

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра радиофизики и электроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для самостоятельной работы по дисциплине
«ЭЛЕКТРОНИКА СВЧ»
студентов магистратуры по направлению 03.04.02 - Физика
Очная форма обучения

Семенов А. Л.

Ульяновск 2020

Методические указания для самостоятельной работы по дисциплине «Электроника СВЧ» студентов магистратуры по направлению 03.04.02 - Физика. Очная форма обучения. Семенов А. Л. - Ульяновск: УлГУ, 2020.

Настоящие методические указания предназначены для студентов магистратуры по направлению 03.04.02 - Физика, изучающих дисциплину «Электроника СВЧ». В работе приведены методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы, задания для самостоятельного выполнения, список рекомендуемой литературы, программное обеспечение по дисциплине. Предназначены для студентов очной формы обучения при подготовке к лабораторным занятиям и к экзамену (зачету) по данной дисциплине. Рекомендованы к использованию Ученым советом инженерно-физического факультета высоких технологий УлГУ Протокол № _____ от «_____» 2020 г.

Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы.

По данной дисциплине организуется и проводится внеаудиторная самостоятельная работа.

Самостоятельная работа студентов, предусмотренная учебным планом в объеме не менее 50-70% общего количества часов, должна соответствовать более глубокому усвоению изучаемого курса, формировать навыки исследовательской работы и ориентировать студентов на умение применять теоретические знания на практике.

Самостоятельная работа по данной дисциплине состоит из следующих модулей:

- подготовка к лабораторным занятиям;
- подготовка к зачету (экзамену).

При подготовке к лабораторным занятиям и контрольным мероприятиям рекомендуется руководствоваться учебниками и учебными пособиями, в том числе и информацией, полученной в Internet.

Студентам рекомендуется следующий порядок организации самостоятельной работы над темами и подготовки к практическим занятиям:

- ознакомиться с содержанием темы;
- прочитать материал лекций, при этом нужно составить себе общее представление об излагаемых вопросах;
- прочитать параграфы учебника, относящиеся к данной теме;
- перейти к тщательному изучению материала, усвоить теоретические положения и выводы, при этом нужно записывать основные положения темы (формулировки, определения, термины, воспроизводить отдельные схемы и чертежи из учебника и конспекта лекций).

Результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем и учитываются при аттестации студента (зачет).

2. Задания для самостоятельного выполнения.

Раздел 1. Электродинамические устройства, обеспечивающие взаимодействие электромагнитного поля с электронными потоками и передачу СВЧ энергии.

Волноводы СВЧ поля. Коаксиальная линия. Эквивалентная схема коаксиальной линии. Объемные резонаторы СВЧ поля. Эквивалентные схемы объемного резонатора. Расчет резонансных частот и добротности объемного резонатора. Замедляющие структуры. Эквивалентные схемы замедляющих структур. Пространственные гармоники. Фазовые и групповые скорости пространственных гармоник. Волны в структурах с нормальной и аномальной дисперсией.

Рекомендации по изучению раздела:

Вопросы раздела изложены в учебно-методическом пособии [2] на с.20-60.

Раздел 2. Создание неоднородных электронных потоков и возбуждение электромагнитного поля неоднородным электронным потоком.

Модуляция электронного потока по скорости в продольном управляющем электрическом поле. Группировка электронов в промодулированном по скорости электронном потоке. Наведенный ток. Возбуждение электромагнитного поля потоком, пронизывающим плоскоэлектродный промежуток. Пролетный и отражательный

клистрон.

Рекомендации по изучению раздела:

Вопросы раздела изложены в учебно-методическом пособии [5] на с.12-144.

Раздел 3. Взаимодействие продольного СВЧ электрического поля с неоднородным электронным потоком.

Волны пространственного заряда. Закон дисперсии и энергия волн пространственного заряда. Взаимодействие волны пространственного заряда с продольным СВЧ электромагнитным полем бегущей волны. Лампа бегущей волны. Лампа обратной волны.

Рекомендации по изучению раздела:

Вопросы раздела изложены в учебно-методическом пособии [5] на с.145-168.

Раздел 4. Взаимодействие электромагнитного поля с электронным потоком, движущимся по криволинейной траектории.

Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях. Отбор энергии из потока, движущегося в скрещенных полях. Магнетрон. Релятивистский электрон в скрещенных электрическом и магнитном полях. Ускорители электронов для релятивистских СВЧ приборов.

Рекомендации по изучению раздела:

Вопросы раздела изложены в учебно-методическом пособии [5] на с.169-210.

3. Вопросы для текущего контроля при выполнении лабораторных работ

Лабораторные работы из учебно-методического пособия [9]:

Лабораторная работа №1. Распределение напряжения вдоль волновода

1. Что называют фазой волны и коэффициентом фазы? Что показывает коэффициент фазы? Вычислите длину волны при $\beta=0.1\pi$.
2. Дайте определение амплитуды волны. Что называют длиной ослабления амплитуды волны и коэффициентом ослабления? Вычислите длину ослабления при $\alpha=0.01$.
3. Дайте определение коэффициента отражения. Как он зависит от сопротивления нагрузки и в каких пределах меняется?
4. Чему равна амплитуда отраженной волны A_2 в согласованном режиме, при холостом ходе и при коротком замыкании?
5. Изобразите схематично зависимости u_n (8) от n вблизи узла N .
6. Какое напряжение показывает вольтметр на рис.1, если в волноводе распространяется волна (1)?

Лабораторная работа №2. Зависимость входного сопротивления волновода от его относительной длины

1. Дайте определение входного сопротивления волновода и относительной длины волновода δ . Поясните формулу (11).
2. При каких значениях δ входное сопротивление волновода становится бесконечным? Нарисуйте схематично зависимости $|Z_{вх}(\delta)|$ (12).
3. Как связана частота с относительной длиной волновода? Почему?

4. Выведите формулы (10) из формулы (9).
5. Выведите формулу (9).

Лабораторная работа №3. Зависимость входного сопротивления волновода от сопротивления нагрузки

1. Дайте определение входного сопротивления волновода и относительной длины волновода δ .
2. Выведите формулы (14) и (15) из уравнения (9). Нарисуйте схематично графики зависимости $Z_{вх}(Z_n)$.
3. Почему в работе частоту приложенного напряжения берут равной 0.368кГц и 0.735кГц?
4. Каким должно быть волновое сопротивление волновода, согласованно связывающего каскад с выходным сопротивлением Z_1 с каскадом с входным сопротивлением Z_2 ? Почему?

Лабораторная работа №4. Закон дисперсии волновода

1. Что называется законом дисперсии? Нарисуйте схематично график зависимости $f(\beta)$ (20).
2. Что называется первой зоной Бриллюэна? Чем отличаются волны с $\beta > 0$ и $\beta < 0$?
3. Опишите метод определения коэффициента фазы β . Нарисуйте схематично график зависимости u_{16}/u_{17} от β .
4. Выведите уравнения (16), (20), (22).

Лабораторная работа №5. Зависимость коэффициента ослабления волновода от частоты

1. Покажите, что зависимость (17) при $\beta = \pi - i\alpha$ описывает стоячую волну? Чему равна ее амплитуда?
2. Что называют коэффициентом ослабления? Какой у него физический смысл? Чем обусловлено ослабление волны напряжения при $f > f_0$?
3. Дайте определение полосы пропускания волновода.
4. Нарисуйте схематично график зависимости $\alpha(f)$. Выведите уравнение (24).
5. Объясните формулу (25).

Лабораторная работа №6. Зависимость времени задержки сигнала в волноводе от частоты

1. Дайте определение фазовой скорости. В каких единицах она измеряется и что показывает? Чему равна фазовая скорость при $f \ll f_0$, $f = f_0$ и $f = 2f_0$?
2. Дайте определение групповой скорости. Предложите метод ее измерения в волноводе.
3. Выведите формулу (28). Нарисуйте схематично график зависимости $\tau(f)$ (28).
4. Выведите формулу для групповой скорости в зависимости от частоты. Чему равна групповая скорость при $f \ll f_0$, $f = f_0$ и $f = 2f_0$?

Лабораторная работа №7. Коэффициент полезного действия волновода

1. Что называется коэффициентом полезного действия? В каких пределах он меняется?
2. Чему равен КПД в режиме холостого хода и при коротком замыкании?

3. Как влияет отраженная от нагрузки волна на КПД? При какой нагрузке КПД максимален? Чему он равен?
4. Выведите зависимости $\eta(Z_n)$ и $P(Z_n)$ для постоянного тока.

Лабораторная работа №8. Коэффициент бегущей волны

1. Что называется коэффициентом бегущей волны? Что он описывает и в каких пределах меняется?
2. Получите формулу (36). Постройте график зависимости КБВ от Z_n/Z .
3. Что называется коэффициентом стоячей волны? Постройте график зависимости КСВ от Z_n/Z .
4. Почему соседние экстремумы амплитуды колебаний напряжения находятся в узлах 10 и 17? Где находится минимум и где максимум?
5. В чем состоит метод векторных диаграмм?

Лабораторная работа №9. Резонансные частоты резонатора

1. Обоснуйте граничные условия (37).
2. Чему равно напряжение u_0 при резонансе?
3. Нарисуйте схематично распределение напряжения u_n вдоль волновода при колебаниях на 1-ой и 2-ой собственных частотах ($m=1$, $m=2$).
4. Сколько длин волн укладывается на длине волновода при колебаниях на m -ой собственной частоте?
5. Напишите граничные условия и ответьте на вопросы 2-4 в случае короткого замыкания выхода волновода.

Лабораторная работа №10. Форма резонансной кривой резонатора

1. Нарисуйте схематично график зависимости $u(f)$ (42).
2. На каких частотах из таб.10.2 ожидается максимум и минимум напряжения?
3. Выведите формулы (41), (42), (43).

Лабораторная работа №11. Коэффициент передачи волновода

1. Дайте определение коэффициента передачи по напряжению? Чему он равен в согласованном режиме, при коротком замыкании и в режиме холостого хода?
2. В переменных (Z_n, K) нарисуйте схематично область допустимых значений коэффициента передачи $K(Z_n, f)$.
3. В чем состоит метод векторных диаграмм?

4. Вопросы к зачету

1. Уравнения электромагнитного поля и уравнения движения электрона.
2. Коаксиальный волновод. Волны в волноводе.
3. Отражение волн от границы коаксиального волновода.
4. Входное сопротивление коаксиального волновода.
5. Объемные резонаторы СВЧ поля.
6. Замедляющие структуры СВЧ поля.
7. Пространственные гармоники замедляющих структур СВЧ поля.
8. Волновое уравнение для пространственных гармоник замедляющих структур СВЧ поля.
9. Модуляция электронного потока по скорости в продольном управляющем электрическом поле.
10. Группировка электронов в промодулированном по скорости

- электронном потоке.
11. Пролетный клистрон.
 12. Отражательный клистрон.
 13. Лампа бегущей волны.
 14. Магнетрон.
 15. Волны пространственного заряда в одномерном электронном потоке.
 16. Энергия волн пространственного заряда.
 17. Электронный поток в электромагнитном поле.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) Список рекомендуемой литературы

основная

1. Петрушанский, М. Г. Электронные приборы СВЧ [Электронный ресурс] : учебное пособие / М. Г. Петрушанский. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2017. — 107 с. — 978-5-7410-1838-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78927.html>
2. Шостак, А. С. Антенны и устройства СВЧ. Часть 1. Устройства СВЧ [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. С. Шостак. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 125 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14003.html>
3. Шостак, А. С. Антенны и устройства СВЧ. Часть 2. Антенны [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. С. Шостак. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 168 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/14004.html>

дополнительная

4. Куц, Г. Г. Приборы и устройства оптического и СВЧ диапазонов : учебное пособие / Г. Г. Куц, Ж. М. Соколова, Л. И. Шангина. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 414 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/14020.html>
5. Соколова, Ж. М. Приборы и устройства СВЧ, КВЧ и ГВЧ диапазонов : учебное пособие / Ж. М. Соколова. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. — 283 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/13961.html>
6. **Измерение параметров элементов СВЧ трактов** : учеб. пособие / Завьялов Арнольд Семенович, М. Н. Бабина, Г. Е. Дунаевский. - Томск : Томск. ун-т, 1983. - 133 с.
7. **Электродинамика и техника СВЧ** : учебник по спец."Электрон. приборы и устройства" / Григорьев Андрей Дмитриевич. - Москва : Высшая школа, 1990. - 335 с.
8. Приборы сверхвысоких частот и оптического диапазона в вопросах и ответах. Часть 2. Полупроводниковые приборы СВЧ : учебное пособие / составители Г. М. Аристархов, А. А. Елизаров, В. И. Николотов. — М. : Московский технический университет связи и информатики, 2012. — 48 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/63353.html>

учебно-методическая

9. **Семенов А.Л.** Электрический волновод : методические указания к лабораторным работам / А. Л. **Семенов**; УлГУ, ИФФВТ, Каф.

радиофизики и электроники. - Ульяновск : УлГУ, 2020. - Загл. с экрана;
Неопубликованный ресурс. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 491 КБ).
- Текст : электронный.

10. **Электродинамика СВЧ** : лабораторный практикум / С. А. Афанасьев, А. П. Гераскин; ИФФВТ. - Ульяновск : УлГУ, 2007. - 72 с. –
Режим доступа: <ftp://10.2.96.134/Text/afanasjev1.pdf>

11. **Введение в электродинамику СВЧ** : учеб. пособие / С. А. Афанасьев, Д. Г. Санников; УлГУ, ИФФВТ. - Ульяновск : УлГУ, 2012. -
60 с. – Режим доступа: <ftp://10.2.96.134/Text/afanasjev3.pdf>

б) Программное обеспечение:

- Операционная система Windows;
- Пакет офисных программ Microsoft Office.

в) Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы:

1. Электронно-библиотечные системы:

1.1. **IPRbooks** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ группа компаний Ай Пи Эр Медиа. - Электрон. дан. - Саратов, [2019]. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru>.

1.2. **ЮРАЙТ** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО Электронное издательство ЮРАЙТ. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru>.

1.3. **Консультант студента** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО Политехресурс. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/pages/catalogue.html>.

1.4. **Лань** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная

система/ ООО ЭБС Лань. - Электрон. дан. – С.-Петербург, [2019]. - Режим доступа: <https://e.lanbook.com>.

1.5. **Znanium.com** [Электронный ресурс]: электронно-библиотечная система/ ООО Знаниум. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <http://znanium.com>.

2. **КонсультантПлюс** [Электронный ресурс]: справочная правовая система/ Компания «Консультант Плюс». - Электрон. дан. - Москва: КонсультантПлюс, [2019].

3. **База данных периодических изданий** [Электронный ресурс]: электронные журналы/ ООО ИВИС. - Электрон. дан. - Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://dlib.eastview.com/browse/udb/12>.

4. **Национальная электронная библиотека** [Электронный ресурс]: электронная библиотека. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://нэб.рф>.

5. **Электронная библиотека диссертаций РГБ** [Электронный ресурс]: электронная библиотека/ ФГБУ РГБ. - Электрон. дан. – Москва, [2019]. - Режим доступа: <https://dvs.rsl.ru>.

6. **Федеральные информационно-образовательные порталы:**

6.1. Информационная система [Единое окно доступа к образовательным ресурсам](http://window.edu.ru). Режим доступа: <http://window.edu.ru>.

6.2. Федеральный портал [Российское образование](http://www.edu.ru). Режим доступа: <http://www.edu.ru>.

7. **Образовательные ресурсы УлГУ:**

7.1. Электронная библиотека УлГУ. Режим доступа: <http://lib.ulsu.ru/MegaPro/Web>.

7.2. Образовательный портал УлГУ. Режим доступа: <http://edu.ulsu.ru>.

8. **Профессиональные информационные ресурсы:**

8.1. Материалы о менеджменте качества. Режим доступа: <http://quality.eup.ru>.

8.2.Издательство «Стандарты и качество». Режим доступа:
<http://www.stq.ru>.

8.3.Ассоциация Деминга. Режим доступа: <http://www.deming.ru>.

Центр «Приоритет». Режим доступа: <http://www.centerprioritet.ru>.