

На правах рукописи

Морозов Виктор Александрович

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ НАГРУЗОЧНЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЁМКОСТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЫ**

Специальность

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Ижевск – 2007

Работа выполнена в Институте прикладной механики УрО РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Михеев Геннадий Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ломаев Гелий Васильевич

доктор технических наук,
Захаров Владимир Анатольевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Защита состоится «14» ноября 2007 г. в 16⁰⁰ часов в ауд. 2 на заседании диссертационного совета Д 212.275.03 при Удмуртском государственном университете по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу:
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного университета.

Автореферат разослан «12» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н., доцент



П.Н. Крылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию и моделированию высокочастотных (ВЧ) нагрузочных систем (НС) для ёмкостного возбуждения плазмы, используемых в экспериментальной физике для нанесения и травления тонких плёнок и ионно-плазменной модификации материалов.

Объект исследования – система элементов ВЧ электрической цепи.

Предмет исследования – методы расчёта элементов НС для ёмкостного возбуждения плазмы.

Актуальность темы. В настоящее время в промышленности, экспериментальной физике и химии проявляется большой интерес к ВЧ ёмкостным разрядам. Высокочастотный ёмкостной разряд используется в лазерной и осветительной технике для создания активной генерирующей среды; в промышленности он применяется для нанесения и травления тонких плёнок, плазменной обработки и модификации материалов, а также для синтеза и утилизации различных химических веществ. В последнее время ёмкостной ВЧ разряд используется для генерирования «неидеальной» плазмы (например, пылевой) [Л1], которая изучается не только в земных условиях с целью получения наноразмерных объектов, но и в условиях микрогравитации, где более благоприятны условия, влияющие на кристаллизацию пылевой компоненты и фазовые переходы различных типов плазмы.

Технологические процессы с применением ВЧ ёмкостной плазмы осуществляются на вакуумных установках, имеющих ВЧ системы, которые предназначены для генерирования и оптимальной передачи энергии в нагрузку. Типичная ВЧ система состоит из генератора, линии передачи энергии (ЛПЭ), цепи согласования (ЦС) и нагрузки (магнетрона или плазменного конденсатора). При этом ЦС (согласующее устройство) и нагрузка образуют НС [Л2]. В нагрузке выделяется мощность P_L , равная разнице падающей P_i и отражённой P_r мощностей. ЦС должны обеспечивать выполнение условия $P_r \approx 0$, что возможно, если в состав НС входит хотя бы элементарный измеритель коэффициента стоячей волны (КСВ). Однако в экспериментальных установках для осаждения тонких плёнок измерители КСВ (или аналогичные им по назначению приборы), как правило, отсутствуют [Л3,Л4].

С другой стороны анализ научной литературы показывает, что ВЧ ёмкостная плазма изучается в основном с точки зрения её технического применения; работы по исследованию высокочастотных НС, используемых в экспериментальной физике и плазменных технологиях, с целью разработки методик их расчёта в литературе практически отсутствуют. Исключением является труд Самойлова С.А. [Л5], в котором рассмотрена задача согласования ВЧ генератора с активной средой CO_2 -лазера, затрагивающая проблему моделирования НС для плазменных технологий, но не решающая её.

Таким образом, изучение высокочастотных НС для экспериментальной физики и плазменных технологий, а также разработка новых методов их расчёта актуально.

Цель работы – исследование и моделирование высокочастотных НС для ёмкостного возбуждения плазмы.

В связи с этим поставлены **следующие задачи**:

1. Моделирование цепей согласования (П-контур, параллельного колебательного контура с неполным включением и контура с делением ВЧ мощности), используемых в НС для ёмкостного возбуждения плазмы.
2. Разработка методик расчёта схем замещения для распылительного магнетрона и плазменного конденсатора, имеющего обкладки сложной геометрии.
3. Экспериментальное исследование зависимости ВЧ напряжения и постоянного смещения на распылительном магнетроне от активной мощности.
4. Исследование влияния материала покрытия на активное сопротивление проводников на высокой частоте для минимизации потерь энергии в электрических цепях НС.
5. Разработка ваттметра падающей, отражённой и активной мощностей для настройки цепи согласования ВЧ систем.

Методы исследований. В диссертации использован комплексный подход, включающий теоретические и экспериментальные методы исследований. В экспериментальных исследованиях применялись статистические методы обработки результатов экспериментов.

Достоверность результатов исследований и работоспособность созданных систем и устройств подтверждена экспериментальными исследованиями и практически выполненными разработками.

Научная новизна диссертационной работы заключается в исследовании ВЧ нагрузочных систем для ёмкостного возбуждения плазмы, применяемых для нанесения и травления тонких плёнок и модификации материалов, и включает в себя:

1. Разработку методик расчёта П-контура, параллельного колебательного контура с неполным включением, контура с делением ВЧ мощности, схем замещения распылительного магнетрона и плазменного конденсатора с обкладками сложной геометрии, поперечного сечения электрических проводников и ваттметра ВЧ мощности.
2. Определение зависимости типа возбуждаемого резонанса от величин согласуемых сопротивлений, ёмкости на выходе контура и частоты электромагнитных колебаний.
3. Определение зависимости ВЧ напряжения на распылительном магнетроне от мощности, рассеиваемой на магнетроне.
4. Установление экстремальной зависимости активного сопротивления проводника с покрытием на ВЧ от удельного сопротивления и магнитной проницаемости материалов.

Реализация и внедрение работы. Результаты диссертационной работы использованы при разработке высокочастотной системы установки вакуумного магнетронного напыления для ЗАО “Ижевский завод мебельной фурнитуры”.

Положения, выносимые на защиту

1. Для НС с использованием П-контура или параллельного колебательно-го контура с неполным включением безразмерная входная ёмкость (или индуктивность) контура зависит не от типа возбуждаемого в контуре резонанса, а от согласуемых сопротивлений, ёмкости (или индуктивности) на выходе контура и частоты электромагнитных колебаний.

2. Для НС с использованием П-контура тип возбуждаемого резонанса зависит от согласуемых сопротивлений, частоты, а также выходной ёмкости контура. Однако существует такое сочетание указанных параметров, при котором резонансные колебания в контуре не возбуждаются.

3. ВЧ напряжение на распылительном магнетроне с мишенями из кварцевого стекла, моноалюмината неодима, титана и тантала описывается функциями вида $U = a P_L^b$, где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от материала мишени, индукции магнитного поля на поверхности мишени и площади контакта мишени с плазмой.

4. На зависимости активного ВЧ сопротивления проводника с проводящим покрытием от толщины существует экстремум в точке $z_{1 \text{ ext}} \approx \pi \delta_1 / 2$, где δ_1 – глубина скин-слоя материала покрытия.

5. ВЧ ваттметры, использующие датчики тока и напряжения должны удовлетворять условию равенства сигналов датчиков тока и напряжения при отсутствии отражённой волны.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на научно-практической конференции “Актуальные проблемы аграрного сектора” (Ижевск, 1997); VI-й Российской университетско-академической научно-практической конференции (Ижевск, 2004); Всероссийской научно-практической конференции “Современные проблемы аграрной науки и пути их решения” (Ижевск, 2005); Всероссийской научно-практической конференции “Научное обеспечение реализации национальных проектов в сельском хозяйстве” (Ижевск, 2006); III научно-практической конференции “Проблемы механики и материаловедения” (к 15-летию ИПМ УрО РАН) (Ижевск, 2006); Международной научной конференции “75 лет высшему образованию в Удмуртии” (Ижевск, 2006); 7-й Международной конференции “Вакуумные нанотехнологии и оборудование” (Харьковская нанотехнологическая ассамблея) (Харьков, Украина, 2006); Международной научно-практической конференции “Нанотехнологии – производству - 2006” (Фрязино, 2006).

Публикации. Материалы диссертационной работы полностью отражены в научных изданиях. Общее число публикаций – 15, в том числе: статьи в рецензируемых журналах – 6; статьи в журнале, сборнике и материалах конференций – 4; информационный листок о научно-техническом достижении – 1; тезисы докладов конференций – 4.

Личный вклад. Теоретические и экспериментальные результаты, изложенные в диссертации, получены лично соискателем. Постановка задач исследований, определение методов их решения и анализ результатов экспериментов проведены совместно с соавторами опубликованных работ при непосредственном участии соискателя.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 183 наименований и приложения. Диссертация изложена на 156 страницах, содержит 56 рисунков, 10 таблиц и приложение. В приложении предоставлены документы о практическом использовании результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулировку целей и задач, описание научной новизны, практическую значимость, защищаемые положения и раскрывает структуру диссертации.

В первой главе «Высокочастотные системы для ёмкостного возбуждения плазмы» представлен обзор исследований и разработок, раскрывающих возможности экспериментального и технического применения ВЧ ёмкостного разряда. Рассмотрены основные физические свойства плазмы, методы генерирования плазмы; описана структура ВЧ системы (рисунок 1) и, в соответствии с [Л2], определена нагрузочная система (НС), в состав которой входят ЦС, одна или несколько плазменных нагрузок, а также могут входить ваттметры проходящей мощности. Проанализированы особенности устройств, входящих в ВЧ системы и НС (ВЧ генераторы, устройства согласования, плазменные конденсаторы, распылительные магнетроны, ВЧ ваттметры и проводники). Рассмотрен скин-эффект для ВЧ проводников [Л6]. Показано, что методики расчёта ЦС, используемые в практике расчёта согласующих устройств ёмкостного возбуждения плазмы, неудовлетворительны, т.к. в них не учитывается неоднозначность возбуждаемого в резонансном контуре типа резонанса (параллельного или последовательного) и имеются существенные трудности, связанные с расчётом добротности контура, работающего на плазменную нагрузку. Рассмотрена методика расчёта ЦС, предложенная Головковым А.А. [Л7]. Методика применяется для расчёта одночастотных и двухчастотных сумматоров и делителей мощности, но она не адаптирована для расчёта ЦС нагрузочных систем ёмкостного возбуждения плазмы.

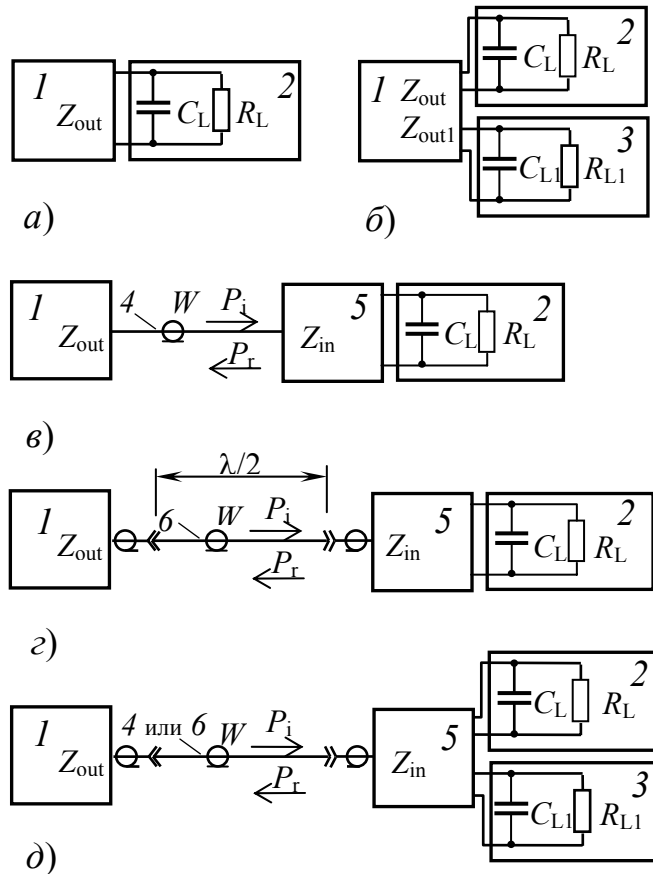


Рисунок 1 – Структурные схемы высокочастотной системы для ёмкостного возбуждения плазмы[1]: 1 – ВЧ генератор, 2 и 3 – плазменные нагрузки, 4 – фидер, 5 – устройство согласования, б – коаксиальный кабель.

Второй раздел посвящен рассмотрению особенностей устройств, входящих в ВЧ системы и НС (ВЧ генераторы, устройства согласования, плазменные конденсаторы, распылительные магнетроны, ВЧ ваттметры и проводники). Рассмотрен скин-эффект для ВЧ проводников [Л6]. Показано, что методики расчёта ЦС, используемые в практике расчёта согласующих устройств ёмкостного возбуждения плазмы, неудовлетворительны, т.к. в них не учитывается неоднозначность возбуждаемого в резонансном контуре типа резонанса (параллельного или последовательного) и имеются существенные трудности, связанные с расчётом добротности контура, работающего на плазменную нагрузку. Рассмотрена методика расчёта ЦС, предложенная Головковым А.А. [Л7]. Методика применяется для расчёта одночастотных и двухчастотных сумматоров и делителей мощности, но она не адаптирована для расчёта ЦС нагрузочных систем ёмкостного возбуждения плазмы.

Вторая глава «Высокочастотные нагрузочные системы» состоит из трёх разделов. В *первом разделе* рассмотрены принципы построения НС с позиции измерения ВЧ мощности. Для этого был проведён анализ известного соотношения для импеданса Z длинной линии с постоянным волновым сопротив-

лением W нагруженной на цепь с импедансом Z_L [2]. Анализ показал, что для них возможны следующие варианты:

1. Нагрузка согласована с ЛПЭ ($Z_L = W$) и линия имеет произвольную длину. Тогда $Z = \text{Re } Z = W$, а для падающей и отражённой мощностей справедливости условия $P_i = P_L$ и $P_r = 0$ в любом её сечении.

2. Нагрузка не согласована с ЛПЭ ($Z_L \neq W$). В этом случае в различных сечениях линии, находящихся на расстоянии $l = \lambda n/2$ от нагрузки (λ – длина электромагнитной волны в линии, $n = 0, 1, 2, \dots$) сопротивления, токи, напряжения и мощности падающей и отражённой волн будут такими же, как и на нагрузке. Таким образом, применение линии передачи энергии, имеющей длину $l_0 = \lambda n/2$, позволяет по току и напряжению на входе линии (или на выходе) контролировать параметры нагрузки.

Анализ *длинной* ЛПЭ с $W \neq \text{const}$ показывает, что напряжения и мощности падающей и отражённой волн будут различными в разных сечениях линии, а объективным параметром является прошедшая (активная) мощность, которая не зависит от l .

Анализ *короткой* ЛПЭ (с $l_0 \leq \lambda/600$, при которой абсолютная величина разности сопротивлений линии на входе и на выходе не превышает 5% от Z_L) показал, что $Z \approx Z_L$. То есть сопротивление короткой ЛПЭ в произвольном её сечении практически не зависит от W и равно импедансу нагрузки. Очевидно, что последнее утверждение справедливо также для линии передачи, волновое сопротивление которой зависит от l . Следовательно, в общем случае для коротких ЛПЭ $\dot{U} = Z_L \dot{I}$, а токи, напряжения, мощности падающей и отражённой волн будут различными в разных сечениях линии, однако при этом $P_L = \text{const}$.

Таким образом, для ВЧ систем (см. рисунок 1), в которых соединение генератора с устройством согласования осуществляется полуволновым кабелем с $W = \text{const}$, ваттметр следует устанавливать на выходе генератора или на входе согласующего устройства; для линий $W \neq \text{const}$ ваттметр можно устанавливать в любом сечении линии, объективно измеряя при этом активную мощность.

Во *втором разделе* рассмотрены НС с применением П-контура (контура третьего вида) [1,3,4], параллельного колебательного контура с неполным включением со стороны генератора (контура второго вида) и со стороны нагрузки (контура первого вида) [5,6], а также контура с делением ВЧ мощности [1].

Приведены основные положения методики расчёта П-контура (рисунок 2) [1,4]. Предположено, что в ЦС отсутствуют потери энергии (контур – бездиссипативный) и вся энергия рассеивается на сопротивлении нагрузки. Условие согласования для ЦС с нагрузкой выглядят так:

$$\begin{cases} \text{Re } Z_{\text{in}} = W \\ \text{Im } Z_{\text{in}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $Z_{\text{in}} = \text{Re } Z_{\text{in}} + i \text{Im } Z_{\text{in}}$, i – мнимая единица. Для составляющих входного импеданса НС получено:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z_{\text{in}} &= \frac{R_L}{\beta^2} \frac{1 + \alpha^2}{1 + [(x - 1/\beta)(1 + \alpha^2) - \alpha]^2}; \\ \operatorname{Im} Z_{\text{in}} &= -\frac{R_L}{\beta} \frac{1 + [(1 + \alpha^2)x - \alpha][(1 + \alpha^2)x - (1 + \alpha^2)/\beta]}{1 + [(x - 1/\beta)(1 + \alpha^2) - \alpha]^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $x = \omega L/R_L$, $\beta = \omega C_1 R_L$, $\alpha = \omega C_2 R_L$, x – безразмерная индуктивность, β и

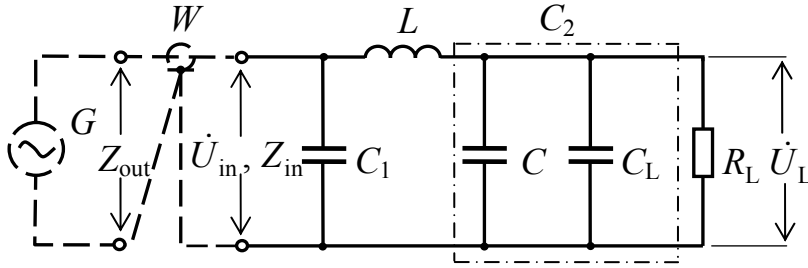


Рисунок 2 – Схема согласования радиочастотного кабеля с комплексной нагрузкой с применением П-контура: G – генератор, C – дополнительная выходная ёмкость контура, C_L – ёмкость нагрузки. Обозначения элементов в тексте.

α – безразмерные входная и выходная ёмкости, C_1 и C_2 – ёмкости на входе и выходе контура, L – индуктивность контура, ω – циклическая частота электромагнитных колебаний.

Решением системы уравнений (1) являются выражения, определяющие безразмерные индуктивности параллельного

x_{par} и последовательного x_{ser} резонансов в контуре:

$$x_{\text{par, ser}} = \frac{1}{2\beta} + \frac{\alpha}{1 + \alpha^2} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2\beta}\right)^2 - \left(\frac{1}{1 + \alpha^2}\right)^2}, \quad (3)$$

где независимо от типа резонанса β принимает значение

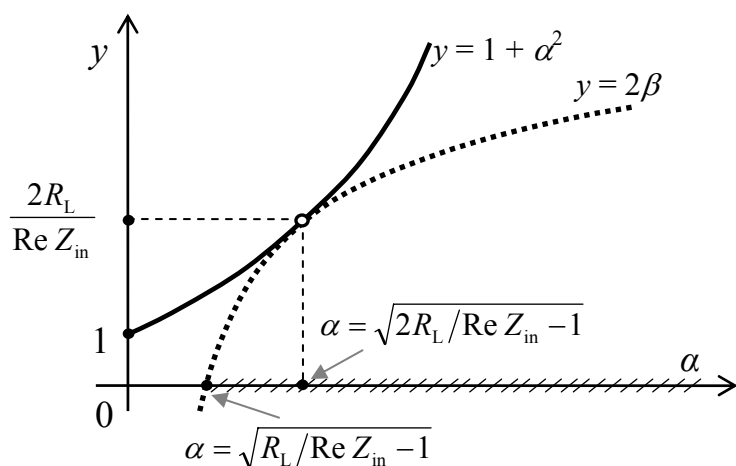
$$\beta = \frac{R_L}{\operatorname{Re} Z_{\text{in}}} \sqrt{\frac{1 + \alpha^2}{R_L/\operatorname{Re} Z_{\text{in}}} - 1}. \quad (4)$$

Определение типа резонанса выполняется автоматически в процессе расчёта НС по формулам (2) – (4). Для этого необходимо перед корнем квадратным в (3) выбрать знак (например, плюс – параллельный резонанс). Выполнить расчёт безразмерной индуктивности x при условии, что подкоренные выражения в (3) и (4) больше или равны нулю (если это не выполняется, то необходимо увеличить ёмкость C_2). Затем по формуле (2) вычислить входное сопротивление контура на резонансе. Если входное сопротивление равно заданному значению ($\operatorname{Re} Z_{\text{in}} = W$), то тип резонанса выбран правильно. Если это условие не выполняется, то в (3) необходимо изменить знак на противоположный, т.е. сменить тип резонанса, и повторить вычисления.

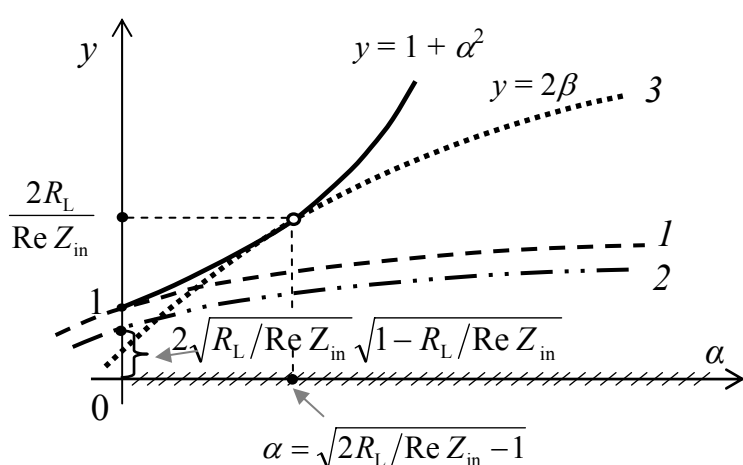
Далее рассмотрена область существования резонанса, показанная на рисунке 3. Соотношения (3) и (4) имеют действительные решения только в том случае, если их подкоренные выражения удовлетворяют неравенствам:

$$(1 + \alpha^2)^2 \geq (2\beta)^2 \quad (a) \quad \text{и} \quad 1 + \alpha^2 - R_L/\operatorname{Re} Z_{\text{in}} \geq 0 \quad (b). \quad (5)$$

В соответствии с неравенством (5б) возможны два варианта. Для первого варианта $\operatorname{Re} Z_{\text{in}} \leq R_L$ (рисунок 3а) ёмкость на выходе контура, при которой в нём возможен резонанс, должна удовлетворять условию $\alpha \geq \sqrt{R_L/\operatorname{Re} Z_{\text{in}} - 1}$.



а)



б)

Рисунок 3 – Область существования резонанса П-контура (заштрихованный участок на оси α) для различных сочетаний входного сопротивления контура и сопротивления нагрузки: а) $\text{Re } Z_{\text{in}} \leq R_L$; б) $\text{Re } Z_{\text{in}} > R_L$.

$\gamma = R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - (1 + \alpha^2) / 2$. Функция γ , как следует из анализа совместного решения (2) и (3), определяет тип резонанса в контуре; для $\gamma \leq 0$ в контуре устанавливается параллельный резонанс, а для $\gamma \geq 0$ – последовательный. Используя эти условия, приходим к следующему:

1. Если $\text{Re } Z_{\text{in}} \leq R_L$ (рисунок 3а), то для значений

$$\alpha \geq \sqrt{2R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - 1} \quad (7)$$

в контуре возбуждается параллельный резонанс, а для значений

$$\sqrt{R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - 1} \leq \alpha \leq \sqrt{2R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - 1} \text{ – последовательный.}$$

2. Если $\text{Re } Z_{\text{in}} > R_L$, то возможны два варианта. Для первого варианта $\text{Re } Z_{\text{in}} / 2 \leq R_L < \text{Re } Z_{\text{in}}$ (рисунок 3б кривые 1 и 3, причем кривая 1 соответствует $\text{Re } Z_{\text{in}} = 2R_L$). В этом случае для значений α , удовлетворяющих (7), в контуре возбуждается параллельный резонанс, а для значений $0 \leq \alpha \leq \sqrt{2R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - 1}$ –

Для второго варианта $\text{Re } Z_{\text{in}} > R_L$ (рисунок 3б). Тогда

$$1 - R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} \geq 0,$$

а это означает, что резонанс в контуре возможен при любой выходной ёмкости, т.е. $\alpha \geq 0$.

Неравенство (5а) для действительных значений β с учётом формулы (4) представляется так:

$$(1 + \alpha^2 - 2R_L / \text{Re } Z_{\text{in}})^2 \geq 0. \quad (6)$$

Отсюда следует, что формула, по которой производится расчёт безразмерной индуктивности контура x , имеет смысл для тех сочетаний $\text{Re } Z_{\text{in}}$, R_L и α , при которых определена формула (4). В выражении (6) значение $\alpha = \sqrt{2R_L / \text{Re } Z_{\text{in}} - 1}$ соответствует точке касания квадратичной функции $y = 1 + \alpha^2$ с функцией $y = 2\beta$. Эта точка существует, если $\text{Re } Z_{\text{in}} \leq 2R_L$ (рисунки 3а и 3б – кривые 1 и 3).

Введем функцию

последовательный. Для второго варианта $\text{Re } Z_{\text{in}} > 2R_L$ (рисунок 3б кривая 2) для любых значений выходной емкости ($\alpha \geq 0$) в контуре существует только параллельный резонанс.

Рассмотрены особенности расчёта параллельного колебательного контура с неполным включением (рисунок 4а) [5,6]. Компоненты входного импеданса НС определены в следующем виде:

$$\text{Re } Z_{\text{in}} = R_L \frac{x_1^2(1+\alpha^2)}{1+[x(1+\alpha^2)-\alpha]^2}; \quad (8)$$

$$\text{Im } Z_{\text{in}} = R_L x_1 \frac{1+[x(1+\alpha^2)-\alpha][x_2(1+\alpha^2)-\alpha]}{1+[x(1+\alpha^2)-\alpha]^2},$$

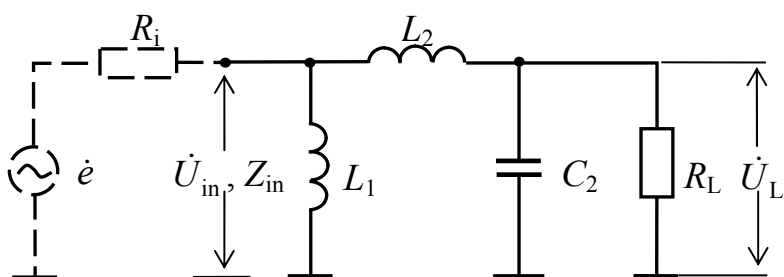
где $x_1 = \omega L_1/R_L$, $x_2 = \omega L_2/R_L$ и $\alpha = \omega C_2 R_L$ – безразмерные индуктивности и выходная ёмкость ЦС; $x = x_1 + x_2$. Найдено следующее решение для условия (1):

$$x_{\text{ser, par}} = \frac{x_1}{2} + \frac{\alpha}{1+\alpha^2} \pm \sqrt{\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{1+\alpha^2}\right)^2}, \quad (9)$$

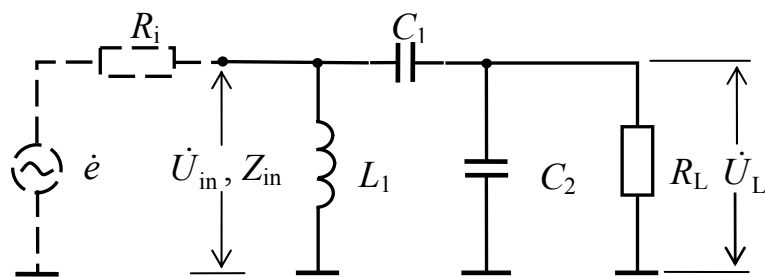
где входная индуктивность контура не зависит от типа резонанса и определяется по формуле

$$x_1 = 1 / \left(\frac{R_L}{\text{Re } Z_{\text{in}}} \sqrt{\frac{1+\alpha^2}{R_L/\text{Re } Z_{\text{in}}} - 1} \right). \quad (10)$$

Расчёт НС рисунка 4а и определение типа резонанса выполняется следующим образом.



а)



б)

Рисунок 4 – Схема согласования цепи эквивалентного генератора (цепь выделена пунктиром) с активной нагрузкой с применением параллельного колебательного контура с неполным включением: а – индуктивности со стороны генератора, б – ёмкости со стороны нагрузки. Обозначения элементов в тексте.

В выражении (9) перед корнем квадратным выбирается знак (например, плюс – последовательный резонанс). Проводится расчёт безразмерной индуктивности x по формулам (9) и (10) при условии, что их подкоренные выражения больше или равны нулю (если это условие не выполняется, то увеличивается выходная ёмкость C_2). Затем по выражению (8) вычисляется входное сопротивление НС на резонансе. Если входное сопротивление равно заданному значению ($\text{Re } Z_{\text{in}} = R_i$), то тип резонанса выбран правильно. Если это условие не вы-

полняется, то в (9) необходимо изменить знак на противоположный, т.е. сменить тип резонанса и повторить вычисления.

При расчёте НС в соответствии с рисунком 4а по формуле (10) возможен вариант, для которого входная безразмерная индуктивность x_1 больше полной безразмерной индуктивности x ($x_1 > x$). В этом случае необходимо индуктивность L_2 заменить ёмкостью C_1 , значение которой определяется по выражению $C_1 = 1/[\omega^2(L_1 - L)]$, и перейти к схемному решению, показанному на рисунке 4б.

Расчёт НС, в которой используется параллельный колебательный контур с неполным включением ёмкости со стороны генератора и индуктивности со стороны нагрузки, имеет такие же особенности, как и параллельный колебательный контур, рассмотренный ранее.

Рассмотрен расчёт ЦС с делением ВЧ мощности (рисунок 5а) [1]. Для

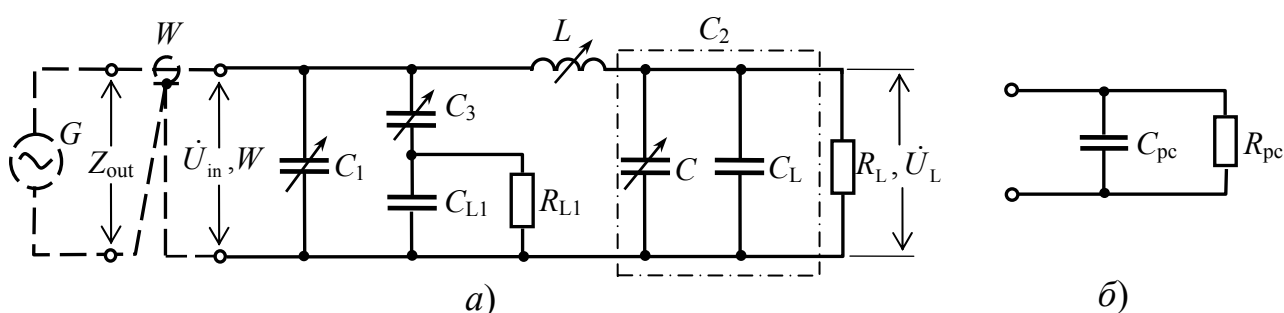


Рисунок 5 – Схема согласования коаксиального кабеля с двумя комплексными нагрузками (а) и параллельная схема замещения цепи подачи ВЧ напряжения на входе контура (б). Обозначения элементов в тексте.

входной цепи контура вводятся обозначения: $\beta_3 = \omega C_3 R_{L1}$, $\beta_{L1} = \omega C_{L1} R_{L1}$, а входная цепь (C_3 , C_{L1} и R_{L1}) представляется в виде эквивалентной схемы (рисунок 5б), для которой $\beta_{pc} = \omega C_{pc} R_{pc}$. В режиме идеального согласования нагрузки поглощают мощность $P = P_i$, но поскольку $P = U_{in}^2/W$ и цепи нагрузок соединены параллельно, то получаем, что мощности нагрузок равны

$$P_{L1} = U_{in}^2 / R_{pc} = PW / R_{pc}; \quad P_L = \frac{U_{in}^2}{\text{Re } Z_{in}} = P(R_{pc} - W) / R_{pc}.$$

Отсюда следует, что $R_{pc} = PW / P_{L1}$. Далее, используя прямые и обратные преобразования параллельной и последовательной схем замещения, показано, что

$$\beta_{pc} = \sqrt{\frac{R_{pc}}{R_{L1}} (1 + \beta_{L1}^2)} - 1.$$

Ёмкость C_3 определяется по выражению $\beta_3 = (1 + \beta_{L1}) / (\beta_{pc} - \beta_{L1})$. Расчёт ЦС выполняется по формулам (2) – (4), где принимается $\text{Re } Z_{in} = R_{pc} W / (R_{pc} - W)$, если $R_{pc} > W$.

В *третьем разделе* разработаны методики расчёта схем замещения плазменных нагрузок [1]. Методика расчёта схемы замещения распылительного магнетрона опирается на экспериментально полученный результат зависимо-

стей напряжений ВЧ и постоянного смещения от мощности P_L , рассеиваемой на магнетроне.

Эксперименты проводились на установке «Модуль НД». Распылительное устройство установки представляло два планарных магнетрона с плоскими прямоугольными мишенями, имеющими площадь контакта с плазмой $S_0 = 171 \text{ см}^2$. Для распыления использовался генератор «Источник ВЧ-5,0» с максимальной выходной мощностью 5,0 кВт, работающий на частоте 13,56 МГц и содержащий ваттметр падающей и отражённой мощностей.

Эксперименты выполнены при следующих рабочих параметрах: выходная мощность генератора от 100 Вт до 5,0 кВт, давление аргона в процессе распыления примерно 1 Па, расстояние между мишенями и подложками 6,5 см.

По результатам экспериментов методом наименьших квадратов были найдены функции, описывающие напряжения ВЧ и постоянного (отрицательного) смещения магнетрона. Они имеют следующий вид: $U_{ij} = a_{ij} P^{b_{ij}}$, где a_{ij} и b_{ij} – эмпирические коэффициенты; i – индекс материала мишени. Эти функции позволяют представить сопротивления на ВЧ ($j = 1$) и для постоянного смещения ($j = 2$) в следующем виде:

$$R_{ij} = \frac{A_{ij}}{S} P_L^{B_{ij}}, \quad (11)$$

где R_{ij} в омах, P_L в ваттах; $A_{ij} = a_{ij}^2 S_0$; $B_{ij} = 2b_{ij} - 1$; S – площадь мишени, находящейся в контакте с плазмой, см^2 . Численные значения A_{ij} и B_{ij} приведены в таблице:

Материал мишени и толщина	i	Индукция магнитного поля на поверхности мишени, Тл	ВЧ		Постоянное смещение	
			$A_{i1},$ Ом·см ² /Вт ^{B_{i1}}	B_{i1}	$A_{i2},$ Ом·см ² /Вт ^{B_{i2}}	B_{i2}
Кварцевое стекло, 3 мм	1	0,054	17920	0,160	44880	0,020
Титан, 4 мм	2	0,054	99760	-0,212	3280	0,156
Моноалюминат неодима, 5 мм	3	0,015	135240	-0,160	328020	-0,088
Тантал, 1,5 мм	4	0,015	98600	0	4520	0,570

Эффективные значения напряжений на магнетроне (ВЧ, смещения и полное) определяются по формулам:

$$U_{ij} = \sqrt{R_{ij}} \sqrt{P_L}; \quad U_i = \sqrt{R_{i1} + R_{i2}} \sqrt{P_L}.$$

Параметры C_L и R_L параллельной схемы замещения нагрузки (см. рисунок 1), находятся по выражению (11) ($R_L = R_{i1}$) и формуле

$$C_L = C_0 + C_{ss}^{pl} S,$$

где C_0 – ёмкость, шунтирующая зону магнетронного разряда, C_{ss}^{pl} – удельная поверхностная ёмкость плазмы (для давления $0,6 \div 1 \text{ Па}$ $C_{ss}^{pl} \approx 0,05 \text{ пФ/см}^2$).

Приведена методика расчёта схемы замещения плазменного конденсатора с обкладками сложной геометрии.

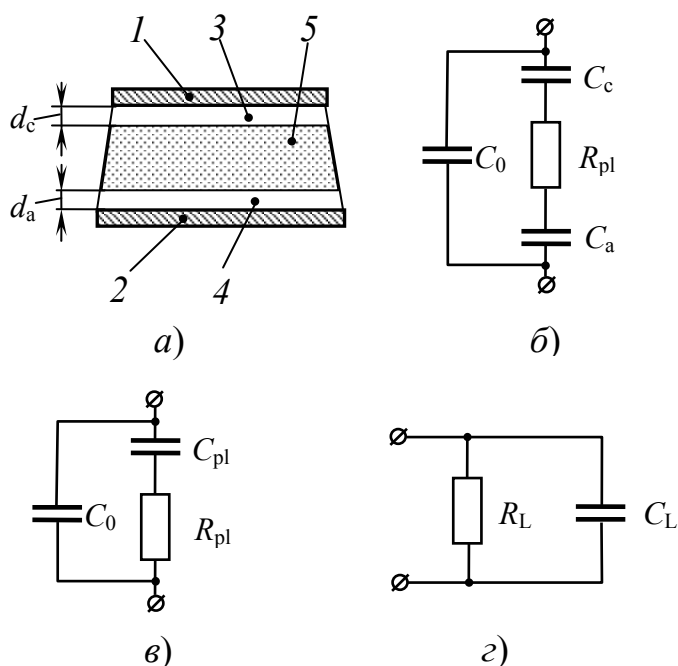


Рисунок 6 – Плазменный конденсатор с параллельными электродами: *а* – структура разрядного промежутка; *1* – катод, *2* – анод, *3* и *4* – приэлектродные слои, *5* – плазма; *б* – ВЧ схема замещения плазменного конденсатора; *в* – параллельно-последовательная схема замещения; *г* – параллельная схема замещения.

ем равенства электронного и ионного токов. На другой электрод, известный как “катод”, через разделительный конденсатор подаётся ВЧ напряжение. Катод, взаимодействуя с плазмой, приобретает некоторый постоянный потенциал смещения, величина которого также определяется условием равновесия электронного и ионного токов. Постоянные падения потенциала в приэлектродных зонах создают потоки ионов в сторону электродов, при этом кинетическая энергия ионов и колеблющихся электронов может быть использована для различных целей (очистка, распыление; управление структурой, смачиваемостью, плотностью, проводимостью и т.п. различных материалов).

С целью упрощения расчётов схемы замещения предположено, что на ВЧ плазменный конденсатор имеет две зоны изменения постоянного потенциала, эти зоны контактируют с электродами и имеют ёмкостной характер (ёмкости C_c и C_a), а между электродами расположена положительно заряженная плазма, имеющая сопротивление R_{pl} (рисунок 6б). Аналогичную структуру разрядного промежутка имеет плазменный конденсатор со сложной геометрией.

Принято, что амплитуда колебаний электронов в приэлектродных областях порядка электронного дебаевского радиуса плазмы λ_{De} , а толщины приэлектродных слоёв d_c и d_a (рисунок 6а) в среднем за период колебаний электронов примерно равны λ_{De} и не зависят от частоты возбуждения плазмы. Тогда ёмкость C_{pl} (рисунок 6в) может быть определена по следующему выражению:

Рассмотрен плазменный конденсатор (рисунок 6а); между его обкладками действует переменное электрическое поле с частотой ω , раскачивающее электроны и ионы плазмы. Подвижность электронов много больше подвижности ионов, поэтому электроны имеют амплитуду колебаний больше, чем ионы, а к электродам прилипает больше колеблющихся электронов, чем ионов. Однако в плазменных установках один из электродов заземляют (его потенциал практически равен нулю и этот электрод называют “анодом”). Анод не может приобрести отрицательный постоянный потенциал – вместо него плазма приобретает положительный потенциал, а его величина определяется условием равенства электронного и ионного токов.

$$C_{pl} = C_{ss}^{pl} S_{red}, \quad (12)$$

где

$$C_{ss}^{pl} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \omega_{ple}}{\sqrt{k_B T_e / m_e}}; \quad \omega_{ple} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}; \quad S_{red} = \frac{S_c S_a}{S_c + S_a};$$

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_{ple}^2}{\omega^2 - \nu_e^2}; \quad (13)$$

S_{red} – приведённая площадь электродов; ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – электрическая проницаемость приэлектродных слоёв плазмы (принята равной электрической проницаемости плазмы); k_B – постоянная Больцмана; e и m_e – заряд и масса электрона; ω_{ple} , ν_e , T_e и n_e – плазменная частота, частота столкновений, температура и плотность электронов. В том случае, когда размеры электродов порядка длины электромагнитной волны в приэлектродном зазоре, в качестве площади электрода принимается эффективная площадь электрода [7], учитывающая распределение электромагнитного поля по поверхности электродов. В соответствии с формулой (13), для средних частот ($\omega_{pli} < \omega < \omega_{ple}$; ω_{pli} – плазменная частота ионов) и достаточно «высокого» давления газа ($\nu_e \gg \omega_{ple}$) $\varepsilon_r \approx 1$.

Сопротивление плазменного конденсатора определено по соотношению

$$R_{pl} = \varepsilon_0 \rho_{pl} / C, \quad (14)$$

где C – ёмкость конденсатора без плазмы; ρ_{pl} – удельное сопротивление плазмы; в области средних частот [Л8]

$$\rho_{pl} = \frac{\nu_e}{\varepsilon_0 \omega^2} \left(1 + \frac{\omega^2}{\nu_e^2} \right). \quad (15)$$

Определённые по формулам (12) – (15) C_{pl} и R_{pl} являются параметрами последовательной схемы замещения разрядного промежутка, которая шунтируется ёмкостью C_0 (ёмкостью участков конденсатора без плазмы) (рисунок 6в). При расчёте ЦС используется параллельная схема замещения (рисунок 6з) с параметрами C_L и R_L ; они определены так:

$$C_L = C_0 + C_{pl} / (\omega Z C_{pl})^2; \quad R_L = Z^2 / R_{pl}, \quad \text{где } Z = \sqrt{1 + (\omega R_{pl} C_{pl})^2} / (\omega C_{pl}).$$

В конце второй главы рассмотрен порядок расчёта НС. Определяются эквивалентные схемы нагрузки для возможных интервалов изменения мощности, перечня напыляемых материалов, плазмообразующих сред и для других параметров, влияющих на плазму. Затем для каждой эквивалентной схемы рассчитываются номиналы элементов ЦС, токи и напряжения в цепях НС. Оцениваются интервалы изменения номиналов элементов, критические значения токов и напряжений [4–6]; по этим оценкам осуществляется выбор элементов электрической схемы ЦС, а также определяются поперечные сечения проводников и безопасные расстояния между электрическими цепями и корпусными деталями.

В соответствии с описанными во второй главе методиками расчёта НС и плазменных нагрузок рассчитана и спроектирована ВЧ система магнетронного

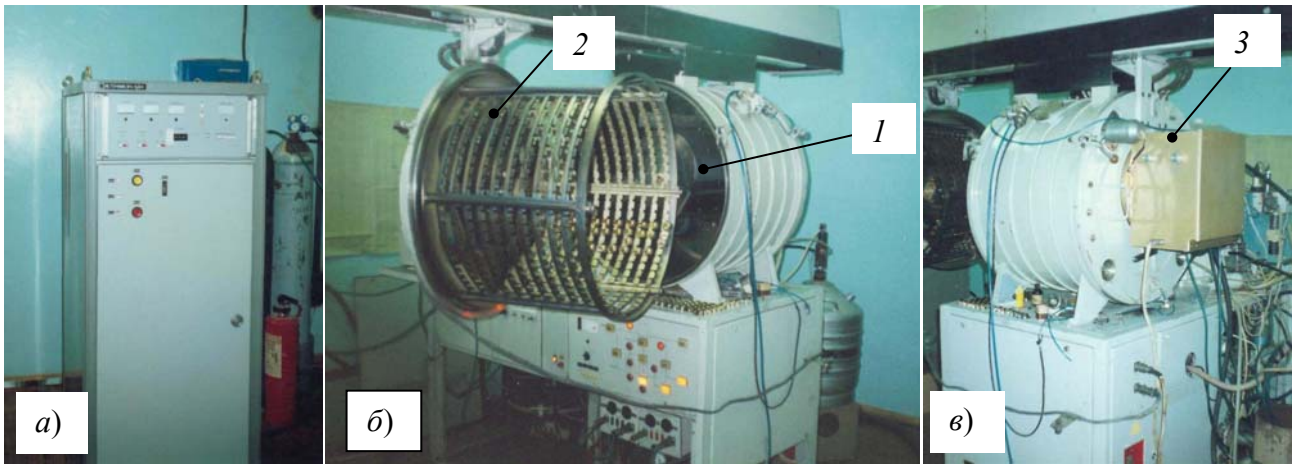


Рисунок 7 – Модернизированная установка УВН-74: *а* – генератор «Источник ВЧ-5,0 М»; *б* и *в* – общий вид вакуумного поста с ВЧ нагрузочной системой: *1* – блок магнетронов, *2* – электрод с деталями и *3* – устройство согласования.

распыления для нанесения декоративных покрытий на пластмассовые детали в составе модернизированной установки вакуумного напыления УВН-74 (рисунок 7) (см. «Приложение» диссертационной работы). Высокочастотная система работает на частоте 13,56 МГц в интервале мощности от 50 Вт до 5 кВт и обеспечивает распыление трёх различных материалов в одном вакуумном цикле, в том числе с подачей напряжения смещения на электрод с деталями. ВЧ система установки реализована в соответствии с рисунком 1*д*, а НС – в соответствии с рисунком 5.

Третья глава «Исследование активного сопротивления проводников на высокой частоте» состоит из двух разделов. В *первом разделе* представлены результаты исследования проводников с электропроводными покрытиями [8–11], которые находят применение в электрических цепях ВЧ систем.

Аналитическая зависимость для активного удельного поверхностного сопротивления R_{ss}^{coat} проводника с покрытием на ВЧ получена с применением теории Пойнтинга (отличается от способа, применённого в [Л6] при рассмотрении скин-эффекта в двухслойных проводниках). Вычислив часть энергии, которая втекает в проводник с покрытием за единицу времени (мощность потерь P), а также найдя среднее (по времени) значение квадрата тока в проводнике с покрытием $\langle I^2 \rangle$ и используя выражение для активного сопротивления $R = P/\langle I^2 \rangle$, установлено:

$$R = R_{ss}^{coat} l/p; b > 10\delta_2, \quad (16)$$

$$R_{ss}^{coat} = \frac{\rho_1 \left\{ 1 + \exp\left(-\frac{2z_1}{\delta_1}\right) \left[k_r^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{2z_1}{\delta_1}\right) \right) + 2k_r \sin\left(\frac{2z_1}{\delta_1}\right) + \frac{\rho_1 \delta_2 (1 + k_r)^2}{\rho_2 \delta_1} - 1 \right] \right\}}{\delta_1 \left\{ 1 + \exp\left(-\frac{2z_1}{\delta_1}\right) \left[k_r^2 \exp\left(-\frac{2z_1}{\delta_1}\right) - 2k_r \cos\left(\frac{2z_1}{\delta_1}\right) \right] \right\}}; \quad (17)$$

ρ – удельное сопротивление материала; δ – глубина скин-слоя материала; k_r – коэффициент отражения электрического поля в электромагнитной волне на

границе покрытие-проводник [9]; z_1 – толщина покрытия; l – длина проводника; p и b – периметр и наименьший размер поперечного сечения проводника; 1 и 2 – индексы, определяющие отношение параметров к материалам покрытия и проводника соответственно.

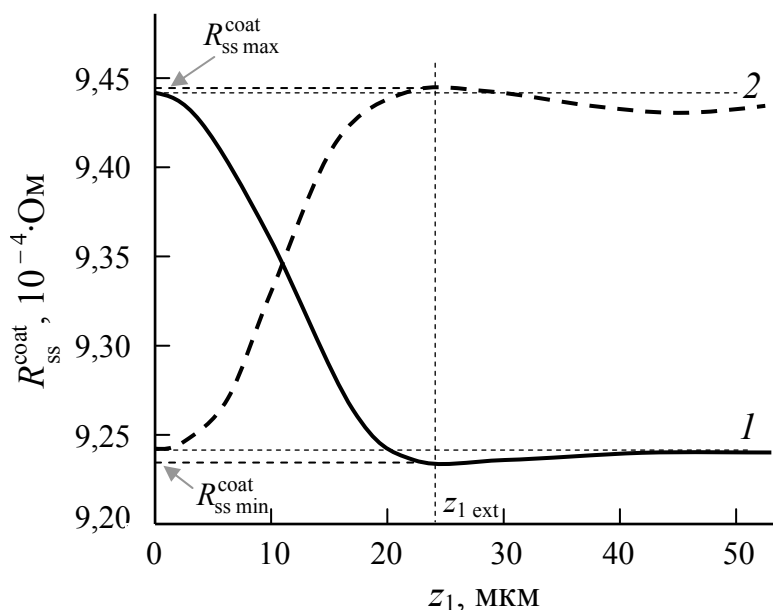


Рисунок 8 – Расчётные зависимости удельного поверхностного сопротивления R_{ss}^{coat} от толщины покрытия z_1 на частоте 13,56 МГц: 1 – проводник – медь, покрытие – серебро, параметры материалов удовлетворяют условию минимума (18); 2 – проводник – серебро, покрытие – медь, параметры материалов удовлетворяют условию максимума (19).

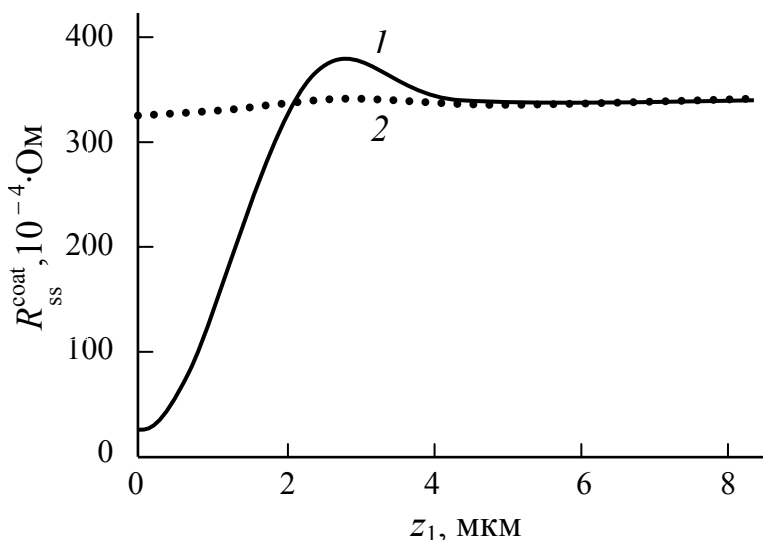


Рисунок 9 – Расчётные зависимости удельного поверхностного сопротивления R_{ss}^{coat} от толщины покрытия z_1 на частоте 13,56 МГц для сочетаний материалов проводника и покрытия: 1 – сплав Л63 – никель; 2 – сталь – никель.

Исследование выражения (17) показало:

1. Практически всегда существует **экстремальное** значение для активного сопротивления проводника с покрытием при изменении толщины покрытия (рисунок 8).

2. Экстремум соответствует толщине покрытия $z_{1ext} \approx \pi \delta_1 / 2$.

3. Экстремум является **минимумом**, если выполняется условие

$$\rho_2 \mu_{r2} > \rho_1 \mu_{r1}, \quad (18)$$

и **максимумом**, если выполняется

$$\rho_2 \mu_{r2} < \rho_1 \mu_{r1}, \quad (19)$$

где μ_r – магнитная проницаемость материала.

4. При выполнении условия

$$\rho_2 \mu_{r2} = \rho_1 \mu_{r1}$$

материалы покрытия и провода неразличимы, а экстремум отсутствует.

5. Толщина токопроводящих покрытий должна выбираться по формуле

$$z_1 = (1,4 \div 1,5) \delta_1.$$

Изучение физических свойств проводящих материалов позволило определить перечень материалов для проводников с покрытиями, обладающих свойством минимума [9]. Кроме того, расчёты, проведённые в соответствии с выражени-

ем (17), показали, что проводник из меди с покрытием из серебра толщиной 24,4 мкм, а также проводник из бронзы БрКМц3-1 с покрытием из меди толщиной 27,8 мкм проводят электрический ток на частоте 13,56 МГц лучше серебра. Исследование никелевого покрытия показало, что его применение на ВЧ недопустимо (рисунок 9). В конце раздела приводятся рассчитанные значения удельного поверхностного сопротивления проводников с покрытиями, применяемыми в промышленности на частоте 13,56 МГц.

Во *втором разделе* описана методика расчёта поперечного сечения проводников, используемых в силовых цепях ВЧ систем [11,12]. Геометрия поперечного сечения электрического проводника на ВЧ определена следующим образом. Известно, что для воздушного способа охлаждения наружная поверхность проводника должна обеспечивать передачу в окружающее пространство тепловой энергии не менее той, которая выделяется в проводнике вследствие джоулевых потерь, поэтому

$$q_s p l \geq I^2 R, \quad (20)$$

где q_s – удельная тепловая мощность, отводимая с наружной поверхности проводника, I – электрический ток. Подставляя (16) в (20), получено, что периметр поперечного сечения проводника должен удовлетворять неравенству:

$$p \geq p_s I, \quad (21)$$

где p_s – допустимый удельный периметр на ВЧ,

$$p_s = \sqrt{R_{ss}^{\text{coat}} / q_s}.$$

Определены параметры p_s и δ проводниковых материалов для различных систем охлаждения на частоте 13,56 МГц. Их пересчёт на частоту f (в МГц) осуществляется по формулам: $\delta = \delta^{(13,56)} \sqrt{13,56/f}$, $p_s = p_s^{(13,56)} (f/13,56)^{1/4}$.

Представлены результаты расчёта p_s на частоте 13,56 МГц для проводников с покрытиями, используемых в промышленности.

Применение разработанной методики при проектировании НС обеспечивает соблюдение условия «бездиссипативности» для ЦС. Примеры расчёта проводников приводятся в работе [12].

Четвёртая глава «**Измерение электрической мощности в высокочастотных нагрузочных системах**» состоит из четырёх разделов; в ней рассмотрены основные положения теории, а также методика расчёта ваттметров падающей, отражённой и активной мощностей на ВЧ [1,2,13–15].

В *первом разделе* рассмотрен принцип работы ваттметра в ЛПЭ (рисунок 10), который вытекает из формул (см., например, [2]):

$$P_i = \frac{1}{2} \dot{I}_i \dot{I}_i^* W = \frac{1}{2} |\dot{I}_i|^2 W; \quad P_r = \frac{1}{2} \dot{I}_r \dot{I}_r^* W = \frac{1}{2} |\dot{I}_r|^2 W, \quad (22)$$

где

$$\dot{I}_i = \frac{1}{2} \left(\dot{I} + \frac{\dot{U}}{W} \right); \quad \dot{I}_r = \frac{1}{2} \left(\dot{I} - \frac{\dot{U}}{W} \right); \quad (23)$$

\dot{I}_i , \dot{I}_i^* и \dot{I}_r , \dot{I}_r^* – амплитуды токов падающей и отражённой волн и их комплексно-сопряжённые значения; \dot{U} , \dot{I} – реально измеряемые в линии амплитуды на-

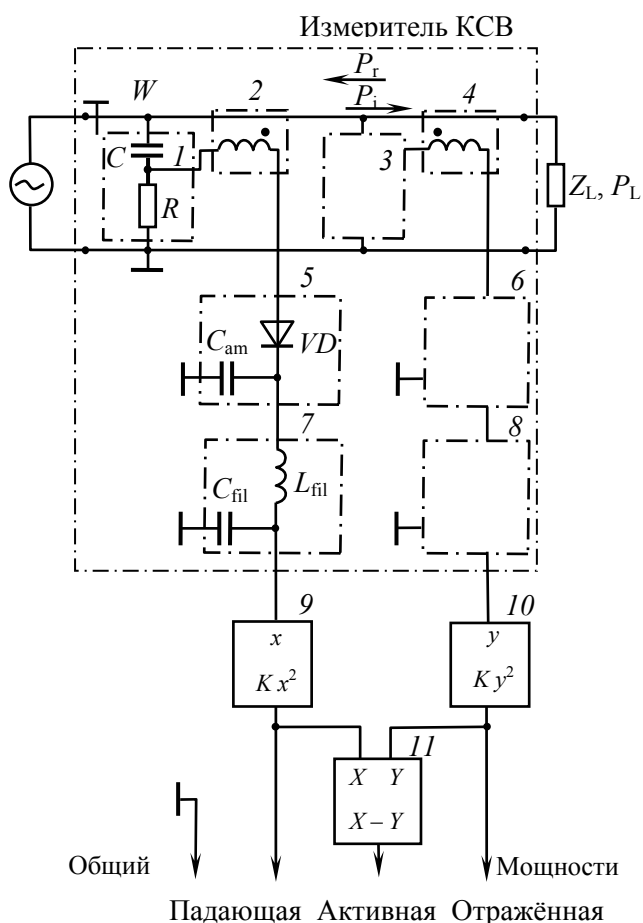


Рисунок 10 – Электрическая схема ваттметра: 1, 3 – датчики напряжения; 2, 4 – датчики тока; 5, 6 – амплитудные детекторы; 7, 8 – фильтры; 9, 10 – устройства возведения в квадрат; 11 – устройство вычитания.

$$\dot{I}_i = \frac{1}{2} k_I (\dot{i} + \dot{e}), \quad \dot{I}_r = -\frac{1}{2} k_I (\dot{i} - \dot{e}).$$

Амплитудными детекторами 5, 6 выделяются модули сигналов датчиков тока и напряжения. Сигналы фильтруются устройствами 7, 8 и поступают на вход устройств 9, 10, выполняющих операции возведения в квадрат с коэффициентом передачи K . Выходные сигналы этих устройств соответствуют мощностям падающей и отражённой волн и, в соответствии с (22) – (24), описываются выражениями

$$P_i = K |\dot{i} + \dot{e}|^2, \quad P_r = K |\dot{i} - \dot{e}|^2, \quad \text{где } K = \frac{1}{8} k_I^2 W = \frac{1}{8} k_I k_U.$$

Вычитающее устройство 11 выполняет операцию определения активной мощности.

Из рассмотренных соотношений следует, что датчики тока и напряжения, должны удовлетворять условию, которое сформулировано следующим образом: Если на участке ЛПЭ, где установлены датчики тока и напряжения, отсутствует отражённая волна ($P_r = 0$), то на этом участке сопротивление линии

пряжения и тока. Передаточные характеристики датчиков тока 2, 4 и датчиков напряжения 1, 3 описаны выражениями:

$$\dot{I} = k_I \dot{e}, \quad \dot{U} = k_U \dot{i}, \quad (24)$$

где k_I – коэффициент преобразования выходного напряжения (сигнала) датчика тока в ток ЛПЭ, \dot{e} – амплитуда сигнала датчика тока, k_U – коэффициент преобразования выходного сигнала датчика напряжения в напряжение ЛПЭ, \dot{i} – амплитуда выходного сигнала датчика напряжения.

В соответствии с (23) необходимо выполнить операции сложения и вычитания тока и напряжения с целью определения амплитуд токов падающей и отражённой волн. Показано, что эти операции можно выполнить конструктивно, соединив датчик тока и датчик напряжения последовательно, причём направления включения датчика тока в ЛПЭ по каналам падающей и отраженной мощностей должны быть противоположными. С учетом формул (23) данные операции выглядят так:

$Z = \dot{U}/\dot{I} = W$, при этом сигналы датчиков тока и напряжения по каналу падающей мощности должны быть равны ($\dot{e} = \dot{i}$), а по каналу отражённой мощности должны быть равны только по модулю, имея при этом противоположные фазы [2,15].

Во **втором разделе** приведено обоснование применения коаксиальной линии передачи в составе ваттметра (измеритель КСВ на рисунке 10). В **третьем разделе** рассмотрены конструкции датчиков тока и напряжения, способы их включения в состав коаксиальной линии передачи, их расчёт, а также выполнен анализ последовательного соединения датчиков тока и напряжения. Проанализированы датчики тока в виде петли (рисунок 11а) и катушки связи

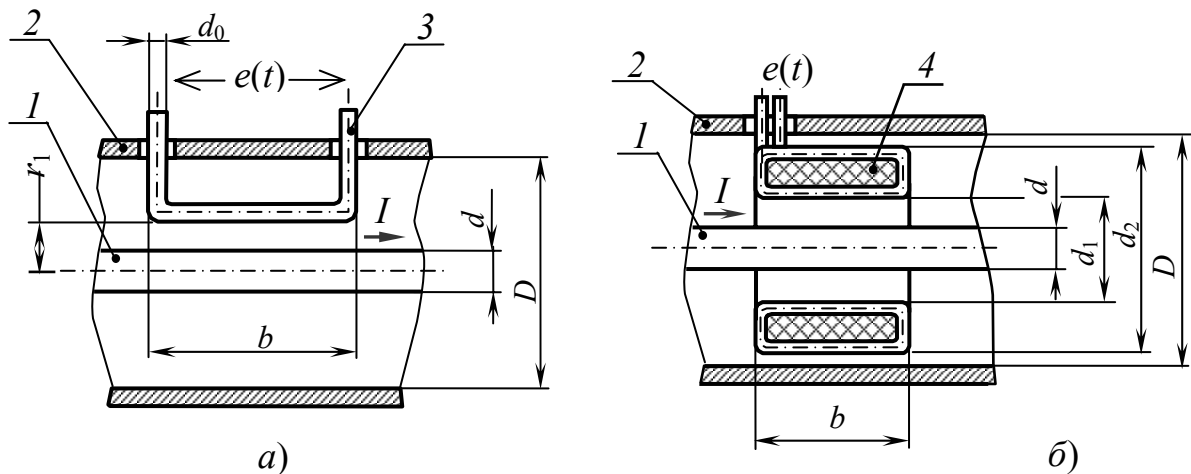


Рисунок 11 – Схемы размещения петли связи (а) и кольцевой катушки (б) в коаксиальной линии передачи: 1 – внутренний проводник, 2 – внешний проводник, 3 – петля связи, 4 – катушка.

(рисунок 11б); датчик тока в виде катушки связи может размещаться не только внутри коаксиальной линии передачи, но и внутри внутреннего или внешнего проводников коаксиальной линии, а также на торце внешнего проводника (по аналогии с компоновкой трансформаторов с объёмными обмотками). Напряжение на зажимах датчика тока определено по формуле $\dot{e} = -i M \omega \dot{I}$, где

$$M = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \ln \frac{D}{2r_1} \quad (\text{рисунок 11а}); \quad M = \frac{\mu_0 b N}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d} \quad (\text{рисунок 11б}), \quad (25)$$

M – коэффициент взаимной индукции; μ_0 – магнитная постоянная; N – количество витков катушки.

Показано, что в соответствии с условием для сигналов датчиков тока и напряжения, в качестве датчика напряжения необходимо использовать такой делитель напряжения, который сдвигает фазу выходного сигнала датчика на $\pm\pi/2$ относительно напряжения в коаксиальной линии передачи. На рисунке 12 приведены резистивно-ёмкостной (RC) делитель напряжения, обеспечивающий сдвиг фазы $+\pi/2$ между входом и выходом датчика напряжения и индуктивно-резистивный (LR) делитель, для которого также выполняется условие по фазе. Таким образом, установлено, что для датчика тока и RC -делителя должно вы-

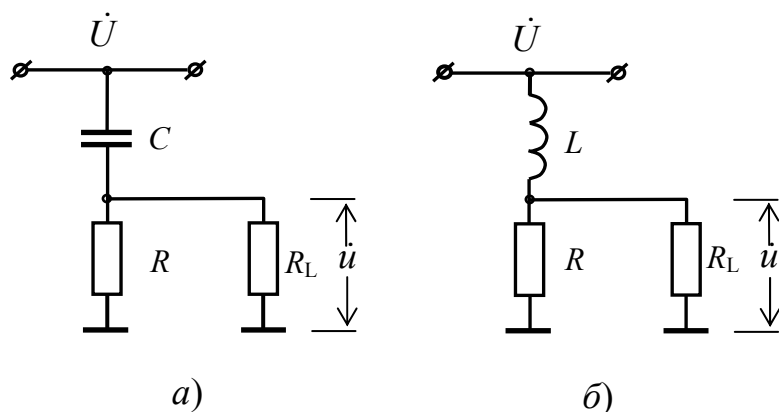


Рисунок 12 – Схемы измерения напряжения с помощью RC (а) и LR (б) делителей.

него проводника коаксиальной линии передачи. Установлено, что в этом случае параметры C и R с учётом (25) и (26) определяются по выражениям:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0kb}{\ln \frac{2r_1(2r_1 + d_0 - d)}{dd_0}}; \quad R = \frac{\mu_0bN}{2\pi W C} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (\text{датчик тока на рисунке 11а}); \quad (27)$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_rkb}{\ln \frac{d_1}{d}}; \quad R = \frac{WN}{k} \frac{\ln \frac{d_2}{d_1} \ln \frac{d_1}{d}}{\left(\ln \frac{D}{d}\right)^2} \quad (\text{датчик тока на рисунке 11б}), \quad (28)$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость изоляции коаксиальной линии передачи, k – поправочный коэффициент (экспериментально установлено, что для датчика тока в виде петли связи $k = 0,673$, а для катушки $k = 1,853$ [15]).

Проведён анализ последовательного включения датчиков тока и напряжения в составе коаксиальной линии передачи (рисунок 13). Предполагается, что в коаксиальной линии передачи распространяется падающая волна, а отражённая отсутствует. Рассматривается структура электромагнитного поля в линии передачи с ориентацией векторов электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{B} полей в соответствии с вектором Пойнтинга, т.е. $\mathbf{S} \sim \mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Принимается, что электрическое и магнитное поля в линии передачи изменяются по синусоидальному закону и находятся в первой четверти (поля растут). Тогда магнитное поле, наведённое в петле связи, будет препятствовать изменению магнитного поля в коаксиальной линии передачи (правило Ленца), а его направление определит ориентацию тока в петле (ЭДС в датчике тока отстает от тока в линии передачи на $-\pi/2$). Направление электрического поля на резисторе датчика напряжения будет совпадать с направлением электрического поля в линии передачи, но оно уменьшается и опережает поле в линии на $+\pi/2$. Таким образом, со стороны «А» датчики находятся в фазе и их напряжение, при выполнении условия для сигналов датчиков тока и напряжения, соответствует напряжению падающей

полняться условие, которое не зависит от частоты и определяется по формуле:

$$RC = M/W. \quad (26)$$

Аналогично для датчика тока и LR -делителя:

$$R/L = \omega^2 M/W,$$

но для них R/L является функцией частоты.

Рассмотрен вариант, когда ёмкостью связи C является ёмкость датчика тока относительно внутреннего

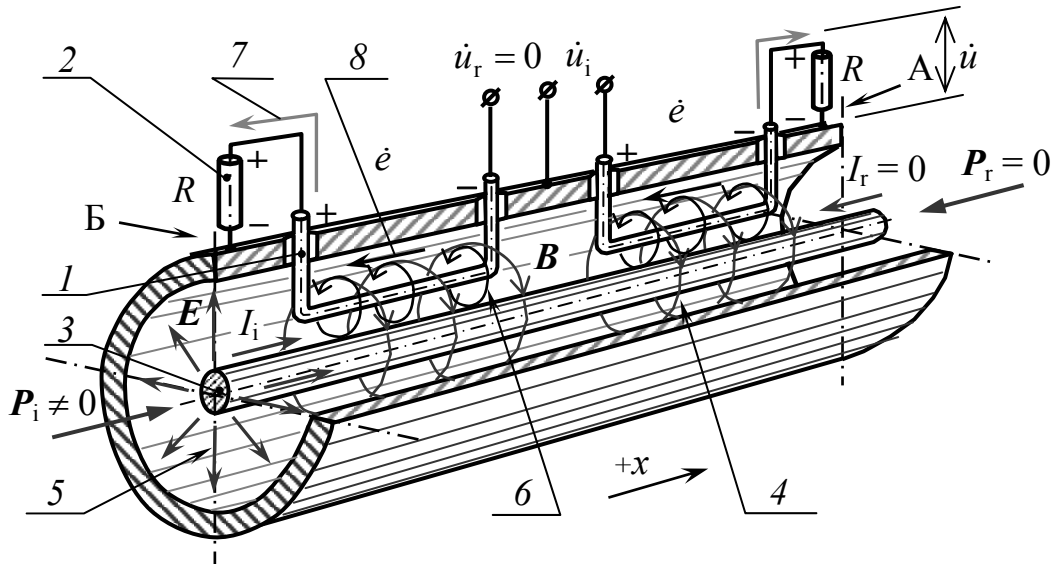


Рисунок 13 – Схема последовательного включения датчика тока I и датчика напряжения, образованного сопротивлением 2 и ёмкостью датчика тока относительно центрального проводника 3 коаксиальной линии передачи: А – датчики находятся в фазе, Б – датчики находятся в противофазе; 4 и 5 – ориентации силовых линий магнитного и электрического полей в линии передачи, 6 – ориентация силовых линий магнитного поля в датчике тока, 7 и 8 – направления электрического тока в резисторе датчика напряжения и датчике тока.

волны, а со стороны «Б» – в противофазе и их напряжение – это напряжение отражённой волны. Ситуация с применением в линии датчика тока в виде катушки связи аналогична.

В *четвёртом разделе* проведёны анализы ВЧ ваттметра по мощности и току, амплитудного детектора и фильтра ВЧ; приведена методика расчёта измерителя КСВ, а также рассмотрены результаты экспериментального исследования ваттметра.

Анализ мощности бегущей волны в коаксиальной линии передачи проведён в соответствии с известной формулой

$$P = \frac{\pi E_{\max}^2 d^2}{2\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d},$$

где E_{\max} – действующее значение напряженности электрического поля около поверхности внутреннего проводника. С учётом неоднородности электрического поля, создаваемого датчиком тока, а также возможности удвоения напряжения при работе ваттметра на разомкнутую нагрузку получено выражение, по которому производится расчёт диаметра провода датчика:

$$d_0 \geq 4\sqrt{2P_{i\max}W/E_{bvs}}, \quad (29)$$

где $P_{i\max}$ – максимальная мощность падающей волны, E_{bvs} – пробивная напряжённость электрического поля для изоляции коаксиальной линии передачи.

Анализ коаксиальной линии по току проведён в соответствии с выражением (21). Принято, что отражённая ВЧ мощность не может превышать 25 % от

падающей мощности. С учётом сложения токов падающей и отражённой волн найдено соотношение, по которому определяется диаметр внутреннего проводника коаксиальной линии передачи

$$d \geq \frac{1,5 p_s}{\pi} \sqrt{\frac{P_{i \max}}{W}}. \quad (30)$$

Приведены результаты анализа амплитудного детектора и фильтра (см. рисунок 10). Рассмотрена методика расчёта ваттметра; для измерителя КСВ с датчиком тока в виде катушки связи, расчёт выполняется по следующим формулам (см. [15]):

Определяется или выбирается	Расчётная формула
1. Индуктивность и ёмкость фильтра ВЧ	$L_{\text{fil}} = 2R_{\text{load}} / (\pi f); C_{\text{fil}} = L_{\text{fil}} / R_{\text{load}}^2$
2. Ток через нагрузку измерителя КСВ	$I_{\text{load}} = U_{\text{load max}} / R_{\text{load}}$
3. Ёмкость, угол отсечки, входное сопротивление, амплитуда входного напряжения амплитудного детектора	$C_{\text{am}} = 1 / [f R_{\text{load}} (\Delta U / U_{\text{load}})]; \theta = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{S R_{\text{load}}}};$ $R_{\text{in}} \approx R_{\text{load}} / 2; u_{\text{in}} = \frac{U_{\text{load}}}{\cos \theta}$
4. По $I_{\text{load}}, u_{\text{in}}$ и f выбирается диод VD (см., например, [15]); $I_{\text{load}} < I_{\text{пр.ср}}, u_{\text{in}} < U_{\text{обр}}$	
5. Диаметр внутреннего и внешнего проводников коаксиальной линии передачи	(30); $D = d \exp(2\pi\sqrt{\varepsilon_r} W / W_0)$
6. Диаметр провода датчика тока	(29)
7. Номинальное напряжение на внутреннем проводнике коаксиальной линии передачи	$U_{\text{ном}} = 2\sqrt{P_{i \max} W}$
8. По $U_{\text{ном}}$ определяются воздушные зазоры, пути утечки изоляции датчика тока и коаксиальной линии передачи, испытательное напряжение $U_{\text{исп}}$	
9. Толщина диэлектрической изоляции датчика тока в коаксиальной линии передачи	$l' \geq k_3 k_n \frac{U_{\text{исп}}}{E_{\text{бвс}}}, l' > d_0$
10. Коэффициент взаимной индукции датчика тока и коаксиальной линии передачи	$M = \frac{U_{\text{load max}}}{4\pi\sqrt{2} \cos \theta f} \sqrt{\frac{W}{P_{i \max}}}$
11. Напряжения на выходе измерителя КСВ	$U_{\text{load}} = 4\pi\sqrt{2} \cos \theta f M \sqrt{\frac{P_i}{W}}$
12. Параметры датчика тока	$bN = \frac{2\pi M}{\mu_0 \ln(d_2 / d_1)}$
13. Минимальная мощность, измеряемая ваттметром	$P_{i \min} = \frac{U_{\text{пр}}^2 W}{32\pi^2 (fM)^2}$
14. Сопротивление датчика напряжения	(28)

Выше обозначено: R_{load} – сопротивление нагрузки измерителя КСВ; $U_{\text{load max}}$, $\Delta U/U_{\text{load}}$ – наибольшее напряжение и относительная доля пульсаций напряжения на выходе измерителя КСВ соответственно; S – крутизна вольт-амперной характеристики диода; $I_{\text{пр.ср}}$, $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{обр}}$ – прямой предельный средний ток, прямое падение напряжения и предельное обратное напряжение диода соответственно; $p_s = 1,29$ мм/А – допустимый удельный периметр поперечного сечения провода из сплава ЛС59-1 с покрытием Ср.3 на частоте 13,56 МГц [12]; $P_{i \text{ min}}$, $P_{i \text{ max}}$ – наименьшая и наибольшая мощности, измеряемые ваттметром; $W_0 = 376,6$ Ом – волновое сопротивление вакуума; $k_s = 2$ – коэффициент эксплуатационного запаса; $k_n = 4$ – коэффициент неравномерности электрического поля.

В соответствии с разработанной методикой нами выполнен расчёт ваттметров, примененных в составе генераторов УВ70-01, «Источник ВЧ-5,0», «Устройство высокочастотное» и др.

Рассмотрены результаты экспериментов по проверке теоретически полученной зависимости, описывающей работу ваттметра:

$$U_{\text{load}} = \sqrt{2} \cos \theta \omega (M \pm RCW) \sqrt{\frac{P_i}{W}}, (P_r = 0), \quad (31)$$

где знак плюс соответствует напряжению для канала падающей мощности, а минус – отражённой.

Из зависимости (31) следует, что напряжение на выходе измерителя КСВ является линейной функцией как R , так и $\sqrt{P_i}$. Эксперименты выполнены на установке состоящей из генератора УВ70-01, коаксиального кабеля РК-75-9-13 и измерительного ваттметра МЗ-48 с входным сопротивлением 75 Ом. Исследуемый ваттметр размещался между генератором и кабелем.

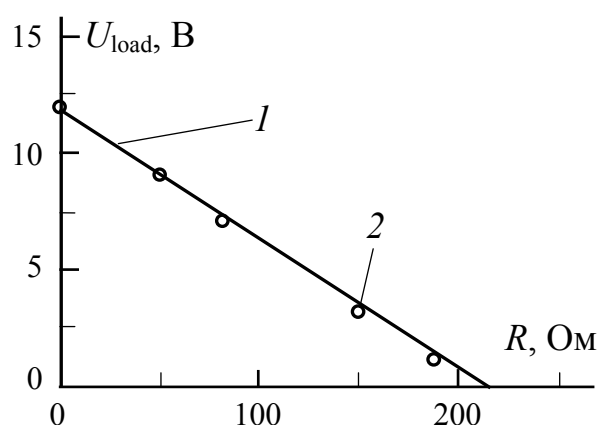


Рисунок 14 – Теоретическая зависимость (1) и экспериментальные значения (2) напряжения U_{load} от сопротивления R по каналу отражённой мощности для ваттметра ДЛЖМ 5.714.001: $P_{\text{max}} = 1,5$ кВт, $f = 13,56$ МГц, $W = 75$ Ом, $D = 20$ мм, $d = 3$ мм, $d_1 = 9$ мм, $d_2 = 17$ мм, $b = 8$ мм, $N = 28$ витков.

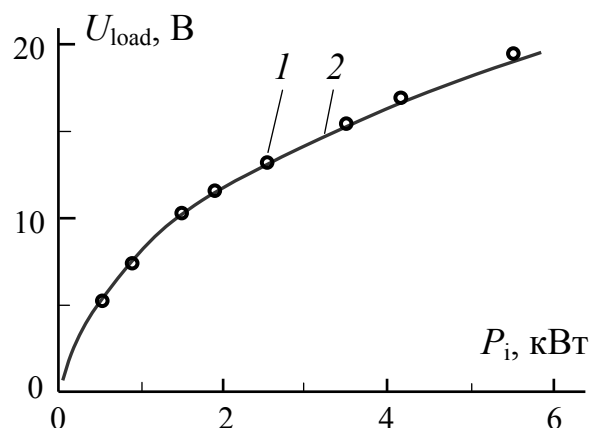


Рисунок 15 – Зависимости напряжения U_{load} от мощности P_i для ваттметра ДЛЖМ 5.714.002: 1 – экспериментальные значения; 2 – расчёт выполнен по п. 11 таблицы.

На рисунке 14 представлены теоретическая зависимость и экспериментальные значения U_{load} от R для ваттметра ДЛЖМ 5.714.001 при выполнении условия $P_i = \text{const}$. Из рисунка видно, что с увеличением сопротивления R наблюдается линейное падение напряжения U_{load} , а значение $U_{\text{load}} = 0$ определяет сопротивление датчика напряжения, при котором выполняется условие для датчиков тока и напряжения.

На рисунке 15 показаны теоретическая зависимость и экспериментальные значения U_{load} от P_i для ваттметра ДЛЖМ 5.714.002. Из них следует, что аналитическая модель, изложенная в диссертационной работе, имеет хорошее количественное согласие с экспериментом.

Погрешность экспериментальных значений U_{load} , приведённых на рисунках 14 и 15, не превышала 5 %.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Разработаны методики расчёта П-контура, параллельного колебательного контура с неполным включением и контура с делением ВЧ мощности с учётом возбуждаемого в контуре типа резонанса, адаптированные к расчёту нагрузочных систем для ёмкостного возбуждения плазмы.

2. Показано, что для нагрузочных систем с использованием П-контура или параллельного колебательного контура с неполным включением их безразмерная входная ёмкость (или индуктивность) не зависит от типа возбуждаемого резонанса, а зависит от согласуемых сопротивлений, выходной ёмкости (или индуктивности) и частоты электромагнитных колебаний.

3. Установлено, что для П-контура тип возбуждаемого резонанса зависит от согласуемых сопротивлений, частоты, а также выходной ёмкости контура.

4. Рассчитаны электрические схемы замещения для распылительного магнетрона, возбуждающего плазму, на основе экспериментально полученного результата зависимости ВЧ напряжения U от активной мощности P_L , имеющей степенной вид $U = a P_L^b$, и плазменного конденсатора с обкладками сложной геометрии.

5. Теоретически найдена зависимость активного сопротивления проводника с покрытием на ВЧ от толщины покрытия, на которой установлено существование экстремального значения.

6. Определена оптимальная толщина покрытий для проводников на частоте 13,56 МГц (например, для меди с покрытием из серебра – 24,4 мкм; для бронзы БрКМц3-1 с покрытием из меди – 27,8 мкм).

7. Разработаны и созданы ваттметры ВЧ мощности, используемые в электрических цепях нагрузочных систем для ёмкостного возбуждения плазмы.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Л1 **Фортов, В.Е.** Физика неидеальной плазмы / В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, И.Т. Якубов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 528 с.
- Л2 **Муравьёв, О.Л.** Радиопередающие устройства связи и вещания / О.Л. Муравьёв. – М.: Радио и связь, 1983. – 352 с.
- Л3 **Белянин, А.Ф.** Устройство высокочастотного магнетронного распыления для выращивания тонких плёнок / А.Ф. Белянин, П.В. Пашенко, А.П. Семёнов // ПТЭ. – 1991. – № 3. – С. 220 – 222.
- Л4 **Потапенко, И.П.** Система высокочастотного распыления в установке ВУП-4 / И.П. Потапенко // ПТЭ. – 1993. – № 5. – С. 192 – 193.
- Л5 **Самойлов, С.А.** Моделирование устройств согласования высокочастотных генераторов с газоразрядными нагрузками: дис...канд. техн. наук: 05.13.14 / Самойлов Сергей Александрович. – Владимир, 1998. – 187 с.
- Л6 **Шимони, К.** Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. – 775 с.
- Л7 **Головков, А.А.** Синтез и анализ квазинедиссипативных взаимных одночастотных и двухчастотных сумматоров и делителей мощности с управляемыми характеристиками / А.А. Головков, С.В. Ковалёв // Антенны. – 2003. – Вып. 2 (69). – С. 61 – 79.
- Л8 **Райзер, Ю.Р.** Физика газового разряда / Ю.Р. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 591 с.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- 1 **Морозов, В.А.** Высокочастотные нагрузочные системы с ёмкостным возбуждением плазмы для плёночных технологий / В.А. Морозов, Г.М. Михеев, Р.Г. Зонов // «Нанотехнологии – производству - 2006». Труды конференции, 29 – 30 ноября 2006 г., Фрязино 2006. – М.: «Янус-К», 2006. – С. 266 – 280.
- 2 **Морозов, В.А.** Определение падающей, отражённой и активной мощностей в двухпроводной линии передачи электрической энергии / В.А. Морозов // Электротехника. – 2006. – № 12. – С. 25 – 29.
- 3 **Скурихин, С.А.** Устройство автоматического согласования / С.А. Скурихин, С.В. Грехнев, В.А. Морозов, Н.Е. Грязев // Информационный листок о научно-техническом достижении № 86-2332. – М.:ВИМИ, 1986. – 3 с.
- 4 **Морозов, В.А.** Особенности расчёта контура третьего вида, используемого в нагрузочных системах высокочастотных технологических установок / В.А. Морозов // Электротехника. – 2005. – № 2. – С. 59 – 64.
- 5 **Морозов, В.А.** Цепь согласования из параллельного колебательного контура с неполным включением для высокочастотной нагрузочной системы / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Материаловедение и обработка материалов: сб. научн. трудов / отв. за выпуск А.В. Трубачев; гл. ред. В.Б. Дементьев. – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2005. – С. 231 – 242.
- 6 **Морозов, В.А.** Особенности расчёта высокочастотной нагрузочной системы с цепью согласования из параллельного колебательного контура с неполным

- включением / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Электротехника. – 2006. – № 8. – С. 53 – 58.
- 7 **Морозов, В.А.** Расчёт характеристик рабочего конденсатора с прямоугольными электродами / В.А. Морозов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 41 – 44.
- 8 **Морозов, В.А.** Сопротивление проводника с покрытием на частоте 13,56 МГц / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Шестая российская университетско-академическая научно-практическая конференция: материалы конференции: Ч.II. Физика. Математические науки. Компьютерные науки. – Ижевск, 2004. – С. 26.
- 9 **Морозов, В.А.** Исследование активного сопротивления проводника с покрытием на высокой частоте / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Электротехника. – 2004. – № 3. – С. 30 – 35.
- 10 **Морозов, В.А.** Расчёт контактной пары для экранированного датчика измерения высокочастотного тока / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Вестник ИжГСХА. – 2005. – № 3 (6). – С. 8 – 9.
- 11 **Морозов, В.А.** Особенности активного сопротивления электрического провода с покрытием на высокой частоте / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Научное обеспечение реализации национальных проектов в сельском хозяйстве: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. – Ижевск: ФГОУ ВПО ИжГСХА, 2006. – Т. III. – С. 225 – 229.
- 12 **Морозов, В.А.** Простой расчёт поперечного сечения электрического провода на низких и высоких частотах / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Электротехника. – 2005. – № 4. – С. 54 – 60.
- 13 **Морозов, В.А.** Измерение электромагнитной мощности на высокой частоте / В.А. Морозов, Г.М. Михеев // Проблемы механики и материаловедения: III науч.-практ. конф., Ижевск, 14 – 15 июня 2006 г.: тез. докл. – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2006. – С. 92 – 93.
- 14 **Морозов, В.А.** Исследование высокочастотного ваттметра с датчиками тока и напряжения / В.А. Морозов // Международная научная конференция «75 лет высшему образованию в Удмуртии»: материалы конференции: Ч.2. Естественные науки. – Ижевск, 2006. – С. 36 – 37.
- 15 **Морозов, В.А.** Ваттметр для высокочастотной системы с плазменной нагрузкой / В.А. Морозов, Г.М. Михеев, Р.Г. Зонов // Харьковская нанотехнологическая ассамблея. Том I. Вакуумные нанотехнологии и оборудование: сб. докл. 7-й Международной конф. «Вакуумные нанотехнологии и оборудование», Международного семинара «Вакуумно-дуговой разряд с холодным катодом: физика, технологии и устройства», Международного науч.-практ. симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности» / под общ. ред. И.М. Неклюдова, В.М. Шулаева. – Харьков: ННЦ «ХФТИ»: ИПП «Контраст», 2006. – С. 41 – 45.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика

Подписано в печать 08.11.2007. Формат 60x84 1/16

Тираж 100 экз. Заказ № 1674

Типография ГОУВПО «Удмуртский государственный университет»
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 4