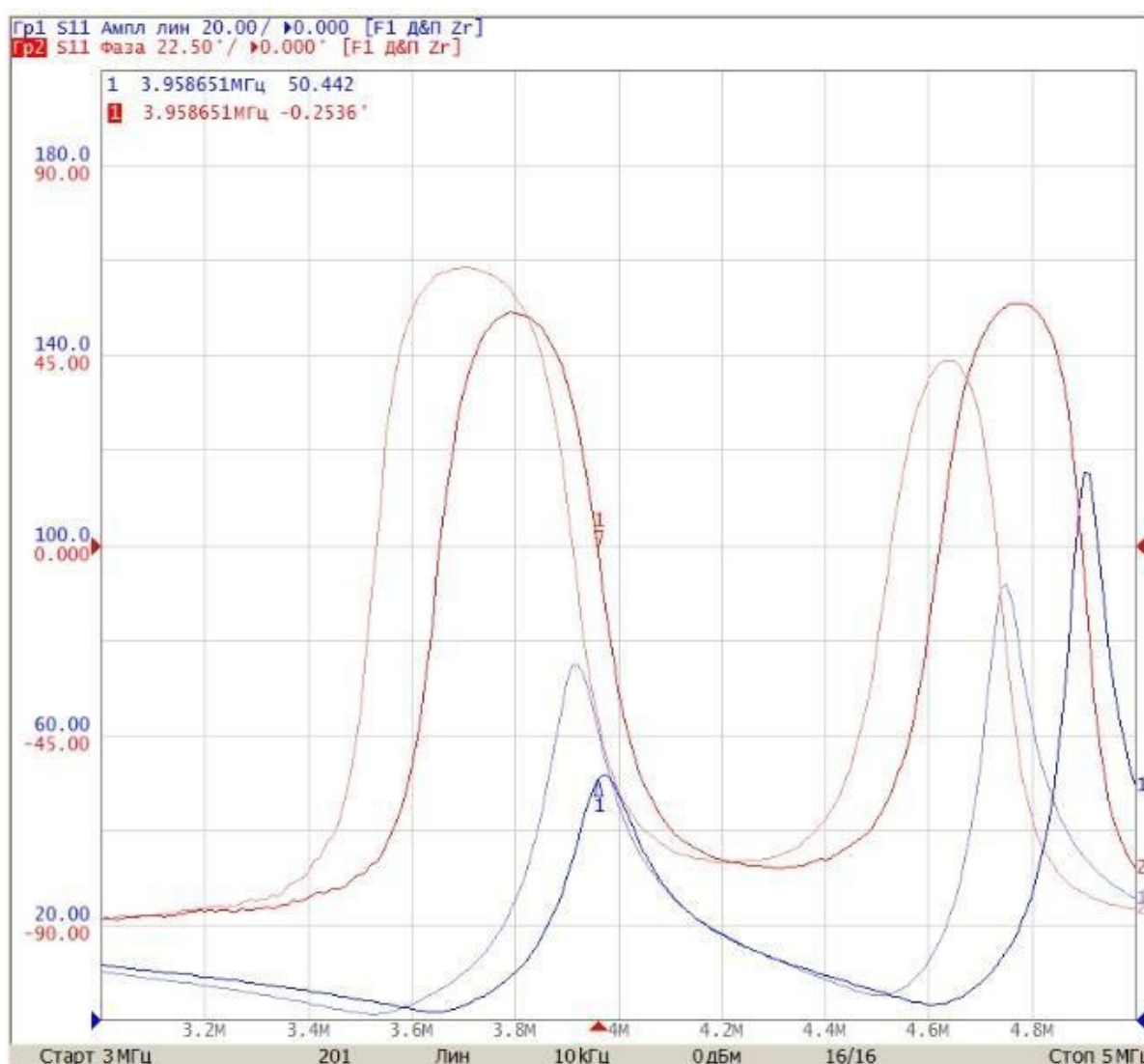


Рис.5. АЧХ плазменного эмиттера после согласования.

### 4. Заключение

Для максимально эффективной передачи мощности был рассчитан и собран тракт передачи мощности. Входное сопротивление этого тракта с учетом подключенного эмиттера должно попадать в диапазон  $50 \pm 0.5$  Ом.

Также крайне желательно, чтобы после согласования сдвиг по фазе был незначителен или вовсе отсутствовал. Сдвиг по фазе считается незначительным, если попадает в диапазон  $0-5^\circ$ .

Как видно из АЧХ плазменного эмиттера после согласования на частоте 4МГц входное сопротивление тракта с учетом эмиттера 50.442 Ом, сдвиг по фазе  $-0.2536^\circ$ . Оба значения попадают в заданный диапазон, значит согласование можно считать успешным.