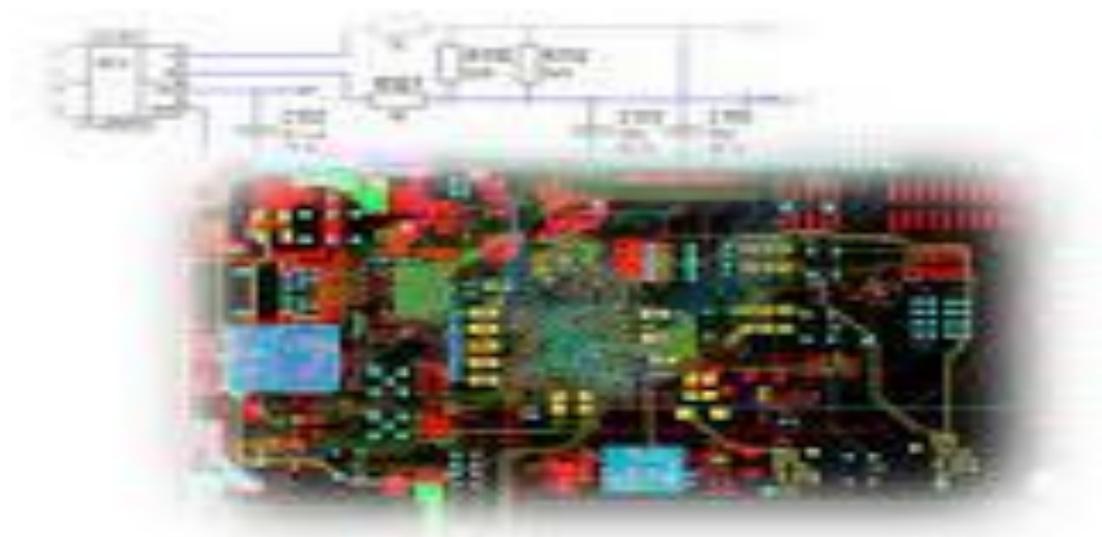


**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ХАБАРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ (ФИЛИАЛ)
(ХИИК СибГУТИ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»
(СибГУТИ)**

**Р.М. Данилов
Н.С. Данилова
Н.В. Шульженко**



**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**
Учебное пособие
Часть 1

Хабаровск 2024



Данилов Р.М. Программное обеспечение схмотехнических устройств: Учебное пособие. В 2-х частях. Часть 1 / Р.М. Данилов, Н.С. Данилова, Н.В. Шульженко; Под общ. ред. Р.М. Данилова.– Хабаровск: Изд-во XIIK «СибГУТИ». 2024. – 72 с.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кудряшов А.Б. – доцент, кандидат педагогических наук, доцент кафедры ФГКОУ ВО «ДВЮИ МВД России имени И.Ф. Шилова» (г. Хабаровск)

Прокопцев В.О. – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии» XIIK (филиал) ФГБОУ ВО «СибГУТИ» (г. Хабаровск)

Соломонов К.Н. – профессор, доктор технических наук, Почетный работник сферы образования РФ, профессор кафедры Воронежского филиала ФГБОУ ВО «РГУПС» (г. Воронеж)

Учебное пособие соответствует требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования для студентов очной, формы обучения по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

В работе изложены основные понятия программного обеспечения, содержит материалы, соответствующие дисциплине «Программное обеспечение схмотехнических устройств». Рассмотрены полупроводниковые электронные приборы, операционные усилители, автогенераторы, цифровые микросхемы, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, источники питания, микропроцессорные устройства и т.д.

Помимо аналитических и графических методов расчета в учебном пособии применяется современная программа компьютерного моделирования электронных схем TINA-TI. Эта бесплатная студенческая версия, разработанная компаниями «DesignSoft» и «Texas Instruments», использует Spice модели электронных компонентов и позволяет проводить анализ и проектирование разнообразных аналоговых, цифровых, микропроцессорных и смешанных устройств на современном уровне компьютерных технологий.

Учебное пособие предназначено в первую очередь для студентов и слушателей образовательных учреждений. Оно может быть полезно также практическим работникам, интересующимся вопросами программного обеспечения схмотехнических устройств.

*Издается согласно Плана редакционно-издательской деятельности
XIIK (филиал) ФГБОУ ВО «СибГУТИ» на 2024 год.*

ISBN 5-86091-117-7

© Данилов Р.М., Данилова Н.С., Шульженко Н.В., 2024.

© XIIK (филиал) ФГБОУ ВО «СибГУТИ», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Тема 1 Цели, задачи, этапы и сущность схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств.....	6
Тема 2. Методы оптимизации проектных решений.....	9
Тема 3. Пакеты программ схемотехнического проектирования радиоэлектронных средств и устройств.....	13
Тема 4. Анализ и расчет электронных схем.....	21
Тема 5. Алгоритмы анализа аналоговых устройств.....	23
Тема 6. Алгоритмы анализа цифровых устройств.....	28
Тема 7. Параметры моделей радиоэлектронных устройств.....	32
Тема 8. Параметры анализа цифровых устройств.....	45
Тема 9. Параметры элементов цифровых устройств.....	48
Тема 10. Моделирование электрических конденсаторов, индуктивности, трансформаторов.....	51
Тема 11. Моделирование полупроводниковых диодов.....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАНЯТИЯМ	70

ВВЕДЕНИЕ

Всевозможные системы обработки данных состоят из большого количества электронных устройств различного назначения. Эти устройства выполнялись в свое время на отдельных транзисторах, затем на микросхемах малой и средней степени интеграции. В настоящее время практически любую систему можно реализовать в виде большой интегральной схемы (БИС). Но разрабатывать для каждой из великого множества систем свою БИС экономически нецелесообразно. Дело в том, что себестоимость производства микросхем определяет их тираж, который в свою очередь зависит от степени универсальности изделия. Поэтому в настоящее время стараются по возможности унифицировать элементную базу, используя два пути реализации универсального схмотехнического устройства.

Электроника – это наука о взаимодействии заряженных частиц (электронов, ионов) с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых в основном для передачи, обработки и хранения информации.

Историю развития электроники можно условно разделить на четыре этапа.

Первый этап относится к концу XIX века и связан с открытием электрона и развитием электровакуумной техники и электронных вакуумных ламп. Началом развития ламповой техники принято считать изобретение русским ученым электротехником Александром Николаевичем Лодыгиным (1847-1923) в 1873 году электрической лампы накаливания с угольным стержнем.

На базе этого изобретения уже в 1883 г. американский инженер Томас А. Эдисон (1847-1931) открыл и описал явление термоэлектронной эмиссии и прохождения электрического тока через вакуум. Русский физик, заслуженный профессор Императорского Московского университета А.Г. Столетов (1839-1896) в 1888 году открыл основные законы фотоэффекта. Важнейшую роль в развитии электроники сыграло открытие русским ученым, профессором в 1895 году Александром Сергеевичем Поповым (1859-1906) возможности передачи радиоволн на расстояние. Это открытие дало огромный импульс для развития и внедрения различных электронных приборов в практику. Появился спрос на устройства для генерации, усиления и детектирования электрических сигналов.

Второй этап истории развития электроники охватывает первую половину 20-го века. Этот период характеризуется разработкой и совершенствованием электровакуумных приборов (ЭВП) и систематизированным изучением их физических свойств. В 1904 г. была сделана простейшая двухэлектродная электронная лампа – диод для детектирования электрических колебаний в радиотехнике.

Третий этап относится к концу 40-х и началу 50-х годов и характеризуется бурным развитием дискретных полупроводниковых приборов. Развитию полупроводниковой электроники предшествовали работы в области физики твердого тела. Большие заслуги изучения физики полупроводников принадлежат школе советских физиков, длительное время возглавляемой академиком А.Ф. Иоффе (1880-1960). Теоретические и экспериментальные исследования электрических свойств полупроводников, выполненные советскими учеными: И.В. Курчатовым (1903-1960), В.П. Жузе (1904-1993), В.Г. Лошкаревым (1903-

1973) и другими, позволили создать стройную теорию полупроводников и определить пути их применения.

Одновременно с разработкой новых типов приборов велись работы по совершенствованию технологических методов их изготовления. 50-е годы прошлого века знаменуются исследованиями в области физики твердого тела и переходом к квантовой электронике, приведшей к развитию лазерной техники. Большой вклад в развитие этой отрасли науки и техники внесли советские ученые Н.Г. Басов (1922-2001) и А.М. Прохоров (1916-2002), удостоенные Ленинской (в 1959 г.) и Нобелевской (в 1964 г.) премий.

Четвертый этап развития электроники берет начало в 60-е годы прошлого века. Он характеризуется разработкой и практическим освоением интегральных микросхем, совместивших в едином технологическом цикле производство активных и пассивных элементов функциональных устройств. Уровень интеграции больших интегральных схем (БИС) достигает тысяч элементов в одном кристалле. Освоение выпуска больших и сверхбольших интегральных схем позволило перейти к созданию функционально законченных цифровых устройств – микропроцессоров, рассчитанных на совместную работу с устройствами памяти и обеспечивающих обработку информации и управление по заданной программе.

Схемотехника – научно-техническое направление, охватывающее проблемы анализа и синтеза электронных устройств радиотехники, связи, автоматики, вычислительной техники в целях обеспечения оптимального выполнения ими заданных функций и расчета параметров, входящих в них элементов.

Разработку современных радиоэлектронных устройств и систем управления инженеры выполняют, используя компьютерные программы сквозного проектирования электронных устройств (OrCAD, Proteus, TINA и др.). Эти программы позволяют выполнить разработку схемы устройств, провести анализ работоспособности устройства в различных температурных условиях, выполнить синтез оптимальных параметров, программирование микроконтроллеров, разработать печатные платы и т.д.).

В учебном пособии мы будем использовать моделирование в программной среде TINA, разработанной компанией «DesignSoft» с участием «Texas Instruments». Это позволит наглядно иллюстрировать изучаемые темы и даст студентам эффективный инструмент для экспериментальной проверки расчетов схем и самостоятельных разработок электронных устройств.

Тема 1.

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ, ЭТАПЫ И СУЩНОСТЬ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Цели и задачи дисциплины.
2. Основные понятия программного обеспечения схмотехнических устройств.
3. Проектирование программного обеспечения схмотехнических устройств.

Необходимость сокращения сроков и повышения качества разработки радиоэлектронных устройств (РЭУ) и систем предопределила широкое применение ЭВМ и методов автоматизации проектирования радиоэлектронной техники различного назначения.

При этом целью проектирования является создание более совершенных РЭУ, отличающихся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов функционирования, более совершенной элементной базы и структуры.

Целью является изучение современных методов математического моделирования функциональных свойств компонентов устройств РЭУ, а также изучение методов функционального моделирования цифровых РЭУ с элементами синтеза и интеграции в среде САПР, с учетом влияния дестабилизирующих факторов и их конструктивно-технологических особенностей.

Основные задачи – изучение методов моделирования современной элементной базы, устройств аналоговых и цифровых РЭУ. Изучение методов анализа их функциональных свойств. Изучение функционально – логических методов моделирования РЭУ. Освоение методов синтеза и оптимизации функциональных свойств РЭУ.

С учетом степени новизны разрабатываемых изделий различают следующие **задачи проектирования**:

1. Частичная модернизация существующего РЭУ за счет изменения его параметров структуры и конструкции, обеспечивающая сравнительно небольшое (до нескольких десятков процентов) улучшение одного или нескольких показателей качества для решения тех же или новых задач.

2. Существенная модернизация, предполагающая значительное (в несколько раз) улучшение показателей качества.

3. Создание новых РЭУ, основанных на ранее не применявшихся принципах действия, для резкого (на несколько порядков) увеличения показателей качества при решении тех же или существенно новых задач.

С точки зрения последовательности выполнения различают **основные стадии проектирования**:

1. Предварительное проектирование, результатом которого являются **технические предложения (аванпроект)**. Эта стадия в наибольшей степени насыщена элементами научного поиска, теоретическими расчетами, экспериментальными исследованиями. Они завершаются обычно созданием лабораторных макетов.

2. Эскизное проектирование, результатом которого является эскизный проект. На этой стадии усилия разработчиков во многом направлены на поиски эффективных конструкторских решений. Она также связана с большим объемом теоретических изысканий, сложных расчетов и заканчивается созданием экспериментального образца проектируемого изделия и его тщательными экспериментальными исследованиями (натурным моделированием).

3. Техническое проектирование, при котором выполняется тщательная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений. На стадии технического проектирования создается техническая документация на разрабатываемую аппаратуру и процессы ее производства. Итогом является технический проект, содержащий необходимую документацию и опытный образец изделий, прошедший всесторонние испытания в реальных условиях эксплуатации. При этом следует подчеркнуть чрезвычайную важность и трудоемкость создания технической документации, на основе которой происходит дальнейшее единичное, серийное или массовое производство РЭУ.

По содержанию решаемых задач **процесс проектирования можно разбить на следующие четыре этапа:**

1. Системотехническое проектирование, при котором выбираются и формулируются цели проектирования, обосновываются исходные данные и определяются принципы построения системы. При этом формируется структура проектируемого объекта, его составных частей (функционально завершенных блоков), определяются энергетические и информационные связи между составными частями. В результате формируются частные технические задания на проектирование отдельных составных частей объекта.

2. Схемотехническое (функциональное) проектирование РЭУ, имеющее целью аппаратную реализацию составных частей устройства. При этом выбор элементной базы, принципиальной схемы, структурный и параметрический синтез радиоэлектронных схем (оптимизация параметров) производятся с расчетом обеспечения наилучшего функционирования (и эффективного производства). При выборе элементной базы и синтезе радиоэлектронных схем необходимо учитывать конструкторско-технологические требования.

3. Техническое проектирование (конструирование), решающее задачи компоновки и размещения элементов и узлов, выполнения печатных и проводных соединений, а также задачи теплоотвода, электрической прочности, защиты от внешних воздействий и т.п. На этом этапе разрабатывается техническая документация для изготовления и эксплуатации РЭУ.

4. Технологическая подготовка производства, предполагающая разработку технологических процессов изготовления отдельных блоков и всей системы в целом.

Схемотехническое проектирование, как и другие перечисленные этапы, сводится к формированию описаний проектируемого РЭУ и состоит из отдельных проектных процедур, реализуемых с помощью пакетов прикладных программ автоматизированного проектирования и заканчивающихся частным проектным решением. Типичными для схемотехнического проектирования РЭУ проектными процедурами являются **анализ и синтез** их описаний на различных уровнях рассмотрения.

Процедура синтеза заключается в создании проектного решения (описания) по заданным требованиям, свойствам и ограничениям. Например, широко используются при проектировании РЭУ процедуры синтеза электронных схем по их заданным характеристикам в частотной или временной области. При этом проектирование рассматривается как последовательное решение двух задач: выбора структурной схемы, называемого структурным синтезом, и определения параметров ее элементов (обеспечивающих требуемые характеристики), называемого параметрическим синтезом.

Процедура анализа состоит в определении свойств заданного описания РЭУ. Примером такой процедуры может служить расчет частотных или переходных характеристик электронных схем, определение реакции схемы на заданное воздействие и др.

Анализ позволяет оценить степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям и его пригодность.

Процедуры синтеза и анализа в процессе проектирования РЭУ тесно связаны между собой, поскольку обе они направлены на создание приемлемого или оптимального проектного решения.

Типичной проектной процедурой является оптимизация, которая приводит к оптимальному (по определенному критерию) проектному решению. Например, широко используется оптимизация параметров электронных схем с целью наилучшего приближения частотных характеристик к заданным. Процедура оптимизации состоит в многократном анализе при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам. В сущности, оптимизация обеспечивает создание или синтез проектного решения с поэтапным анализом или оценкой характеристик.

Проектные процедуры состоят из отдельных проектных операций. Например, в процессе анализа математических моделей РЭУ приходится решать дифференциальные и алгебраические уравнения, осуществлять операции с матрицами и т.п. Такие операции могут иметь обособленный характер, но в целом они образуют единую проектную процедуру.

Проектные процедуры и операции выполняются в определенной последовательности, называемой маршрутом проектирования. Маршруты проектирования могут начинаться с нижних иерархических уровней описаний (восходящее проектирование) или с верхних (нисходящее проектирование).

Между всеми этапами проектирования существует глубокая связь и взаимосвязь. Так, определение окончательной конструкции и разработка всей технической документации часто не могут быть выполнены до окончания разработки технологии. В процессе конструирования и разработки технологии может потребоваться коррекция принципиальных схем, структуры системы и даже исходных данных. Поэтому процесс проектирования является не только многоэтапным, но и многократно корректируемым по мере его выполнения, т.е. процесс носит итерационный характер.

В процессе проектирования необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать заданное функционирование, но и оптимизировать ее по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для отдельных частных задач оптимизацию можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако задача

оптимизации часто не поддается формализации. В таких случаях рассматривается несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим опытом, интуицией, и выбирается лучший из них. **Такой подход называется эвристическим многовариантным анализом.** Однако в связи с все возрастающей сложностью РЭУ, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоемкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, катастрофически возрастает. Эта ситуация получила название «тирании альтернатив». Часто на этапе проектирования не удается предвидеть некоторые требования, вытекающие из условий эксплуатации. В таких случаях доводка аппаратуры происходит в процессе испытаний, что удорожает и затягивает проектирование во много раз.

Подобное положение является результатом возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к проектированию и сложности современных радиоэлектронных средств. Указанное противоречие и вызвало интенсивное развитие новой технологии проектирования РЭУ, базирующейся на системном подходе и совершенствовании процессов проектирования с применением математических методов и средств вычислительной техники, комплексной автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ, замене макетирования и натурного моделирования математическим моделированием, использованием эффективных методов многовариантного проектирования и оптимизации, а также повышением качества управления проектированием.

Системный подход позволяет найти оптимальное, в широком смысле, решение задачи проектирования за счет всестороннего, целостного рассмотрения как проектируемого изделия, так и самого процесса проектирования и способен привести к подлинно творческим новаторским решениям, включая крупные изобретения и научные открытия.

Тема 2.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Вопросы

1. Методы оптимизации проектных решений.
2. Параметры оптимизации проектных решений.
3. Классификация параметров радиоэлектронных устройств.
4. Параметры технического задания.

Оптимальные РЭУ могут быть построены либо **методами классического синтеза**, либо **методами оптимизации на ЭВМ** с применением пакетов прикладных программ автоматизации проектирования.

Классический синтез позволяет проектировать относительно несложные, в основном, пассивные устройства, для которых существуют аналитические способы синтеза оптимальных схем. К ним относятся оптимальные частотные фильтры с аппроксимацией Чебышева, Кауэра и др., оптимальные широкополосные согласующие устройства с аппроксимацией Фано, а также различного класса частотно-разделительные и мостовые устройства.

Большинство же устройств из-за отсутствия аналитических методик синтеза проектируется **методами оптимизации на ЭВМ.**

При этом различают **структурную и параметрическую оптимизацию.**

При **структурной оптимизации** определяется наилучшая структура РЭУ, удовлетворяющая заданным требованиям.

При **параметрической оптимизации** определяется такая совокупность внутренних параметров РЭУ, при которой заранее выбранные выходные параметры принимают наилучшие возможные значения.

Полное решение задачи проектирования РЭУ методами параметрической оптимизации на ЭВМ производится в три этапа:

1. Моделирование устройства.
2. Составление целевой функции с выбором тех или иных критериев его качества.
3. Минимизация (максимизация) целевой функции для получения оптимальных внутренних параметров устройства.

Параметры оптимизации проектных решений

При проектировании РЭУ широко применяются методы оптимизации проектных решений, основанные на решении задач **математического** (линейного и нелинейного) **программирования**.

В этих задачах производится поиск минимума или максимума некоторой целевой функции, зависящей от многих переменных при наличии ограничений на эти переменные.

При проектировании РЭУ целевая функция отображает качество работы, стоимость аппаратуры и иные характеристики, зависящие от параметров компонентов, оптимальные значения которых требуется найти в результате решения задачи.

Ограничения же формулируются в виде системы соотношений, сужающих допустимую область изменения параметров компонентов при решении задачи оптимизации РЭУ. Если минимизируемая (максимизируемая) целевая функция и ограничения линейно зависят от переменных, то оптимизация проектных решений может быть выполнена на основе известных из курса математики **методов линейного программирования**. К этим методам относятся симплекс-метод и методы целочисленного линейного программирования.

При нелинейной зависимости целевой функции и ограничений от переменных оптимальное проектирование РЭУ производится на основе решения **задачи нелинейного программирования** методами одномерного поиска оптимального решения, а также градиентными или статистическими методами оптимизации.

Проектирование РЭУ в соответствии с новой технологией основывается на следующих пяти принципах.

Первый принцип предполагает комплексное решение общей задачи проектирования за счет взаимной увязки процедур решения частных задач и этапов проектирования. При этом установление тесной информационной связи между этапами и процедурами позволяет создавать более эффективные РЭУ с точки зрения комплекса функциональных и конструкторско-технологических требований.

Второй принцип заключается в интерактивном режиме проектирования, при котором осуществляется непрерывный процесс диалога «человек-машина». При этом системы автоматизации проектирования выступают в качестве мощного средства обеспечения творческой активности проектировщика, а не заменяют его. Ибо невозможно создать или модернизировать сложную

радиоэлектронную аппаратуру без творческого участия специалиста, сколь ни велика была бы мощность вычислительных средств и сколь ни сложны (и изощрены) были бы формальные методы проектирования.

Третий принцип заключается в широком применении имитационного моделирования радиоэлектронных систем и средств с воспроизведением условий работы, близких к реальным. Имитационное моделирование дает возможность предвидеть реакцию проектируемого объекта на самые различные возмущения, позволяет специалисту в процессе проектирования «видеть» плоды своего труда в действии без макетирования и натурного моделирования. Имитационное моделирование дает возможность проводить испытания различных вариантов проектных решений и в приемлемые сроки выбирать лучший из них с учетом всевозможных случайных факторов и помех.

Четвертый принцип состоит в привлечении для решения задач проектирования новейших высокоэффективных аппаратурных и информационно-программных средств обеспечения проектирования и моделирования РЭУ.

И, наконец, **пятый принцип** состоит в замкнутости процесса автоматизированного проектирования РЭУ.

Классификация параметров радиоэлектронных устройств

Параметр есть некоторая величина, характеризующая элемент, схему или устройство. Параметры подразделяются на параметры схем и параметры технического задания.



Рисунок 1 - Классификация параметров радиоэлектронных устройств

Параметры схемы подразделяются на внутренние и внешние.

Внутренние параметры включают параметры элементов (компонентов) схем: диодов, резисторов, конденсаторов, транзисторов, микросхем и др.

Внутренние параметры подразделяются на топологические, электрофизические, электрические и режимные. Например, в полевом транзисторе концентрация примеси в полупроводнике является электрофизическим параметром, длина и ширина канала топологическими параметрами, крутизна передаточной характеристики – электрическим параметром, предельные значения токов и напряжений – режимными параметрами.

Среди внутренних параметров отдельно выделяют управляемые и неуправляемые параметры. Управляемыми параметрами являются те, изменение которых физически легко осуществимо. К неуправляемым параметрам относят те, изменение которых в рамках рассматриваемой задачи либо неосуществимо, либо нецелесообразно.

Внешние параметры схемы подразделяются на входные и выходные.

Входные параметры, как правило, определяются техническим заданием на разрабатываемое устройство, например, чувствительность усилителя, напряжение питания, динамический диапазон сигналов и т.п.

Выходные параметры – это параметры по которым осуществляется оценка работоспособности схемы: например максимальная амплитуда выходного напряжения усилителя на заданной частоте, выходное сопротивление и коэффициент стабилизации источника вторичного электропитания и т.д. Кроме выходных параметров, являющихся числовыми характеристиками схемы вводят понятие выходных характеристик, т.е. функциональных зависимостей выходных параметров от некоторых величин: например, частоты входного сигнала, изменения напряжения питания, тока в нагрузке и т.п.

При оптимизации электронных схем употребляют термин варьируемые параметры, т.е. внешние и внутренние параметры, изменение которых способно привести к улучшению показателей системы.

Параметры технического задания

Параметры технического задания – это параметры внешней среды, предельные режимные параметры, например, напряжение питания и допуски на него, диапазон рабочих температур и давлений, влажности, предельные значения напряжений и мощностей в отдельных точках схемы. Параметры технического задания используются как система одно- или двухсторонних ограничений, налагаемых на внешние параметры проектируемой схемы.

Термин «расчет схемы» означает определение ее параметров и характеристик при неизменных значениях внутренних параметров схемы и ее структуры: например, расчет статического режима, переходного процесса, АЧХ и ФЧХ схемы.

Для расчета схемы важен правильный выбор базисных переменных, т.е. тех переменных, которые используются для математического описания схемы (токи элементов, узловые потенциалы, гибридное описание).

Анализ схемы – это процесс определения изменения выходных и режимных параметров схемы в зависимости от изменения варьируемых параметров.

Тема 3.

ПАКЕТЫ ПРОГРАММ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Пакеты программ схемотехнического проектирования.
2. Пакеты программ конструкторского проектирования радиоэлектронных средств и устройств.
3. Программные системы для электродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей.

В настоящее время известно большое число пакетов программ, предназначенных для выполнения схемотехнического проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Системы схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых устройств и проектирования печатных плат «DesignCenter» и «DesignLab» разработаны корпорацией

MicroSim. В основу этих систем положен известный пакет программ PSPICE, первые версии которого были разработаны в начале 70-х годов прошлого века в Калифорнийском университете. Возможности этих систем существенно зависят от варианта поставки и операционной системы. Они позволяют выполнять моделирование аналоговых, смешанных аналого-цифровых и просто цифровых радиоэлектронных устройств, синтез цифровых устройств на базе интегральных схем с программируемой логикой, а также моделирование с учетом паразитных емкостей и индуктивностей, присущих реальным печатным платам.

Системы «DesignCenter» и «DesignLab» оснащены графическим редактором принципиальных схем РЭУ, который одновременно является управляющей оболочкой для запуска программных модулей на всех стадиях работы с системами.

Системы позволяют выполнять расчет режимов радиоэлектронных устройств по постоянному и переменному току, спектральный анализ, моделирование переходных процессов в РЭУ, расчет уровней шума, статистический анализ с учетом вариации температуры при работе устройства. Моделирование аналого-цифровых и цифровых устройств выполняется на логическом уровне с подключением аналого-цифровых и цифро-аналоговых интерфейсов для обеспечения связи аналоговой и цифровой частей РЭУ.

В системах может выполняться параметрическая оптимизация аналого-цифровых устройств по заданным критериям при наличии нелинейных ограничений на параметры варьируемых компонентов. Системы имеют графический редактор печатных плат, который в автономном режиме воспринимает информацию о соединениях в формате P-CAD, а в составе системы - от графического редактора принципиальных схем. Компоненты РЭУ автоматически или вручную размещаются на одной или двух сторонах печатной платы, после чего возможна трассировка многослойных соединений в автоматическом или интерактивном режиме. По результатам трассировки создаются командные файлы для изготовления фотошаблонов и сверлильных станков с ЧПУ. Возможна передача данных в систему AutoCAD для выпуска конструкторской документации.

К системам «DesignCenter» и «DesignLab прилагаются многочисленные библиотеки графических символов элементов РЭУ и банки данных с более чем восемью тысячам и математических моделей компонентов (диодов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов, оптопар, операционных усилителей, компараторов напряжения, кварцевых резонаторов, магнитных сердечников, цифровых и аналого-цифровых микросхем) производства различных фирм США, Западной Европы и Японии. Имеется возможность пополнения библиотек.

Примерно такими же возможностями с точки зрения схемотехнического проектирования обладает система ICAP, разработанная фирмой «Intusoft». В основу этой системы также положен пакет программ PSPICE. Система ICAP отличается удобным оконным редактором, возможностью работы с измерительным оборудованием, совместимостью выходных файлов с пакетом P-CAD.

Получившая широкое распространение в конце 70-х начале 80-х годов первая версия программ Super-Compact выдвинула фирму Compact Software в одну из ведущих в мире по разработке программного обеспечения для проектирования радиочастотных устройств, особенно СВЧ диапазона. Пакет Super-Compact оказался очень удачным. Достаточно точные математические модели широкого круга элементов СВЧ-цепей, удобство входного языка и ряд других достоинств привели к широкому распространению этого пакета, ориентированного на проектирование фильтров, согласующих цепей и цепей связи СВЧ-диапазона.

В пакете используются базовые элементы в виде двух-, четырех-, шести- и восьмиполосников, характеризующихся **A-, S-, Y-параметрами**. Допускается включение произвольных многополосников. Пакет позволяет анализировать СВЧ-цепи, содержащие наиболее употребительные конфигурации элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами. Распределенные элементы могут представлять различные типы связанных и одиночных отрезков линий передачи: микрополосковые и полосковые, линии с подвешенной подложкой и коаксиальные, компланарные и щелевые, прямоугольные и круглые волноводы. Распределенные элементы могут характеризоваться как геометрическими, так и электрическими параметрами. При моделировании СВЧ-устройств учитываются электрические неоднородности, влияние дисперсии, излучения, многослойной металлизации проводников, шероховатости поверхности, потери в проводниках и диэлектриках.

Модели полупроводниковых приборов описываются параметрами рассеяния либо матрицами классической теории цепей. Моделирование СВЧ-цепей выполняется на основе аппарата Y-матрицы, причем отдельные части цепи могут описываться с помощью аппарата A-матриц.

Описание устройства производится покомпонентно, причем в одной строке указываются аббревиатурой тип компонента, способ его подключения в цепи и параметры компонента с допустимыми границами изменения параметров в процессе оптимизации.

Оптимизация параметров устройства может выполняться одновременно для нескольких характеристик и в нескольких состояниях. Например, СВЧ-диодный переключатель может одновременно оптимизироваться в режимах «Включено» и «Выключено».

Для оптимизации используется одна из разновидностей градиентного метода и случайный поиск с самообучением. Процесс оптимизации параметров устройства ведется в границах изменения варьируемых параметров, определяемых их физической реализуемостью и точностью моделей компонентов.

Для обеспечения разработчика информацией о параметрах полупроводниковых компонентов, проводников и диэлектрических материалов в пакет включено несколько банков данных, которые могут вызываться на командном уровне для отыскания компонента с заданными техническими характеристиками. Пакет позволяет разработчику формировать свои банки данных.

Вывод информации осуществляется на экран монитора, печать, графопостроитель и может включать схему устройства и ее различные частотные характеристики в табличном виде либо в виде графиков в полярных или декартовых координатах. По требованию разработчика Super-Comrast может построить линии равного усиления, уровня шума, стабильности устройства.

Для точного изучения отдельные участки характеристик могут быть представлены в увеличенном масштабе. Дальнейшим развитием пакета Super-Comrast является вышедшая в середине 80-х годов и полностью с ним совместимая система Microwave Harmonica, позволяющая выполнять моделирование и ряда нелинейных СВЧ-устройств, таких как малошумящие усилители и усилители большого уровня мощности, смесители, генераторы, переключатели и другие устройства радиочастотных трактов. Для моделирования нелинейных устройств в этой системе используется метод гармонического баланса. В начале 90-х годов появляется версия системы Microwave Harmonica, ориентированная на платформу Windows.

Различные версии системы Microwave Harmonica широко используются в России разработчиками радиоаппаратуры различного назначения. В последние годы эту линию программ развивает фирма Ansoft, которой были разработаны новые программные системы: Serenade, позволяющая выполнять моделирование и оптимизацию не только СВЧ-, но и оптоэлектронных устройств и имеющая много версий, в числе которых есть версии, ориентированные на топологическое представление моделируемого устройства.

Имеются версии этой системы, ориентированные на платформы Windows, Super-Spice, в которой путем подключения известной программы Spice решена задача моделирования СВЧ-устройств во временной области; Microwave Success, позволяющая выполнять моделирование систем радиотелефонии; Microwave Explorer – система для моделирования электромагнитных полей в различных элементах радиоэлектронных устройств.

Кроме разработки программного обеспечения фирмой «Ansoft» поддерживаются банки данных с линейными и нелинейными моделями элементов СВЧ- и оптоэлектронной техники. В последние годы широкое распространение получила система APLAC, предназначенная для проектирования и моделирования электрических схем РЭУ.

В состав схем могут входить как цифровые, так и аналоговые компоненты, в том числе устройства СВЧ-диапазона. Предусмотрены следующие виды расчетов: режим по постоянному току, частотные характеристики, спектральная

плотность и коэффициент шума, чувствительность и параметрическая оптимизация, переходные процессы, спектры сигналов, анализ периодических режимов, статистический анализ по методу Монте-Карло.

В основном этот набор опций стандартен, однако аналогичные расчеты проводятся обычно с помощью нескольких разных программ, а система APLAC предоставляет пользователям интегрированную среду разработки радиоэлектронной аппаратуры. Другая важная особенность APLAC - наличие большого набора библиотек элементов принципиальных схем и отдельных блоков, применяемых в аналоговых и цифровых системах связи. По своему функциональному составу эти библиотеки превосходят библиотеки других систем. Кроме того, в состав APLAC входит подпрограмма расчета трехмерных электромагнитных полей микрополосковых конструкций и других устройств диапазона СВЧ. Система APLAC также предоставляет возможность ввода результатов измерений и вывода управляющих сигналов с помощью интерфейсных плат стандарта IEEE-488.

Система Electronics Workbench отличается от других программ схемотехнического моделирования изображает на экране измерительные приборы с органами управления, максимально приближенными к реальности. Пользователь освобождается от изучения довольно абстрактных правил составления заданий на моделирование. Достаточно на схему поместить двухканальный осциллограф и генератор сигналов - и программа сама сообразит, что нужно анализировать переходные процессы. Если же на схеме разместить анализатор спектра, то будет рассчитан режим по постоянному току, выполнена линеаризация нелинейных компонентов и затем произведен расчет характеристик схемы в частотной области. Диапазон анализируемых частот, коэффициент усиления и характер оцифровки данных (в линейном или логарифмическом масштабе) устанавливаются на лицевой панели с помощью мыши. Чтобы начать моделирование, достаточно щелкнуть выключателем. После этого на устройствах индикации цифровых вольтметров и амперметров будет зафиксирован режим по постоянному току, на экране измерителя нарисованы частотные характеристики (амплитудно- или фазочастотные), а на экране осциллографа будут непрерывно изображаться эпюры напряжений до тех пор, пока не заполнится буферная память, а затем можно прекратить моделирование или обнулить память и продолжить наблюдения.

Система Micro-Cap фирмы Spectrum Software нашла наибольшее распространение в студенческой среде как наиболее простая и доступная в изучении, однако перечень ее возможностей достаточно широк. Программа имеет удобный многостраничный редактор принципиальных схем, поддерживающий различные структуры. Имеется возможность описания цифровых компонентов с помощью логических выражений, что в сочетании с библиотекой графических символов типовых операций (суммирование, вычитание, умножение, интегрирование, применение преобразований Лапласа и др.) позволяет моделировать динамические системы, заданные не только принципиальными, но и функциональными схемами.

Кроме того, в системе Micro-Cap имеется специальная программа MODEL для расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов по справочным или экспериментальным данным. Пакет программ Micro-LOG разработан также фирмой Spectrum Software и предназначен для моделирования

цифровых устройств на логическом уровне. При моделировании в пакете используются базовые логические элементы и макрорасширения, представляющие собой ранее созданные схемы на основе базовых логических элементов – отдельных триггеров, регистров, линий для соединения входов и выходов отдельных элементов, программируемых генераторов входных сигналов, тактовых генераторов, задающих шкалу модельного времени.

Моделирование цифровых устройств возможно без учета задержек срабатывания (синхронными алгоритмами) и с учетом задержек срабатывания (асинхронными алгоритмами), которые для отдельных вентилях могут выбираться равными максимальными или минимальными для данной технологии, либо фиксированными из банка данных по конкретной серии микросхем. Пакет позволяет одновременно создавать и моделировать до девяти различных цифровых блоков, каждый из которых может содержать до 200 вентилях.

Результатами моделирования являются временные диаграммы сигналов на различных узлах цифрового устройства на протяжении модельного времени, определенного числом тактов. Программируемые генераторы входных сигналов могут включать до 1024 тактов, минимальная длительность такта равна 1 нс.

Описание моделируемого цифрового устройства осуществляется с помощью интерактивной машинной графики с рисованием схемы устройства на экране монитора. Система вложенных меню позволяет легко выбирать текущие элементы, редактировать схему устройства, выполнять операции с файлами, изменять представление результатов моделирования и выполнять другие операции. Для обеспечения разработчика информацией о параметрах цифровых устройств в пакет включен банк данных, содержащий информацию о сериях ТТЛ и КМОП микросхем, наиболее широко используемых в практике, стандартные генераторы входных сигналов и тактовые генераторы.

Банк может расширяться пользователем. Вывод информации о результатах моделирования осуществляется на экран монитора, печать либо графопостроитель и включает схему цифрового устройства и временные диаграммы сигналов на выбранных пользователем узлах.

Пакеты программ конструкторского проектирования радиоэлектронных средств и устройств

В большинстве из рассмотренных выше пакетов схемотехнического проектирования РЭУ предусмотрены операции конструкторского проектирования. Однако существуют чисто конструкторские пакеты, обеспечивающие более полное решение различных задач конструкторского проектирования РЭУ. Пакет программ P-CAD фирмы Personal CAD Systems Inc. – это полное комплексное программное решение для проектирования электронных устройств, в частности для ввода схемы и проектирования схемной печатной платы.

Комплексное решение предполагает, что логика, описанная в схеме, воплощается в топологию печатной платы, а программы осуществляют функции логического моделирования, проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений для моделирования, автоматически размещают компоненты и трассируют печатную плату, создают документы для автоматизированных производственных систем.

Пакет содержит взаимодействующие средства проектирования, удобную

для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную библиотеку, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа.

Пакет имеет открытую архитектуру, обеспечивает выдачу готовых документов для технологии монтажа и другой проектной документации. Вывод документации после контроля на дисплее может осуществляться на принтер, плоттер или фотоплоттер. Оболочка системы помогает пользователю двигаться сквозь процесс проектирования с помощью меню, подсказок и правок.

Система проектирования печатной платы обеспечивает средства для полной разработки топологии от диалогового редактора до автоматического размещения компонентов, автотрассировки, проверки соблюдения правил проектирования и сопряжения с производством. Библиотека пакета содержит обширную информацию о компонентах электронных схем от дискретных и электромеханических деталей до существующих и заказных микросборок интегральных схем.

Программные средства сопряжения превращают данные из списка соединения компонентов схемы в формат, необходимый для конкретной программы моделирования цифровой и аналоговой схемы (типа PSPICE и др.).

Пакет позволяет проектировать печатные платы, имеющие до 500 элементов и 2000 связей. Пакет программ OrCAD фирмы OrCAD Sistem Corp. является законченным и гибким программным блоком схемотехнического и конструкторского проектирования. Он обеспечивает ввод и вывод на печать принципиальных схем, трассировку печатной платы и другие операции.

Пакет управляется с помощью иерархической разветвленной системы меню, легок в обучении, обладает многими дополнительными возможностями ввода и вывода схем.

Библиотека пакета содержит 2700 изображений компонентов РЭУ и позволяет легко создавать собственные начертания элементов. Простым нажатием клавиши легко выполняются многие графические операции при вводе и выводе схем: увеличение и уменьшение масштаба, преобразование (вращение, перенос, отображение и пр.) элементов и любых заданных фрагментов схемы. В системе предусмотрено создание перечня элементов (спецификаций), возможность разводки проводников, шин, входов модулей.

Пакет OrCAD в настоящее время является самым удобным и богатым по своим возможностям для ввода и вывода графических изображений принципиальных схем РЭС. В его состав включен пакет схемотехнического проектирования DesignLab, имеющий удобный выход на подсистемы моделирования и анализа РЭУ, а также другие графические пакеты (PSPICE, P-CAD и др.).

Пакет универсального назначения AutoCAD фирмы «AutoDesk» разработан на самом современном уровне машинной графики и представляет разработчику исключительно широкие возможности проектирования разнообразных объектов, технических систем и устройств.

Пакет представляет собой систему автоматизированной разработки чертежей, причем чертежи, рисунки и схемы создаются в интерактивном режиме, управляемом системой иерархических меню. В любой чертеж может быть вставлен поясняющий текст.

В набор функций входит панорамирование, увеличение,

масштабирование, поворот, секционирование, штриховка и другие операции преобразования изображений. В системе предусмотрены подсказки в любом состоянии и для любой команды. В пакете разработан богатый выбор драйверов графических устройств – графических дисплеев, матричных принтеров, графических планшетов и плоттеров.

Одним из важнейших достоинств пакета является возможность работы с трехмерной графикой, позволяющей строить реальные объекты, которые можно наблюдать в различных ракурсах (при желании невидимые линии на изображении стираются). В этом пакете применен специальный метод полилиний для вывода сложных кривых контуров деталей. Система AutoCAD непрерывно совершенствуется.

Так, в последние версии системы включен интерпретатор языка AutoLisp – одной из версий языка LISP, широко применяемого в символьной обработке и в системах искусственного интеллекта. Использование этого языка позволяет пользователю, с одной стороны, определять собственные функции и команды в среде AutoCAD, с другой – обеспечивать связь AutoCAD с другими приложениями.

Сейчас начинают применяться еще более сложные системы, включающие не только язык программирования, но и экспертные системы (экспертные настройки) для принятия решений и подсказок конструктору в процессе разработки. В эти настройки включен набор правил и математических моделей, с помощью которых конструктор в процессе работы может получить по оптимальному выбору тех или иных параметров разрабатываемой системы.

Программные системы для электродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей

Для электродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей в настоящее время широко применяется программная система Microwave Office. Эта система включает два основных программных модуля: EMSight и Voltaire XL, которые позволяют решать широкий круг задач, возникающих при проектировании высокочастотных интегральных и монолитных СВЧ-микросхем, антенн, СВЧ-согласующих цепей и фильтров, усилителей, смесителей и автогенераторов.

В пакете EMSight для анализа полей используется метод моментов Галеркина, представляющий точный и устойчивый алгоритм электродинамического моделирования. Здесь также используется алгоритм быстрого частотного свипирования, позволяющий на порядок сократить время моделирования по сравнению с обычным поточечным методом частотного анализа.

Пакет EMSight позволяет анализировать поля в слоистых средах с проводниками произвольной формы, рассчитывать поля антенны в дальней зоне и т.п. Пакет имеет расширенные графические возможности, которые позволяют разработчикам наблюдать реалистичное анимационное изображение токов высокой частоты, показывающее как амплитуду тока, так и его направление в трехмерном пространстве.

Пакет также имеет обширные возможности для обработки и представления полученных при моделировании результатов. В пакете программ Voltaire XL используются самые последние разработки методов схемотехнического моделирования.

Модуль пакета, предназначенный для линейного моделирования в частотной области, содержит более 500 моделей сосредоточенных и распределенных элементов СВЧ-цепей, включая микрополосковые, копланарные и щелевые элементы, полые и диэлектрические волноводы. Для анализа нелинейных устройств используются одно- и многочастотные методы гармонического баланса, для анализа интермодуляционных искажений – ряды

Вольтера, конверсионно-матричный метод для анализа смесителей. В пакете используется высокоскоростной метод шумового анализа, а также интегрированная система описания схем со встроенной поддержкой для файлов систем Spice и MMICAD. Пакет позволяет выполнять нелинейный анализ усилителей, смесителей и автогенераторов, нелинейный шумовой анализ, включая анализ фазовых шумов, шумов смесителей, а также нелинейный анализ их устойчивости.

EMSign и Voltaire XL написаны на объектно-ориентированном языке C++, имеют общий дружественный пользователю интерфейс, могут интегрировать в себя новые методы моделирования по мере их появления. Microwave Office работает под управлением 32-разрядных операционных систем.

Фирмой EAGLEWARE создана универсальная программная система Genesys, предназначенная для проектирования LC-фильтров, усилителей, смесителей и автогенераторов, распределенных СВЧ-согласующих цепей и фильтров, активных фильтров, выравнителей группового времени задержки и других элементов РЭУ. Система Genesys включает множество программных модулей, основными из которых являются: SuperStar Pro, Schemax, Layout, Filter, Oscillator, Match, T/Line и др.

Пакет SuperStar Pro представляет собой высокоскоростную программу для моделирования радиочастотных цепей, содержащую множество моделей пассивных компонентов цепей как СВЧ, так и более низкочастотных диапазонов. Активные компоненты радиочастотных цепей моделируются с использованием S-параметров. При моделировании допускается произвольное число портов в цепи.

В процессе работы программы могут вычисляться различные импедансные и адмиттансные характеристики рассеяния, а также распределения полей по проводникам моделируемого устройства. Пакет Schemax позволяет на интуитивном уровне создавать графические образы моделируемых элементов РЭУ для передачи описания в SuperStar Pro.

Программа импортирует файлы описания цепей из систем DesignCenter, DesignLab и других стандартных форматов описания цепей СВЧ. Пакет Layout позволяет по описанию моделируемого устройства в SuperStar Pro и Schemax синтезировать его топологию и представить трехмерную анимационную картину распределения токов по проводникам.

Он обеспечивает возможность использования в устройстве до 128 слоев, включая металлизацию, диэлектрические подложки, монтажные слои и т. п. Программа содержит большую библиотеку геометрических образов пассивных и активных компонентов СВЧ-цепей.

Выходной файл программы Layout соответствует DXF-файлу системы AutoCAD. Различные модификации пакетов Filter и программы Oscillator позволяют синтезировать разнообразные типы СВЧ-, LC- и активных фильтров, автогенераторов и усилителей с выполнением анализа шумов.

Пакет Match предназначен для синтеза сосредоточенных и распределенных согласующих цепей, включенных между двумя произвольными комплексными нагрузками. Пакет позволяет решать задачи максимизации полосы пропускания при заданном уровне отражения сигнала либо минимизации отражения в заданной полосе частот. Пакет T/Line позволяет выполнять анализ и синтез одиночных и связанных передающих линий различной конфигурации по их геометрическим или электрическим характеристикам.

В системе Genesys используется совершенный графический интерфейс, поддерживается библиотека для нескольких тысяч выпускаемых промышленностью активных и пассивных компонентов. Система Genesys имеет пользовательский интерфейс, полностью совпадающий со стандартным интерфейсом программного обеспечения фирмы Microsoft, снабжена многочисленными файлами помощи, что делает ее удобной для использования и легкой для освоения.

Тема 4.

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Вопросы:

1. Виды анализа и расчета электронных схем.
2. Анализ схемы.
3. Входные сигналы для моделирования электронных схем.

Расчет статического режима схемы выполняется для построения карты режимов по постоянному току, определения различных статических параметров, например, выделяемой на элементах мощности.

Данный вид расчета используется для определения начальных условий для расчета переходных процессов и определения рабочей точки для расчета малосигнальных параметров.

Расчет малосигнальных параметров схемы и расчет переходных процессов служит основой для определения динамических параметров схемы. Позволяет сделать вывод о работоспособности схемы при различных входных воздействиях.

Расчет выходных параметров схемы производят после расчета статического режима и переходных процессов. Это позволяет получить данные о соответствии или несоответствии внешних параметров схемы параметрам, указанным в техническом задании.

Анализ схемы предполагает:

1. Анализ параметрической чувствительности, т.е. определение степени влияния изменения внутренних параметров схемы на выходные параметры.

2. Статистический анализ позволяет найти характеристики схемы при статистическом отклонении параметров элементов схем (внутренних параметров).

В результате могут быть построены гистограммы выходных параметров, по которым могут быть определены границы отбраковки годных изделий.

3. Анализ на наихудший случай – предполагает расчет выходных параметров схемы при наихудшем сочетании внутренних параметров схемы.

4. Анализ влияния внешней среды состоит в расчете влияния температуры, давления, влажности и т.п. на выходные параметры.

Фактически, анализ выполняется в два этапа:

- первый: выясняется зависимость параметров компонентов электронной схемы от изменения внешней среды

- второй: осуществляется расчет зависимости внешних параметров от внутренних.

5. Многовариантный анализ представляет собой расчет схемы при различных комбинациях параметров элементов, задаваемых проектировщиком, который проводится за один сеанс расчета.

В ряде случаев многовариантный анализ схемы позволяет обойтись без оптимизации параметров элементов схемы, поскольку разработчик получает результаты расчета совокупности схем и может выбрать наилучший вариант.

Входные сигналы для моделирования электронных схем

При проектировании и моделировании РЭУ в качестве входных величин используются различные виды **детерминированных и случайных** сигналов.

К детерминированным относятся следующие сигналы:

- немодулированные гармонические и модулированные по заданному закону колебания;

- ступенчатый (постоянный) сигнал;

- линейно возрастающий (убывающий) сигнал;

- дискретный импульсный сигнал;

- сигналы, задаваемые двузначными (двоичными) и многозначными алфавитами.

К случайным сигналам относятся гармонические сигналы с изменяющимися по случайному закону параметрами (амплитудой, фазой), сигналы в виде последовательностей случайных чисел, дискретные сигналы случайной амплитуды, сигналы в виде «белого шума» и др.

Основной принцип моделирования детерминированных (в первую очередь, колебательных) сигналов базируется на утверждении о том, что любую функцию времени можно рассматривать как решение некоторого дифференциального уравнения. Поэтому сущность моделирования любого сигнала, описываемого некоторой функцией времени, заключается в синтезе по этой функции дифференциального уравнения, решение которого на ЭВМ при заданных начальных условиях и дает искомый сигнал.

К настоящему времени накоплен большой опыт в создании типовых блоков и программ, выполняющих функции генераторов гармонических колебаний с постоянными и управляемыми параметрами, амплитудных фазовых и частотных модуляторов и демодуляторов, интеграторов, сумматоров, корреляторов, линий задержки, ограничителей амплитуды, генераторов колебаний специальной формы и др. Комбинации перечисленных блоков позволяют получать модели различных видов сигналов.

Случайные сигналы при анализе и синтезе РЭУ используются для формирования начальных условий, для воспроизведения значений случайных параметров, от которых зависит моделируемая функция, а также для формирования случайных функций времени. Во всех перечисленных случаях исходным является получаемый от специального шумового генератора стандартный случайный процесс с заданными статистическими

характеристиками. Обычно в качестве стандартного применяется генератор белого шума с равномерным или нормальным законом распределения с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Случайные сигналы с другими распределениями и требуемыми статистическими характеристиками формируются на основе нелинейных безынерционных преобразований или линейной фильтрации исходного сигнала в виде белого шума. Приводятся модели случайных сигналов для их использования в инженерных и научных целях.

При проектировании РЭУ в области радиосвязи важное значение имеет исследование характеристик устройств в условиях воздействия преднамеренных помех, создаваемых средствами радиоэлектронной борьбы.

Применяемые при имитационном моделировании и статистической оптимизации РЭУ сигналы в виде последовательностей случайных чисел с любым заданным законом распределения моделируются с помощью программных генераторов (датчиков) случайных чисел.

В основе таких программных генераторов различных распределений случайных чисел лежит генератор равномерного распределения на интервале от нуля до единицы, входящий в состав стандартного программного обеспечения ЭВМ.

В современных системах автоматизированного проектирования РЭУ и системах автоматизации математических расчетов могут применяться аппаратные и программные блоки, формирующие модели детерминированных и случайных сигналов в виде:

- постоянной (скалярной, векторной или матричной) величины;
- непрерывного сигнала произвольной формы;
- единичного дискретного сигнала с заданными параметрами;
- линейно возрастающего (убывающего) сигнала;
- гармонического колебания постоянной частоты;
- гармонического колебания переменной частоты;
- дискретного импульсного сигнала;
- непрерывного временного сигнала;
- дискретного временного сигнала;
- дискретного сигнала случайной амплитуды, распределенной по нормальному закону;
- «белого шума» с ограниченной полосой пропускания и др.

Тема 5.

АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Алгоритмы анализа аналоговых устройств.
2. Моделирование статического режима.
3. Метод статистических эквивалентов.

Математическая модель любого аналогового радиоэлектронного устройства может быть представлена в виде двух систем уравнений.

Первая система является собственно математической моделью проектируемого объекта в виде линейных алгебраических, нелинейных, дифференциальных и других уравнений. Решение этой системы позволяет определить действующие в устройстве фазовые переменные. Вторая система

уравнений определяет зависимость выходных параметров радиотехнического устройства от фазовых переменных. Конкретный вид алгоритма формирования системы уравнений математической модели зависит от выбранного вектора фазовых переменных.

В зависимости от того, являются ли фазовые переменные функциями времени или комплексной частоты, различают математические модели радиоэлектронных устройств и систем во временной и частотной областях. В обоих случаях при формировании системы уравнений математической модели обычно используется операторная форма записи компонентных уравнений для базовых элементов электрических моделей.

Это объясняется удобством алгоритмического преобразования системы интегрально-дифференциальных уравнений, записанных в операторной форме, к виду, наиболее удобному для численного решения, а также удобством перехода от операторной формы записи к частотным моделям заменой оператора s на мнимую частоту и целесообразностью использования обратного преобразования Лапласа.

Модели во временной области наиболее удобны для анализа переходных процессов в радиоэлектронных устройствах, а также при исследовании статического режима и проектировании нелинейных устройств.

При проектировании радиоэлектронных устройств и электронных схем применяются следующие алгоритмы формирования системы уравнений их математических моделей во временной области:

- табличный метод;
- метод узловых потенциалов и контурных токов;
- метод переменных состояния;
- моделирование статического режима РЭУ;
- моделирование переходных процессов в РЭУ.

Табличный метод обеспечивает формирование системы уравнений математической модели на основе использования в качестве фазовых переменных токов ветвей, напряжений на них, а также узловых потенциалов, отсчитанных от заземленного узла электрической модели. Недостатком этого метода является большая размерность системы уравнений, что затрудняет его использование при автоматизированном проектировании РЭУ.

Метод узловых потенциалов предполагает преобразование всех источников напряжения электрической модели радиоэлектронного устройства в источники тока в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе. В результате электрическая модель будет содержать только, пассивные базовые элементы и источники тока. Это дает возможность выразить для всей совокупности пассивных базовых элементов связи между токами ветвей и напряжениями на них через проводимость в матричной операторной форме. В конечном итоге математическая модель РЭУ представляется в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений относительно узловых потенциалов, являющихся неизвестными фазовыми переменными. В читатель может найти достаточно полное описание данного метода.

При моделировании по методу контурных токов в качестве вектора фазовых переменных выбирается вектор токов в хордах графа электрической модели. При этом все зависимые и независимые источники тока в модели устройства должны быть преобразованы в эквивалентные источники

напряжения. В результате математическая модель устройства будет представлять собой удобную для реализации на ЭВМ систему уравнений относительно токов, протекающих через пассивные элементы и через источники напряжения.

Метод переменных состояния позволяет представить математическую модель устройства в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных, называемых переменными состояния, вектора входных воздействий и вектора выходных параметров. При этом численное решение системы уравнений относительно вектора фазовых переменных является самым простым в сравнении с другими методами моделирования.

Моделирование статического режима (режима работы по постоянному току) РЭУ предполагает построение модели устройства в виде системы нелинейных уравнений относительно выбранного вектора фазовых переменных (узловых потенциалов или переменных состояния).

Моделирование переходных процессов РЭУ производится на основе определения временной зависимости выходного параметра модели в виде формулы приближенного обратного преобразования Лапласа, используемой для описания переходных процессов в линейных электрических цепях.

При моделировании РЭУ в частотной области наиболее широко применяется метод комплексных амплитуд. При моделировании РЭУ методом комплексных амплитуд (спектрального анализа) в качестве фазовых переменных применяются напряжения и токи на отдельных элементах, входах четырехполюсников (многополюсников) и линейные комбинации напряжений и токов цепи. В качестве выходных параметров РЭУ используются входные и передаточные комплексные сопротивления, и проводимости, коэффициенты отражения и передачи по напряжению и току, коэффициенты усиления радиоэлектронных устройств и др.

Рассматриваемые методы делятся на две группы, в первой из которых используется связь между временными и частотными характеристиками цепей, а во второй – выполняется непосредственное моделирование выходных параметров РЭУ.

Методы первой группы обеспечивают определение частотного коэффициента передачи с помощью прямого преобразования Фурье, расчет спектров выходных сигналов по заданным входным сигналам и нахождение временных характеристик выходных сигналов с помощью обратного преобразования Фурье.

В методах второй группы для анализа РЭУ используется зависимость спектра выходного сигнала от произведения спектра входного сигнала и частотной передаточной функции. При этом частотные функции цепей моделируются по внутренним параметрам устройств. Методы второй группы позволяют для различных значений рабочих частот производить вычисления значений частотных характеристик устройств, то есть реализовывать так называемый численный спектральный подход. Поэтому они используются значительно чаще.

По сравнению с временными методы частотного анализа и моделирования РЭУ обладают высоким быстродействием и возможностью оценки устойчивости. Особенно проявляются их достоинства, если для моделирования

РЭУ, радиочастотных и излучающих устройств, радиоэлектронных систем применяются матрицы классической и волновой теории четырехполюсников.

При проектировании и моделировании радиоэлектронных устройств и радиоэлектронных систем воздействия на входах и выходах их функциональных элементов рассматриваются как фазовые переменные математической модели. Способ описания фазовых переменных, оказывающий существенное влияние на состав модели и макромодели функциональных блоков, определяет фактически метод перехода от математической модели к цифровой. Существует множество методов перехода от математической модели к цифровой, к наиболее распространенным среди которых в настоящее время относятся:

- **метод несущей**, когда используются мгновенные значения фазовых переменных, входных сигналов и их смеси с помехами;

- **метод комплексной огибающей**, когда фазовые переменные и входные сигналы описываются с точностью до их комплексных огибающих;

- **метод статистических эквивалентов**, когда реальные случайные процессы в радиоэлектронной системе представляются своими статистическими характеристиками, например, математическими ожиданиями и дисперсиями, либо, когда реальные процессы заменяются другими, но статистически адекватными им в рамках выбранного критерия, например, по совпадению определенного числа моментов;

- **метод информационного параметра**, когда вместо исследования прохождения реального сигнала в модели системы рассматривается прохождение через модель информационного параметра, для приема и обработки которого эта система предназначена;

- **комбинированные методы.**

Метод несущей используется для построения моделей высокочастотных и низкочастотных звеньев радиоэлектронных систем. Математические модели по методу несущей могут строиться на основе как принципиальных, так и структурных (функциональных) схем. При этом для описания преобразований сигналов и помех в элементах схемы могут использоваться спектральные или временные преобразования, а также дифференциальные уравнения. Наиболее широко (как указывалось ранее) используются при описании сигналов и помех дифференциальные уравнения. Этот метод позволяет с необходимой полнотой и заданной точностью реализовывать в цифровой модели операции, выполняемые каждым элементом.

Метод комплексной огибающей применяется тогда, когда информационный процесс $X \rightarrow X(0)$, характеризующий преобразование информации в системе, заключен в комплексной огибающей сигнала. При этом необходимость воспроизведения в модели несущей, не содержащей информации, отпадает. Формирование модели в этом случае состоит в отыскании алгоритмов, позволяющих получать комплексные огибающие различных сигналов и помех и вычислять мгновенные значения комплексной огибающей на выходе любого элемента системы по мгновенным значениям на входе. Для моделирования методом комплексной огибающей разработан ряд способов математического описания типовых элементов (звеньев), сигналов и помех на основе метода медленно меняющихся амплитуд Ван дер-Поля.

Сущность метода комплексной огибающей сводится к замене элемента (звена) радиоэлектронной системы с узкополосным входным воздействием

эквивалентным низкочастотным звеном с входным воздействием в виде комплексной огибающей узкополосного сигнала. При известных описаниях типовых элементов радиоэлектронных систем (генераторов, модуляторов, демодуляторов, усилителей, сумматоров, интеграторов и т. д.) моделирование методом комплексной огибающей сводится к комбинированию известных алгоритмов в соответствии с функциональной схемой моделирующей системы.

Метод статистических эквивалентов состоит в замене реального элемента (звена) радиоэлектронной системы математической моделью, являющейся эквивалентом этого звена. При этом статистический эквивалент элемента системы обеспечивает адекватность выходного сигнала лишь в статистическом смысле, с точностью до заданных статистических характеристик. Наиболее часто в качестве оцениваемых статистических характеристик используются первые два момента (выборочные средние и дисперсии).

Замена реальных элементов системы их статистическими эквивалентами может производиться на основе метода статистической линеаризации, формульного метода, метода гармонической статистической реализации и др. Так, например, метод статистической линеаризации применяется для моделирования низкочастотных нелинейных элементов путем замены их линейными статистическими эквивалентами. Он обеспечивает адекватность математического ожидания и флуктуации сигнала относительно математического ожидания. Этот метод является достаточно совершенным лишь при нормально распределенных случайных воздействиях.

Метод информационного параметра применяется для построения математических моделей таких радиоэлектронных систем и средств, в которых осуществляется преобразование информационного параметра. Он широко применяется при моделировании следующих типов радиоэлектронных систем и средств:

- измерителей параметров движения объектов (дальности, скорости, направления, местоположения и т.п.);
- РЛС-слежения за целью систем самонаведения;
- устройств автоматического слежения за фазой или частотой сигнала.

В качестве информационного параметра $X(\theta)$ может быть любой параметр, отслеживаемый системой: амплитуда, частота или фаза сигнала, угловое отклонение по азимуту и углу места, дальность цели и др. Сущность метода информационного параметра заключается в замене структурной схемы реальной системы с входным сигналом в виде смеси $X(Y, X)$ структурой эквивалентной системы автоматического регулирования с входным воздействием в виде информационного параметра. При этом главным вопросом является обеспечение статистической адекватности модели и реальной системы. Как правило, адекватность модели и системы обеспечивается идентичностью дифференциальных уравнений, позволяющих найти оценку информационного параметра $X(\theta)$, или величиной сигнала ошибки.

Метод информационного параметра является универсальным для радиоэлектронных систем следящего типа, так как он позволяет осуществить их моделирование с единых позиций.

Комбинированные методы применяются в тех случаях, когда целью моделирования является выявление влияния параметров отдельных элементов

радиоэлектронной системы на ее эффективность (показатели качества), например, при оптимизации систем.

При комбинированном методе разработки цифровой модели часть элементов радиоэлектронной системы (несущественно влияющая на ее эффективность) представляется функциональными моделями входящих в нее элементов, а другая часть воспроизводится в модели более точно, в виде дифференциальных уравнений, составленных, например, по принципиальной схеме. Комбинированные методы позволяют упростить модель радиоэлектронной системы в целом, существенно расширяя при этом возможности при исследовании наиболее важных с точки зрения вклада в эффективность системы характеристик.

Тема 6.

АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Алгоритмы анализа цифровых устройств.
2. Моделирование ЦУ.
3. Модели элементов и схем.
4. Классификация моделей.

В основе анализа цифровых устройств лежит использование их физических и логических моделей для получения картины логико-временного поведения устройства при различных входных воздействиях.

Модели цифровых устройств, используемые при проектировании РЭУ, можно разделить на две основные группы: физические и логические.

При физическом моделировании отдельные элементы, из которых состоит цифровое устройство (ЦУ), представляются их электрическими макромоделями, состоящими из базовых элементов теории цепей (пленочных резисторов и конденсаторов, диффузных резисторов и конденсаторов, биполярного или МДП-транзистора, полупроводникового диода). На основании системы этих макромоделей формируется полная электрическая модель ЦУ.

Физические модели ЦУ позволяют наиболее полно представить работу устройства во времени с учетом реальных задержек срабатывания элементов. Эти модели целесообразно использовать на заключительном этапе проектирования РЭУ из-за больших затрат времени на моделирование, когда необходимо иметь данные об устройстве, которые нельзя получить с помощью более простых моделей.

При логическом моделировании каждый элемент ЦУ представляется упрощенной формальной моделью в виде логического соотношения, описывающего логику его функционирования. При меньшей детализации работы в сравнении с физическими логические модели обладают во много раз большим быстродействием и позволяют решать ряд важных практических задач:

- проверять правильность логического функционирования ЦУ;
- сравнивать характеристики различных вариантов схемных решений;
- разрабатывать процедуры тестового контроля ЦУ и проверять их правильность и полноту;
- проверять работу цепей установки ЦУ в начальном состоянии.

В настоящее время разработано много алгоритмов, пакетов прикладных программ и даже специализированных языков для анализа и моделирования ЦУ на логическом уровне.

При моделировании на логическом уровне физическая природа сигналов (ток или напряжение) в ЦУ не конкретизируется. Сигналы задаются символами, совокупность которых описывает состояние и работу элементов, из которых состоит ЦУ. Совокупность используемых при этом символов называется алфавитом логического моделирования. При этом между реальными сигналами и символами устанавливается однозначное соответствие.

Простейшим является двоичный алфавит, включающий всего два символа 0 и 1. Он обеспечивает максимальную скорость моделирования, но не позволяет выявлять неоднозначность работы ЦУ и характер переходных процессов.

Моделирование ЦУ с помощью многозначных (троичных, пятизначных, девятизначных, бесконечных) алфавитов обеспечивает возможность получения большей информации о ЦУ. При этом отдельные элементы моделируются многозначными таблицами истинности, что приводит к увеличению требуемого времени моделирования. В качестве моделей элементов ЦУ используются формальные модели «черного ящика», в которых связь между входными и выходными сигналами элемента задается с помощью булевых уравнений либо таблиц истинности. Так, например, любое цифровое устройство может быть реализовано на основе комбинаций простейших базовых элементов цифровых схем И, ИЛИ, НЕ, операции сложения по модулю два и др.

При моделировании ЦУ на основе микросхем средней и большой степени интеграции более сложные элементы (триггеры, регистры, устройства памяти) могут представляться в одних случаях комбинациями простейших базовых элементов, а в других случаях описываться в терминах выполняемых ими операций (без разложения на составляющие их простейшие элементы).

Таким образом, математическая модель цифрового устройства представляет собой систему булевых уравнений, каждое из которых описывает один элемент ЦУ либо систему многомерных таблиц истинности. Такие математические модели могут быть реализованы на ЭВМ различными способами.

Алгоритмы анализа ЦУ в зависимости от учета или не учета задержек в их срабатывании делятся на синхронные и асинхронные, а по способу организации процесса решения системы уравнений – на сквозные и событийные.

Модели, реализующие синхронный алгоритм анализа, соответствуют работе синхронного автомата, в котором сигналы на входы ЦУ поступают только в моменты подачи синхросигналов. В остальное время входные сигналы не могут изменять состояние ЦУ. Переходные процессы в устройстве обязательно заканчиваются к моменту прихода следующего синхросигнала.

В моделях, реализующих асинхронный алгоритм анализа, модель каждого элемента представляется в виде каскадного соединения идеального безынерционного логического элемента и линии задержки на время (срабатывания элемента) т.е. независимой переменной при этом является время, продвигаемое с шагом, равным минимальной задержке срабатывания элемента в устройстве.

Алгоритмы сквозного моделирования реализуются в пакетах прикладных программ автоматизации проектирования РЭУ на основе метода простой

итерации, а также на основе методов итерации Зейделя с ранжированием и без ранжирования уравнений.

Модели элементов и схем

Анализ и расчет электронных схем осуществляется на основе моделирования реальных компонентов, т.е. замены их некоторыми моделями, которые с той или иной степенью точности описывают поведение элементов схемы в различных режимах, т.е. на основе создания математических моделей компонентов.

Математическую модель элемента можно рассматривать как некоторый оператор P , ставящий в соответствие системе внутренних параметров компонента или схемы $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ совокупность связанных с ними внешних параметров $Y = Y_1, Y_2, \dots, Y_n$. Содержание внутренних и внешних параметров, их физический смысл меняется в зависимости от назначения модели.

Для моделей компонентов внешними параметрами являются обычно токи и напряжения, если модель предназначена для расчета схем.

Для расчета самого компонента внешними параметрами выступают обычно плотности тока, распределение заряда и т.п. Внутренними параметрами в первом случае являются электрические параметры, а во втором случае - электрофизические и конструктивно-технологические. Связь между внешними и внутренними параметрами в первом случае (при расчете схем) осуществляется законами Ома, Кирхгофа, во втором случае (при расчете самого компонента) с использованием уравнений переноса, непрерывности, Пуассона.

Для моделей схем внутренними параметрами являются электрические параметры входящих в них компонентов, внешними параметрами – токи, напряжения, мощности, частотные и пр. характеристики. Связь между внешними и внутренними параметрами осуществляется с использованием законов Кирхгофа (для консервативных систем) и законов Максвелла, (для систем открытых, где возможны потери на излучение, не учитываемые законами Кирхгофа).

Классификация моделей

Математические модели технических устройств могут быть классифицированы по ряду признаков:

1. По **характеру отображаемых процессов** выделяют:

- статические;
- динамические модели.

2. По **способу представления модели** различают:

- аналитические;
- графические;
- табличные.

Аналитические модели определяют прибор или компоненту в виде уравнений, описывающих его ВАХ или в форме дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в моделируемой схеме и характеризующие инерционность элемента.

Графические модели позволяют представить компоненты в виде графиков ВАХ или в виде эквивалентных схем замещения.

Табличные модели позволяют представить схему или элемент в виде

цифровых таблиц, полученных в ходе экспериментального исследования объекта моделирования и соответствующих графикам экспериментальных ВАХ. Табличные модели используют обычно в том случае; если аналитическую модель построить трудно вследствие сложной зависимости. Иногда при сложных функциональных аналитических зависимостях для ВАХ их сознательно табулируют, если это позволяет объем памяти ЭВМ, и создают таким образом, возможно менее точную, но более удобную модель.

Перечисленные выше модели могут быть выполнены в виде подпрограмм, при таком представлении они превращаются в цифровую модель.

Аналитические и графические модели могут быть также заданы в виде алгоритма вычисления внешних параметров модели, при этом модель носит название алгоритмической модели. После оформления подпрограммы в соответствии с приведенным алгоритмом модель становится цифровой.

Цифровые модели могут быть достаточно точными, т.к. степень их сложности в основном определяется сложностью программы и допустимыми для расчета затратами машинного времени. В настоящее время цифровые модели используются все более широко в связи с развитием САПР РЭА.

3. По характеру зависимостей модели делятся на:

- линейные;
- нелинейные.

Имеется особый класс кусочно-линейных моделей, нелинейность которых проявляется в ограниченном количестве точек стыка линейных участков.

Нелинейные модели, естественно, оказываются более точными, но и более сложными.

4. По диапазону рабочих сигналов модели классифицируются на:

- модели большого сигнала;
- малосигнальные.

Малосигнальные модели, как правило, представляют собой линейные модели; модели для большого сигнала, учитывают нелинейность характеристик активных и пассивных элементов схемы (биполярных и полевых усилительных приборов).

5. По диапазону рабочих частот выделяют:

- низкочастотные;
- высокочастотные;
- сверхвысокочастотные.

Низкочастотные модели не учитывают инерционность компонентов модели и, поэтому низкочастотные модели используют для расчета схем по постоянному току (в статическом режиме).

Высокочастотные модели – модели более высокого уровня, они учитывают помимо особенностей статического режима инерционность компонентов. Поэтому такие модели дополняют системой дифференциальных уравнений, учитывающей инерционность компонентов, или эквивалентными схемами реальных приборов на высоких частотах – индуктивностями и емкостями выводов, инерционностями, определяющими физические процессы в компонентах (например, накопление заряда), емкостями областей структур и т.п.

Особенность низкочастотных и высокочастотных моделей состоит в том, что они выполняются на сосредоточенных элементах и поэтому для этих моделей справедливы законы Кирхгофа.

СВЧ модели отличаются от высокочастотных моделей учетом пространственных и временных координат, поэтому для анализа и расчета СВЧ-схем необходимо использовать уравнения Максвелла. Применение законов Кирхгофа оправдано лишь в диапазоне частот до **10 ГГц**, где размеры компонентов (особенно компонентов ИС) остаются меньше длины волны **$\lambda = 3$ см**.

На каждом уровне моделирования различают математические модели проектируемого радиотехнического объекта и компонентов, из которых состоит объект

Математические модели компонентов представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения называют компонентными, а соответствующую модель – компонентной.

Математическую модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных, например, законов Кирхгофа.

Тема 7.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Параметры моделей радиоэлектронных устройств.
2. Базовый набор элементов моделей.
3. Алгоритмы анализа аналоговых устройств.

В общей теории математического моделирования математическая модель любого объекта характеризуется внутренними, внешними, выходными параметрами и фазовыми переменными.

Внутренние параметры модели определяются характеристиками компонентов, входящих в проектируемый объект, например, номиналами элементов принципиальной схемы. Если проектируемый объект содержит **n** элементарных компонентов, то и его математическая модель будет определяться параметрами, которые образуют вектор внутренних параметров **$\mathbf{W} = (w_1 \dots w_n)^T$** .

Каждый из параметров в свою очередь, может быть функцией, вектором или еще более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования.

Выходные параметры модели – это показатели, характеризующие функциональные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса и габариты проектируемого объекта, надежность, стоимость и т. п.

Понятия **внутренних и выходных** параметров инвариантны, так как при моделировании на более высоком уровне выходные параметры могут стать внутренними и наоборот. Например, сопротивление резистора является внутренним параметром при моделировании усилительного устройства,

компонентом которого он является. Но это же сопротивление будет являться выходным параметром при моделировании самого резистора при пленочном его исполнении. Вектор выходных параметров модели принято обозначать

$$\mathbf{F} = (f_1 \dots f_2)^T.$$

Внешние параметры модели – это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия. Вектор внешних параметров в общем случае содержит множество самых различных составляющих. К его составляющим с полным правом можно отнести все, что говорилось ранее о составляющих вектора внутренних параметров.

Вектор внешних параметров модели принято обозначать $\mathbf{Q} = (q_1 \dots q_2)^T$.

Уравнения математической модели могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются выходными или внутренними параметрами модели (например, токи и напряжения в радиоэлектронных устройствах, внутренними параметрами которых являются номиналы элементов электрических схем, а выходными параметрами – выходная мощность, коэффициент передачи и т. п.).

Такие характеристики называют **фазовыми переменными**. Минимальный по размерности вектор фазовых переменных полностью характеризующий работу объекта проектирования, называется **базисным вектором**.

Например, при составлении уравнений математической модели радиоэлектронных устройств в качестве базисного вектора \mathbf{V} можно использовать переменные их состояния в виде вектора узловых потенциалов или вектора напряжений на конденсаторах и токов в индуктивностях. Использование вектора фазовых переменных позволяет упростить программирование уравнений математической модели устройства.

В общем случае **выходные параметры** \mathbf{F} представляются операторами от векторов \mathbf{V} , \mathbf{W} , \mathbf{Q} и могут быть определены из решения системы уравнений математической модели устройства. С учетом вышесказанного математическая модель любого радиотехнического объекта может быть представлена в виде следующих систем уравнений:

$$\Psi(\mathbf{V}, \mathbf{W}, \mathbf{Q}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \varphi(\mathbf{V}) \quad (2)$$

где Ψ и φ – операторы, определяющие вид систем уравнений модели.

Система уравнений (1) может представлять собой систему линейных алгебраических уравнений, нелинейных уравнений различного вида, дифференциальных уравнений в полных или частных производных и является собственно математической моделью проектируемого объекта. В результате решения системы (1) определяются действующие в устройстве фазовые переменные.

Система уравнений (2) определяет зависимость выходных параметров объекта от фазовых переменных \mathbf{V} .

В частных случаях составляющие вектора \mathbf{V} могут являться внутренними или выходными параметрами объекта, и тогда системы уравнений (1), (2) упрощаются.

Часто **моделированием** называют лишь составление системы (1). Решение уравнений (1) и отыскание вектора \mathbf{F} с помощью уравнения (2) называют анализом математической модели.

Базовый набор элементов моделей

Существует ряд моделей, на основе которых может быть построена любая электрическая модель прибора. Эти модели получили название базового набора элементов моделей.

Идеальные активные элементы – идеальные источники напряжения или тока – вводятся для характеристики реальных источников электрической энергии, в которых неэлектрические виды энергии (химическая, механическая) преобразуются в электрическую.

Математические модели компонентов представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения называют компонентными, а соответствующую модель – компонентной.

Математическую модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных, например, законов Кирхгофа. Уравнения, описывающие эти законы, называют топологическими, так как они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность компонентных и топологических уравнений для проектируемого объекта и образует его математическую модель в виде системы.

Исходя из задач конкретного этапа проектирования, математическая модель проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям:

- отражать с требуемой точностью зависимость выходных параметров объекта от его внутренних и внешних параметров в широком диапазоне их изменения; иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте;
- включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать ее программно на ЭВМ с различными возможностями;
- иметь большую универсальность, то есть быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств; быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т. п.

Эти требования в своем большинстве являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далеким от оптимальности в других.

По этой причине для одного и того же компонента или устройства часто приходится иметь не одну, а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей радиоэлектронных устройств должна выполняться по множеству признаков, чтобы охватить все возможные случаи.

По уровню сложности различают полные модели и макромоделли.

Полные модели объекта проектирования получают путем непосредственного объединения компонентных моделей в общую систему

уравнений. Макромодели представляют собой упрощенные математические модели, аппроксимирующие полные.

В свою очередь, макромодели делят на две группы: факторные и фазовые. Факторные модели предназначены для использования на последующих этапах проектирования в качестве компонентных моделей. Их выходными параметрами являются фазовые переменные полных математических моделей для следующего этапа проектирования.

Фазовые макромодели используются на том же этапе проектирования, на котором их получают, и предназначены для сокращения размерности решаемой задачи.

По способу получения математические модели радиотехнических объектов делятся на физические и формальные.

Физические модели получают на основе изучения физических закономерностей функционирования проектируемого объекта, так что структура уравнений и параметры модели имеют ясное физическое толкование.

Формальные модели получают на основе измерения и установления связи между основными параметрами объекта в тех случаях, когда физика работы его известна недостаточно полно. Как правило, формальные модели требуют большого числа измерений и по своей природе являются локальными, справедливыми вблизи тех режимов, в которых производились измерения. Такие модели иногда называют моделями.

В современных системах автоматизированного проектирования формирование системы уравнений математической модели проектируемого объекта выполняется автоматически с помощью ЭВМ.

В зависимости от того, что положено в основу алгоритма формирования системы уравнений, модели радиотехнических объектов можно разделить на три группы: **электрические, физико-топологические и технологические.**

Понятие электрической модели включает либо систему уравнений, связывающих напряжения и токи в электрической схеме, являющейся моделью объекта, либо саму электрическую схему, составленную из базовых элементов (резисторов, конденсаторов и т. п.).

На основе электрической модели можно в ЭВМ получить систему уравнений, связывающих напряжения и токи в модели объекта.

В физико-топологических моделях исходными параметрами являются геометрические размеры определяющих областей проектируемого объекта и электрофизические характеристики материала, из которых они состоят.

В результате решения системы уравнений этой модели определяются потенциалы внутри и на внешних выводах устройства. Такие модели применяются при разработке полупроводниковых приборов, СВЧ-устройств и в ряде других случаев.

Технологические модели основываются на параметрах технологических процессов изготовления проектируемого объекта (температуре и времени диффузии, концентрации диффузанта и т.п.).

Выходными параметрами такой модели является совокупность физико-топологических либо технологических параметров. По способу задания внутренних и внешних параметров математические модели делятся на две группы: дискретные и непрерывные.

Различают модели статические и динамические в зависимости от того, учитывают ли уравнения модели инерционность процессов в проектируемом объекте или нет. Статические модели отражают состояние объекта проектирования при неизменных внешних параметрах и не учитывают его переходные характеристики. Динамические модели дополнительно отражают переходные процессы в объекте, происходящие при изменении во времени внешних параметров.

Существуют и другие варианты классификации математических моделей элементов и узлов радиоустройств. При проектировании радиотехнических объектов наиболее широкое распространение получили электрические модели.

Программа моделирования радиотехнических и других объектов должна автоматически формировать систему уравнений математической модели из базового набора элементарных схемных элементов, компонентные уравнения для которых хранятся в библиотеке программы.

В зависимости от вида ВАХ и возможности управления выходными параметрами различают зависимые и независимые источники напряжения и тока.

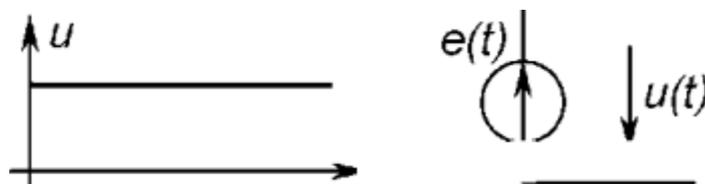


Рисунок 2 – Выходная характеристика источника $U(i)$, его эквивалентная схема замещения

Независимый идеальный источник напряжения представляет собой двухполюсный элемент, напряжение на котором, возможно, изменяется во времени по некоторому закону $e(t)$, не зависящему от величины тока, проходящего через источник. Выходная характеристика источника $U(i)$, его эквивалентная схема замещения.

В режиме короткого замыкания величина тока источника стремится к бесконечности, источник отдает бесконечно большую мощность в нагрузку.

Независимый идеальный источник тока представляет собой двухполюсный элемент, выходной ток которого изменяется, возможно, по некоторому закону во времени независимо от напряжения на элементе.

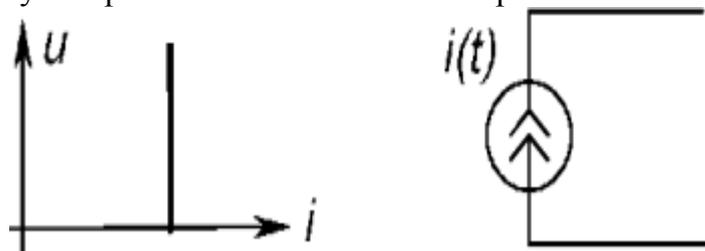


Рисунок 3 – Эквивалентная схема и ВАХ источника

Источник отдает в нагрузку бесконечно большую мощность при холостом ходе. Эквивалентная схема и ВАХ источника изображены на Рисунке 3. Зависимые идеальные источники напряжения или тока представляют собой трехполюсные или четырехполюсные элементы (необратимые), которые ставят в зависимость от входного сигнала (напряжения или тока) выходной ток или напряжение.

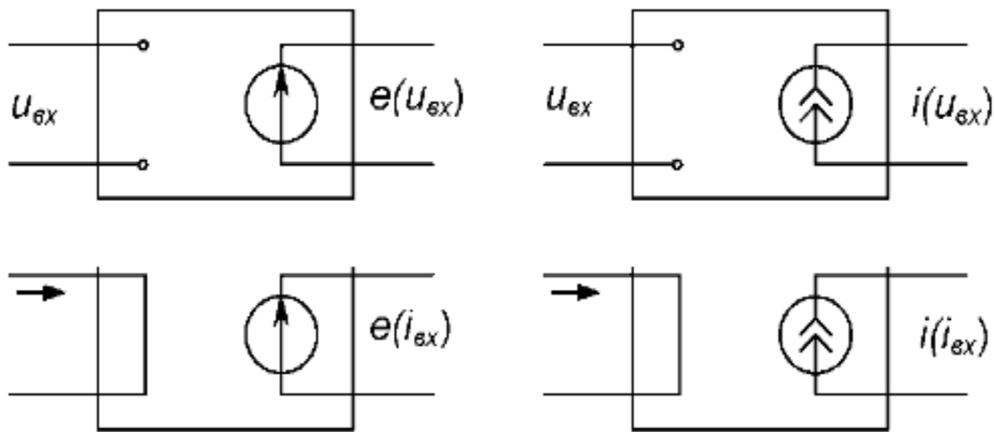


Рисунок 4 – Зависимые источники напряжения или тока

Если управление зависимыми источниками осуществляется током, то его вход представляет собой короткое замыкание, если напряжением — холостой ход. Изображение зависимых источников напряжения или тока приведено на рисунке 4.

Для синтеза адекватных реальному объекту моделей большинства радиотехнических устройств базовый набор должен содержать, по крайней мере, пять типов сосредоточенных схемных элементов, перечисленных в таблице 1. В таблице приведены и компонентные уравнения для каждого из элементов базового набора.

Таблица 1 - Схемные элементы радиотехнических устройств и их компонентные уравнения

Базовые элементы	Компонентные уравнения		
	в операторной форме	во временной форме	в частотной форме
1. Резистор:			
линейный	$u = R i(s)$	$u(t) = R i(t)$	$u(\omega) = R i(\omega)$
управляемый током	$u = r(i) i(s)$	$u(t) = R[i(t)] \cdot i(t)$	$u(\omega) = R[i(\omega)] i(\omega)$
управляемый напряжением	$i = G(u) u(s)$	$i(t) = G[u(t)] u(t)$	$i(\omega) = G[u(\omega)] u(\omega)$
2. Конденсатор:			
линейный	$i = Csu(s)$	$i(t) = cd u/dt$	$i(\omega) = j\omega C u(\omega)$
управляемый током	$u = \frac{i(s)}{sC(i)}$	$u(t) = \int \frac{i(t)}{C(i)} dt$	$u(\omega) = \frac{i(\omega)}{j\omega C(i)}$
управляемый напряжением	$i = sC(u)u(s)$	$i(t) = \frac{d[C(u)u(t)]}{dt}$	$i(\omega) = j\omega C(u) u(\omega)$

3. Индуктивность:			
линейная	$u = Ls i(s)$	$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$u(\omega) = j\omega L \cdot i(\omega)$
управляемая током	$u = sL(i) i(s)$	$u(t) = \frac{d[L(i) i(t)]}{dt}$	$u(\omega) = j\omega L(i) i(\omega)$
управляемая напряжением	$u = s\Phi(s)$	$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$	$u(\omega) = j\omega \Phi(\omega)$
4. Источник напряжения:			
независимый	$u = E(s)$	$U = E(t)$	$u(\omega) = E(\omega)$
управляемый током i_{ab}	$u = E[i_{ab}(s)]$	$u(t) = E[i_{ab}(t)]$	$u(\omega) = E[i_{ab}(\omega)]$
управляемый напряжением u_{ab}	$u = E[u_{ab}(s)]$	$u(t) = E[u_{ab}(t)]$	$u(\omega) = E[u_{ab}(\omega)]$
5. Источник тока:			
независимый	$i = I(s)$	$i = I(t)$	$i(\omega) = I(\omega)$
управляемый током i_{ab}	$i = I[i_{ab}(s)]$	$i(t) = I[i_{ab}(t)]$	$i(\omega) = I[i_{ab}(\omega)]$
управляемый напряжением u_{ab}	$i = I[u_{ab}(s)]$	$i(t) = I[u_{ab}(t)]$	$i(\omega) = I[u_{ab}(\omega)]$

Компонентные уравнения могут связывать мгновенные значения напряжений и токов, действующих на базовом элементе, либо их комплексные амплитуды. В первом случае говорят о моделировании во временной области, во втором – в частотной. Чем больший набор базовых компонентов позволяет использовать система автоматизированного проектирования, тем более многофункциональной она является.

При проектировании и моделировании РЭУ в качестве входных величин используются различные виды детерминированных и случайных сигналов.

К детерминированным относятся следующие сигналы:

- немодулированные гармонические модулированные по заданному закону колебания;
- ступенчатый (постоянный) сигнал;

- линейно возрастающий (убывающий) сигнал;
- дискретный импульсный сигнал;
- сигналы, задаваемые двузначными (двоичными) и многозначными алфавитами.

К случайным сигналам относятся гармонические сигналы с изменяющимися по случайному закону параметрами (амплитудой, фазой), сигналы в виде последовательностей случайных чисел, дискретные сигналы случайной амплитуды, сигналы в виде.

Основной принцип моделирования детерминированных (в первую очередь, колебательных) сигналов базируется на утверждении о том, что любую функцию времени можно рассматривать как решение некоторого дифференциального уравнения.

Поэтому сущность моделирования любого сигнала, описываемого некоторой функцией времени, заключается в синтезе по этой функции дифференциального уравнения, решение которого на ЭВМ при заданных начальных условиях и дает искомый сигнал.

К настоящему времени накоплен большой опыт в создании типовых блоков и программ, выполняющих функции генераторов гармонических колебаний с постоянными и управляемыми параметрами, амплитудных фазовых и частотных модуляторов и демодуляторов, интеграторов, сумматоров, корреляторов, линий задержки, ограничителей амплитуды, генераторов колебаний специальной формы и др.

Комбинации перечисленных блоков позволяют получать модели различных видов сигналов. Случайные сигналы при анализе и синтезе РЭУ используются для формирования начальных условий, для воспроизведения значений случайных параметров, от которых зависит моделируемая функция, а также для формирования случайных функций времени.

Во всех перечисленных случаях исходным является получаемый от специального шумового генератора стандартный случайный процесс с заданными статистическими характеристиками. Обычно в качестве стандартного применяется генератор белого шума с равномерным или нормальным законом распределения с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Случайные сигналы с другими распределениями и требуемыми статистическими характеристиками формируются на основе нелинейных безынерционных преобразований или линейной фильтрации исходного сигнала в виде белого шума.

В схемах приводятся модели случайных сигналов для их использования в инженерных и научных целях. При проектировании РЭУ в области радиосвязи важное значение имеет исследование характеристик устройств в условиях воздействия преднамеренных помех, создаваемых средствами радиоэлектронной борьбы.

Применяемые при имитационном моделировании и статистической оптимизации РЭУ сигналы в виде последовательностей случайных чисел с любым заданным законом распределения моделируются с помощью программных генераторов (датчиков) случайных чисел.

В основе таких программных генераторов различных распределений случайных чисел лежит генератор равномерного распределения на интервале от нуля до единицы, входящий в состав стандартного программного обеспечения

ЭВМ.

В современных системах автоматизированного проектирования РЭУ и системах автоматизации математических расчетов могут применяться аппаратные и программные блоки, формирующие модели детерминированных и случайных сигналов в виде:

- постоянной (скалярной, векторной или матричной) величины;
- непрерывного сигнала произвольной формы;
- единичного дискретного сигнала с заданными параметрами;
- линейно возрастающего (убывающего) сигнала;
- гармонического колебания постоянной частоты;
- гармонического колебания переменной частоты;
- дискретного импульсного сигнала;
- непрерывного временного сигнала;
- дискретного временного сигнала;
- дискретного сигнала случайной амплитуды, распределенной по нормальному закону;
- с ограниченной полосой пропускания.

Алгоритмы анализа аналоговых устройств

Математическая модель любого аналогового радиоэлектронного устройства может быть представлена в виде двух систем уравнений. Первая система является собственно математической моделью проектируемого объекта в виде линейных алгебраических, нелинейных, дифференциальных и других уравнений.

Решение этой системы позволяет определить действующие в устройстве фазовые переменные. Вторая система уравнений определяет зависимость выходных параметров радиотехнического устройства от фазовых переменных. Конкретный вид алгоритма формирования системы уравнений математической модели зависит от выбранного вектора фазовых переменных. В зависимости от того, являются ли фазовые переменные функциями времени или комплексной частоты, различают математические модели радиоэлектронных устройств и систем во временной и частотной областях.

В обоих случаях при формировании системы уравнений математической модели обычно используется операторная форма записи компонентных уравнений для базовых элементов электрических моделей.

Это объясняется удобством алгоритмического преобразования системы интегро-дифференциальных уравнений, записанных в операторной форме, к виду, наиболее удобному для численного решения, а также удобством перехода от операторной формы записи к частотным моделям заменой оператора s на мнимую частоту $j\omega$ и целесообразностью использования обратного преобразования Лапласа.

Модели во временной области наиболее удобны для анализа переходных процессов в радиоэлектронных устройствах, а также при исследовании статического режима и проектировании нелинейных устройств.

При проектировании радиоэлектронных устройств и электронных схем применяются следующие алгоритмы формирования системы уравнений их математических моделей во временной области:

- табличный метод;
- метод узловых потенциалов и контурных токов;

- метод переменных состояния;
- моделирование статического режима РЭУ;
- моделирование переходных процессов в РЭУ.

Табличный метод обеспечивает формирование системы уравнений математической модели на основе использования в качестве фазовых переменных токов ветвей, напряжений на них, а также узловых потенциалов, отсчитанных от заземленного узла электрической модели.

Недостатком этого метода является большая размерность системы уравнений, что затрудняет его использование при автоматизированном проектировании РЭУ.

Метод узловых потенциалов предполагает преобразование всех источников напряжения электрической модели радиоэлектронного устройства в источники тока в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе.

В результате электрическая модель будет содержать только пассивные базовые элементы и источники тока. Это дает возможность выразить для всей совокупности пассивных базовых элементов связи между токами ветвей и напряжениями на них через проводимость в матричной операторной форме. В конечном итоге математическая модель РЭУ представляется в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений относительно узловых потенциалов, являющихся неизвестными фазовыми переменными.

При моделировании по методу контурных токов в качестве вектора фазовых переменных выбирается вектор токов в хордах графа электрической модели. При этом все зависимые и независимые источники тока в модели устройства должны быть преобразованы в эквивалентные источники напряжения.

В результате математическая модель устройства будет представлять собой удобную для реализации на ЭВМ систему уравнений относительно токов, протекающих через пассивные элементы и через источники напряжения.

Метод переменных состояния позволяет представить математическую модель устройства в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных, называемых переменными состояния, вектора входных воздействий и вектора выходных параметров.

При этом численное решение системы уравнений относительно вектора фазовых переменных является самым простым в сравнении с другими методами моделирования.

Моделирование статического режима (режима работы по постоянному току) РЭУ предполагает построение модели устройства в виде системы нелинейных уравнений относительно выбранного вектора фазовых переменных (узловых потенциалов или переменных состояния).

Моделирование переходных процессов РЭУ производится на основе определения временной зависимости выходного параметра модели в виде формулы приближенного обратного преобразования Лапласа, используемой для описания переходных процессов в линейных электрических цепях. При моделировании РЭУ в частотной области наиболее широко применяется метод комплексных амплитуд.

При моделировании РЭУ методом комплексных амплитуд (спектрального анализа) в качестве фазовых переменных применяются напряжения и токи на отдельных элементах, входах четырехполюсников (многополюсников) и

линейные комбинации напряжений и токов цепи.

В качестве выходных параметров РЭУ используются входные и передаточные комплексные сопротивления, и проводимости, коэффициенты отражения и передачи по напряжению и току, коэффициенты усиления радиоэлектронных устройств и др.

Рассматриваемые методы делятся на две группы, в первой из которых используется связь между временными и частотными характеристиками цепей, а во второй – выполняется непосредственное моделирование выходных параметров РЭУ. Методы первой группы обеспечивают определение частотного коэффициента передачи с помощью прямого преобразования Фурье, расчет спектров выходных сигналов по заданным входным сигналам и нахождение временных характеристик выходных сигналов с помощью обратного преобразования Фурье.

В методах второй группы для анализа РЭУ используется зависимость спектра выходного сигнала от произведения спектра входного сигнала и частотной передаточной функции. При этом частотные функции цепей моделируются по внутренним параметрам устройств.

Методы второй группы позволяют для различных значений рабочих частот производить вычисления значений частотных характеристик устройств, то есть реализовывать так называемый численный спектральный подход. Поэтому они используются значительно чаще. По сравнению с временными методы частотного анализа и моделирования РЭУ обладают высоким быстродействием и возможностью оценки устойчивости. Особенно проявляются их достоинства, если для моделирования РЭУ, радиочастотных и излучающих устройств, радиоэлектронных систем применяются матрицы классической и волновой теории четырехполюсников.

При проектировании и моделировании радиоэлектронных устройств и радиоэлектронных систем воздействия на входах и выходах их функциональных элементов рассматриваются как фазовые переменные математической модели.

Способ описания фазовых переменных, оказывающий существенное влияние на состав модели и макромодели функциональных блоков, определяет фактически метод перехода от математической модели к цифровой.

Существует множество методов перехода от математической модели к цифровой, к наиболее распространенным среди которых в настоящее время относятся:

- метод несущей, когда используются мгновенные значения фазовых переменных, входных сигналов и их смеси с помехами;
- метод комплексной огибающей, когда фазовые переменные и входные сигналы описываются с точностью до их комплексных огибающих;
- метод статистических эквивалентов, когда реальные случайные процессы в радиоэлектронной системе представляются своими статистическими характеристиками, например математическими ожиданиями и дисперсиями, либо когда реальные процессы заменяются другими, но статистически адекватными им в рамках выбранного критерия, например, по совпадению определенного числа моментов; метод информационного параметра, когда вместо исследования прохождения реального сигнала в модели системы рассматривается прохождение через модель информационного параметра, для приема и обработки которого эта система предназначена; комбинированные

методы.

Метод несущей используется для построения моделей высокочастотных и низкочастотных звеньев радиоэлектронных систем.

Математические модели по методу несущей могут строиться на основе как принципиальных, так и структурных (функциональных) схем. При этом для описания преобразований сигналов и помех в элементах схемы могут использоваться спектральные или временные преобразования, а также дифференциальные уравнения.

Наиболее широко используются при описании сигналов и помех дифференциальные уравнения. Этот метод позволяет с необходимой полнотой и заданной точностью реализовывать в цифровой модели операции, выполняемые каждым элементом.

Метод комплексной огибающей применяется тогда, когда информационный процесс $\lambda = \lambda(t)$, характеризующий преобразование информации в системе, заключен в комплексной огибающей сигнала. При этом необходимость воспроизведения в модели несущей, не содержащей информации, отпадает.

Формирование модели в этом случае состоит в отыскании алгоритмов, позволяющих получать комплексные огибающие различных сигналов и помех и вычислять мгновенные значения комплексной огибающей на выходе любого элемента системы по мгновенным значениям на входе.

Для моделирования методом комплексной огибающей разработан ряд способов математического описания типовых элементов (звеньев), сигналов и помех на основе метода медленно меняющихся амплитуд Ван-дер-Поля.

Сущность метода комплексной огибающей сводится к замене элемента (звена) радиоэлектронной системы с узкополосным входным воздействием эквивалентным низкочастотным звеном с входным воздействием в виде комплексной огибающей узкополосного сигнала. При известных описаниях типовых элементов радиоэлектронных систем (генераторов, модуляторов, демодуляторов, усилителей, сумматоров, интеграторов и т.д.) моделирование методом комплексной огибающей сводится к комбинированию известных алгоритмов в соответствии с функциональной схемой моделирующей системы.

Метод статистических эквивалентов состоит в замене реального элемента (звена) радиоэлектронной системы математической моделью, являющейся эквивалентом этого звена. При этом статистический эквивалент элемента системы обеспечивает адекватность выходного сигнала лишь в статистическом смысле, с точностью до заданных статистических характеристик. Наиболее часто в качестве оцениваемых статистических характеристик используются первые два момента (выборочные средние и дисперсии).

Замена реальных элементов системы их статистическими эквивалентами может производиться на основе метода статистической линеаризации, формульного метода, метода гармонической статистической реализации и др.

Так, например, метод статистической линеаризации применяется для моделирования низкочастотных нелинейных элементов путем замены их линейными статистическими эквивалентами. Он обеспечивает адекватность математического ожидания и флуктуации сигнала относительно математического ожидания.

Этот метод является достаточно совершенным лишь при нормально

распределенных случайных воздействиях. Метод информационного параметра применяется для построения математических моделей таких радиоэлектронных систем и средств, в которых осуществляется преобразование информационного параметра.

Он широко применяется при моделировании следующих типов радиоэлектронных систем и средств:

- измерителей параметров движения объектов (дальности, скорости, направления, местоположения и т. п.);
- РЛС-слежения за целью систем самонаведения; устройств автоматического слежения за фазой или частотой сигнала.

В качестве информационного параметра $\lambda(t)$ может быть любой параметр, отслеживаемый системой:

- амплитуда, частота или фаза сигнала, угловое отклонение по азимуту и углу места, дальность цели и др.

Сущность метода информационного параметра заключается в замене структурной схемы реальной системы с входным сигналом в виде смеси $x(t, \lambda)$ структурой эквивалентной системы автоматического регулирования с входным воздействием в виде информационного параметра $\lambda(t)$.

При этом главным вопросом является обеспечение статистической адекватности модели и реальной системы. Как правило, адекватность модели и системы обеспечивается идентичностью дифференциальных уравнений, позволяющих найти оценку информационного параметра $\lambda(t)$, или величиной сигнала ошибки в виде $\varepsilon(t) = \lambda(t) - \hat{\lambda}(t)$.

Метод информационного параметра является универсальным для радиоэлектронных систем слеящего типа, так как он позволяет осуществить их моделирование с единых позиций. Комбинированные методы применяются в тех случаях, когда целью моделирования является выявление влияния параметров отдельных элементов радиоэлектронной системы на ее эффективность (показатели качества), например, при оптимизации систем.

При комбинированном методе разработки цифровой модели часть элементов радиоэлектронной системы (несущественно влияющая на ее эффективность) представляется функциональными моделями входящих в нее элементов, а другая часть воспроизводится в модели более точно, в виде дифференциальных уравнений, составленных, например, по принципиальной схеме.

Комбинированные методы позволяют упростить модель радиоэлектронной системы в целом, существенно расширяя при этом возможности при исследовании наиболее важных с точки зрения вклада в эффективность системы характеристик.

Тема 8. ПАРАМЕТРЫ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Алгоритмы анализа цифровых устройств.
2. Методы моделирования полей.
3. Электродинамические расчеты цифровых устройств.

В основе анализа цифровых устройств лежит использование их физических и логических моделей для получения картины логико-временного поведения устройства при различных входных воздействиях. Модели цифровых устройств, используемые при проектировании РЭУ, можно разделить на две основные группы: физические и логические.

При физическом моделировании отдельные элементы, из которых состоит цифровое устройство (ЦУ), представляются их электрическими макромоделями, состоящими из базовых элементов теории цепей (пленочных резисторов и конденсаторов, диффузных резисторов и конденсаторов, биполярного или МДП-транзистора, полупроводникового диода).

На основании системы этих макромоделей формируется полная электрическая модель ЦУ. Физические модели ЦУ позволяют наиболее полно представить работу устройства во времени с учетом реальных задержек срабатывания элементов. Эти модели целесообразно использовать на заключительном этапе проектирования РЭУ из-за больших затрат времени на моделирование, когда необходимо иметь данные об устройстве, которые нельзя получить с помощью более простых моделей.

При логическом моделировании каждый элемент ЦУ представляется упрощенной формальной моделью в виде логического соотношения, описывающего логику его функционирования. При меньшей детализации работы в сравнении с физическими логические модели обладают во много раз большим быстродействием и позволяют решать ряд важных практических задач:

- проверять правильность логического функционирования ЦУ;
- сравнивать характеристики различных вариантов схемных решений;
- разрабатывать процедуры тестового контроля ЦУ и проверять их правильность и полноту;
- проверять работу цепей установки ЦУ в начальном состоянии.

В настоящее время разработано много алгоритмов, пакетов прикладных программ и даже специализированных языков для анализа и моделирования ЦУ на логическом уровне.

При моделировании на логическом уровне физическая природа сигналов (ток или напряжение) в ЦУ не конкретизируется. Сигналы задаются символами, совокупность которых описывает состояние и работу элементов, из которых состоит ЦУ.

Совокупность используемых при этом символов называется **алфавитом логического моделирования**. При этом между реальными сигналами и символами устанавливается однозначное соответствие. Простейшим является двоичный алфавит, включающий всего два символа: 0 и 1.

Он обеспечивает максимальную скорость моделирования, но не позволяет выявлять неоднозначность работы ЦУ и характер переходных процессов. Моделирование ЦУ с помощью многозначных (троичных, пятизначных,

девятизначных, бесконечных) алфавитов обеспечивает возможность получения большей информации о ЦУ.

При этом отдельные элементы моделируются многозначными таблицами истинности, что приводит к увеличению требуемого времени моделирования. В качестве моделей элементов ЦУ используются формальные модели.

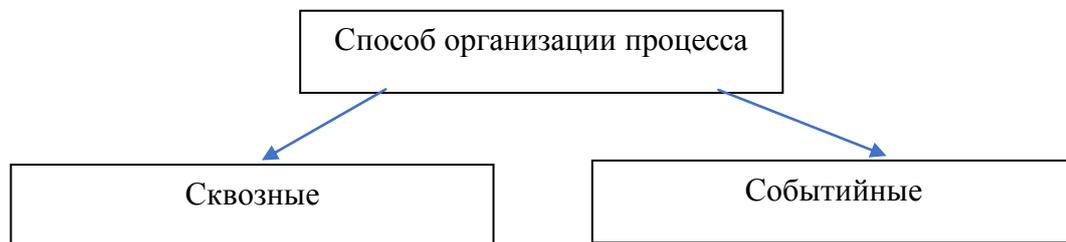
При моделировании ЦУ на основе микросхем средней и большой степени интеграции более сложные элементы (триггеры, регистры, устройства памяти) могут представляться в одних случаях комбинациями простейших базовых элементов, а в других случаях описываться в терминах выполняемых ими операций (без разложения на составляющие их простейшие элементы).

Таким образом, математическая модель цифрового устройства представляет собой систему булевых уравнений, каждое из которых описывает один элемент ЦУ либо систему многомерных таблиц истинности.

Такие математические модели могут быть реализованы на ЭВМ различными способами. Алгоритмы анализа ЦУ в зависимости от учета или не учёта задержек в их срабатывании делятся на синхронные и асинхронные.



По способу организации процесса решения системы уравнений – на сквозные и событийные.



Модели, реализующие синхронный алгоритм анализа, соответствуют работе синхронного автомата, в котором сигналы на входы ЦУ поступают только в моменты подачи синхросигналов. В остальное время входные сигналы не могут изменять состояние ЦУ.

Переходные процессы в устройстве обязательно заканчиваются к моменту прихода следующего синхросигнала. В моделях, реализующих асинхронный алгоритм анализа, модель каждого элемента представляется в виде каскадного соединения идеального безынерционного логического элемента и линии задержки на время (срабатывания элемента) t . Независимой переменной при этом является время t , продвигаемое с шагом, равным минимальной задержке срабатывания элемента в устройстве t .

Алгоритмы сквозного моделирования реализуются в пакетах прикладных программ автоматизации проектирования РЭУ на основе метода простой итерации, а также на основе методов итерации Зейделя с ранжированием и без ранжирования уравнений.

Алгоритмы событийного моделирования также реализуются методами простой итерации и итерации Зейделя. Они применяются в тех случаях, когда

выигрыш от уменьшения числа решаемых уравнений на всех итерациях превышает затраты на анализ элементов ЦУ.

Методы моделирования полей

При проектировании РЭУ может решаться задача моделирования полей, возникающих в радиоаппаратуре. При этом могут моделироваться как динамические (электромагнитные, тепловые), так и статические (электрические, магнитные, механические и др.) поля. Как и в любой физической системе, между полями существуют причинно-следственные связи. Поэтому здесь также можно говорить о внутренних параметрах модели (конфигурации элементов, создающих поля), внешних параметрах (воздействиях, возмущающих поля) и выходных параметрах – реакциях результирующего поля на возмущения. Законы сохранения энергии и непрерывности применимы к любому виду поля – электрическому, тепловому, акустическому и т. д.

Поэтому топологические уравнения для моделирования системы полей будут инвариантны относительно физической природы поля. Как правило, при моделировании электронных схем используются фазовые переменные только одного типа, и математическая модель получается в виде обыкновенных дифференциальных (либо алгебраических) уравнений.

Решение их сводится к разделению переменных и определению реакции на заданное воздействие. При моделировании полей используются фазовые переменные двух типов: скалярные и векторные, так как изменение фазовых переменных по пространству и времени имеет сравнимую величину. Обычно, если внешние воздействия заданы в виде переменных одного типа, фазовые переменные, определяющие реакцию системы, относятся к другому типу, и наоборот.

При моделировании электродинамических объектов (антенн, устройств СВЧ и др.) используется система уравнений Максвелла в дифференциальной форме и материальные уравнения, зависящие от свойств среды.

Решение всех этих уравнений с учетом граничных условий (краевая задача математической физики) возможно аналитически только для простейших объемов, когда поверхности раздела совпадают с координатными плоскостями. Реальные объекты электродинамики достаточно сложны, и усложнение их конфигурации ведет к быстрому росту трудоемких вычислительных процессов при решении единой краевой задачи.

Поэтому наиболее универсальным методом моделирования и анализа СВЧ-устройств является декомпозиционный подход – разбиение сложного устройства на ряд более простых устройств, допускающих независимый анализ и характеризующих теми или иными матрицами параметров.

Эти простые устройства называют базовыми элементами (блоками). Используется два способа анализа базовых элементов. По первому из них каждый базовый элемент заменяется некоторой схемой замещения, состоящей из сосредоточенных элементов L , C и R , а также регулярных отрезков линии передачи, четырехполосников и многополосников.

Электродинамические расчеты цифровых устройств

Электродинамические расчеты каждого из базовых элементов выполняются заблаговременно, а результаты представляются в виде приближенных формул и справочных таблиц, определяющих связь номиналов

элементов схемы замещения с геометрическими размерами базового элемента, частотой, свойствами среды. По второму способу – СВЧ-устройство разбивается на автономные блоки в виде определенных геометрических конфигураций, допускающих аналитическое или численное решение краевой задачи и определение матриц параметров.

Далее, как и по первому способу, составляется модель всего устройства. К другим методам моделирования полей относятся: проекционные методы решения электродинамических задач для отдельных базовых блоков СВЧ-устройств; метод конечных разностей (численный метод решения электродинамических задач); метод конечных элементов (проеекционно-сеточный метод).

Тема 9.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Вопросы:

1. Пассивные элементы R, L, C.
2. Пассивные компоненты и их модели Резистор.
3. Расчет сопротивления по синусоидальному сигналу.

Пассивные элементы R, L, C

Идеальный линейный резистор характеризуется сопротивлением и проводимостью G . Размерности величин: $R[\text{Ом}]$, $G[\text{См}]$, $U=iR$. Нелинейное сопротивление характеризуется ВАХ.

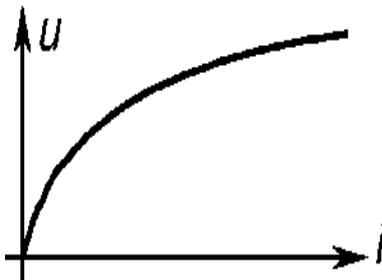


Рисунок 6 – ВАХ нелинейного резистора

Фазовые сдвиги в элементе отсутствуют. Идеальный индуктивный элемент характеризуется потокосцеплением, возникающим при протекании тока через некоторый контур, причем считается, что активное сопротивление контура равно 0. Отношение потокосцепления к току называется индуктивностью L:

Размерности величин: $[i]=\text{А}$, $[4]=\text{Вб}=\text{Вс}$, $[L]=\text{Вб}/\text{А}=(\text{Вс})/\text{А}=\text{Гн}$ Энергия, накопленная в поле:

$$e = d\Psi / dt$$

Закон электромагнитной индукции связывает скорость изменения магнитного потока и ЭДС, наводимую в контуре:

$$W_M = \Psi I / 2$$

Если $L=\text{const}$, то

$$e = L (di / dt)$$

Закон можно переписать в другом виде:

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t e(t) dt$$

Реактивное сопротивление контура переменному току зависит от частоты синусоидального сигнала: $|X_L| = \omega L$. Фазовый сдвиг между током и напряжением -90° .

Ток отстает от напряжения на указанный угол. Если на индуктивность подано напряжение: $u = U_m \cos \omega t$, при этом ток в цепи:

$$i = (U_m / \omega L) \sin \omega t$$

Мощность, циркулирующая в цепи:

$$P = u \cdot i = (U_m^2 / \omega L) \sin \omega t \cos \omega t = (U_m^2 / 2\omega L) \sin 2\omega t$$

Таким образом, мощность не потребляется нагрузкой, а осуществляется лишь периодический обмен энергией:

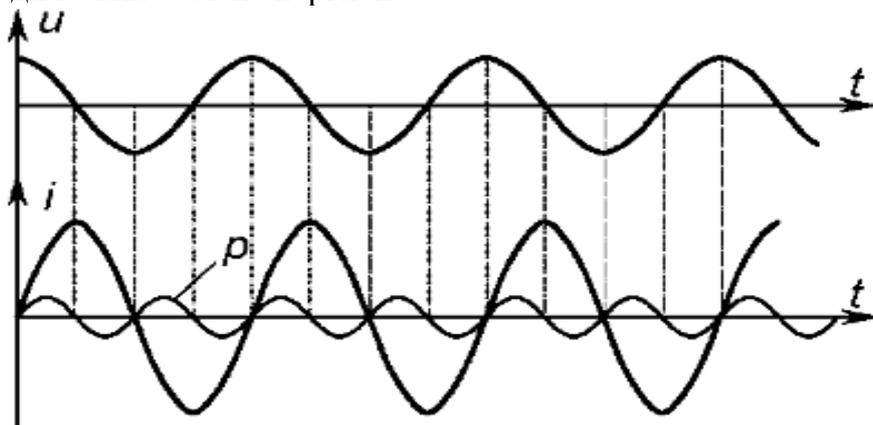


Рисунок 7 – Временные диаграммы гармонического сигнала на индуктивности

Идеальная емкость накапливает энергию электростатического поля. Заряд емкости:

$$Q = Q_0 + \int_0^t i(t) dt$$

$$i = dQ/dt$$

Если емкость линейна, то заряд $Q = CU$, где C - собственно емкость конденсатора. Размерность величин:

$$[Q] = Кл, [U] = В, [C] = Кл/В = Ф$$

Энергия, накопленная в емкости:

$$W_3 = QU / 2$$

Для линейной емкости можно также записать:

$$W_3 = CU^2 / 2;$$

$$i = C(dU/dt);$$

$$u = U_0 + (1/C) \int_0^t i dt$$

Сопротивление емкостной цепи переменному току:

$$|X_c| = 1 / \omega C$$

Напряжение на емкости отстает от тока на 90° . Если ток в цепи:

$$i = I_m \cos \omega t$$

То напряжение:

$$u_c = (I_m / \omega C) \sin \omega t$$

Мощность в цепи:

$$P = u_c \cdot i_c = (I_m^2 / 2\omega C) \sin \omega t$$

Т.е., как и в случае индуктивности, потребление мощности не происходит, осуществляется лишь обмен энергией между источником и нагрузкой.

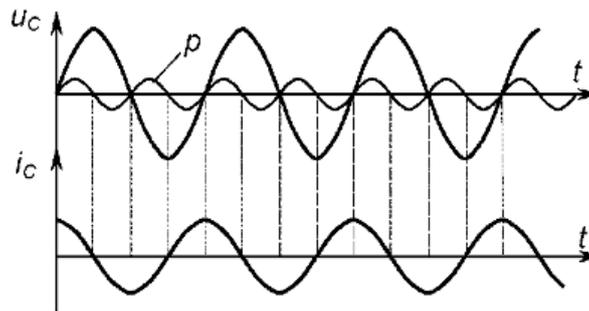


Рисунок 8 – Временные диаграммы гармонического сигнала на емкости

Модели любого компонента электрической цепи могут быть отображены комбинацией простейших элементов базового набора.

Пассивные компоненты и их модели Резистор

Вольтамперная характеристика реального резистора на постоянном токе не отличается от идеальной.

При создании высокочастотной модели необходимо учитывать особенности изготовления. За счет наличия индуктивности выводов и резистивного слоя сопротивление резисторов на высокой частоте становится комплексным, приобретает индуктивный характер:

$$\mathbf{X}_R = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}$$

С повышением частоты проявляются также емкостные свойства резистора – в основном емкость между его выводами.

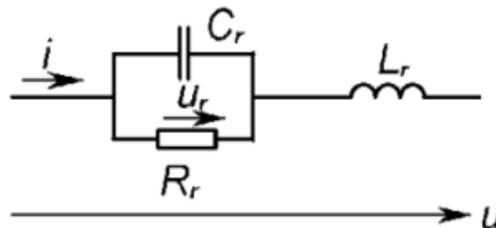


Рисунок 9 – Эквивалентная схема резистора R с сосредоточенными параметрами

В принципе, параметры резистора должны быть распределенными, однако их учет значительно усложняет анализ и применяется лишь при работе на СВЧ и при расчете элементов в гибридном исполнении.

Приведенную эквивалентную схему можно описать системой 2-х дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} u = u_r + L_r \frac{di}{dt} \\ i = \frac{u_r}{R_r} + C_r \frac{du_r}{dt} \end{cases}$$

Здесь C_r , L_r - величины паразитных параметров, U_r - напряжение на активной составляющей резистор.

В зависимости от соотношения параметров эквивалентная схема резистора может быть упрощена. Для высокоомных резисторов, у которых

$$R \gg \sqrt{\frac{L_r}{C_r}},$$

т.е. активное сопротивление значительно больше волнового, можно пренебречь его индуктивной составляющей. При этом модель принимает вид

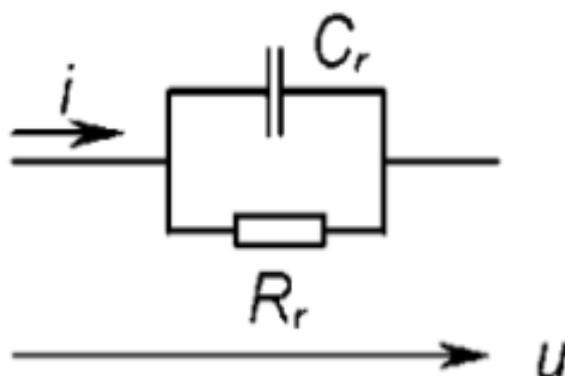


Рисунок 10 – Упрощенная эквивалентная схема резистора R с сосредоточенными параметрами без учета индуктивной составляющей

Расчет сопротивления по синусоидальному сигналу

Полное сопротивление синусоидальному сигналу можно найти из расчета:

$$Z_{\kappa} = \frac{R_r \cdot \frac{1}{j\omega C_r}}{R_r + \frac{1}{j\omega C_r}} = \frac{R_r}{1 + j\omega C_r R_r} = \frac{R_r}{1 + \omega^2 R_r^2 C_r^2} - j \cdot \frac{\omega C_r R_r^2}{1 + \omega^2 R_r^2 C_r^2}$$

Здесь первое слагаемое – активная составляющая полного сопротивления, второе реактивная составляющая. При $\omega \rightarrow 0$, $Z_r \rightarrow R_r$, при $\omega \rightarrow \infty$ $Z_r \rightarrow 1/j\omega C$,

$$R \ll \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

Для низкоомных резисторов, можно пренебречь емкостной составляющей комплексного сопротивления.

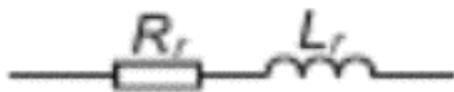


Рисунок 11 – Упрощенная эквивалентная схема резистора R с без учета емкостной составляющей комплексного сопротивления

Указанную особенность необходимо учитывать при проектировании схем, особенно в СВЧ диапазоне.

Тема 10.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ, ИНДУКТИВНОСТИ, ТРАНСФОРМАТОРОВ

Вопросы:

1. Моделирование электрических конденсаторов.
2. Моделирование реальной индуктивности.
3. Моделирование трансформатора.

В электронике конденсаторы выполняют в виде токопроводящих обкладок, разделенных диэлектриком. Величина емкости зависит от площади обкладок S и ϵ диэлектрика.

Различают конденсаторы с газообразным, жидким, твердым, оксидным диэлектриком. На высоких частотах необходимо учитывать потери в диэлектрике, токи утечки, индуктивное сопротивление обкладок и выводов.

Эквивалентная схема конденсатора на высоких частотах имеет вид:

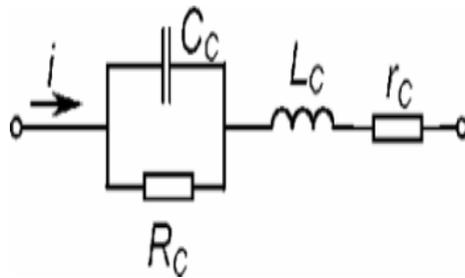


Рисунок 12 – Эквивалентная схема конденсатора на высоких частотах

Полное сопротивление конденсатора Z_c зависит от частоты и определяется по формуле:

$$|Z_c| = \sqrt{r_c^2 + \left(-\frac{1}{\omega C_c} + \omega L_c\right)^2}$$

Здесь сделано допущение о том, что $R_c \gg r_c$, что справедливо на высоких частотах практически всегда. Сопротивление утечки R_c учитывается, как правило, лишь в прецизионных схемах и при расчете медленных процессов.

Зависимость $Z_c(f)$ в соответствии с приведенным соотношением имеет вид

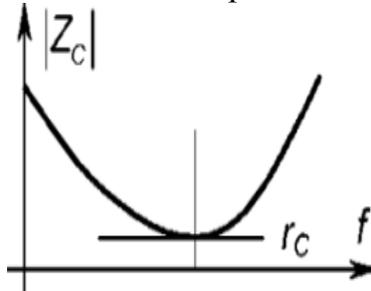


Рисунок 13 – Зависимость полного сопротивления R от частоты

Таким образом, после резонансной частоты $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}}$ сопротивление конденсатора приобретает индуктивный характер. Следует отметить, что для электролитических конденсаторов величина емкости не постоянна, а также зависит от частоты работы, что объясняется процессами поляризации диэлектрика. Можно предложить аппроксимацию зависимости $C_c(f)$ в виде:

$$C_c(f) = C_0/[1 + (f/f_0)^\alpha],$$

где C_0 – номинальная емкость конденсатора, f_0 – частота, на которой емкость падает вдвое, α – некоторый коэффициент, учитывающий скорость спада емкости.

Моделирование реальной индуктивности

Индуктивность представляет собой магнитопровод с выполненной на нем обмоткой. Эквивалентная схема индуктивности с учетом омического сопротивления обмотки имеет вид

$$|Z| = \sqrt{r_L^2 + (\omega L)^2}$$

Полное сопротивление реальной индуктивности Z переменному току частотой ω равно:

$$Z = r_L + j\omega L,$$

Индуктивность, выполненная на сердечнике из ферромагнитного материала, как правило, нелинейна при работе в сильных полях. Ее характеристика совпадает с магнитной характеристикой ферромагнетика и может быть изображена в виде графика



Рисунок 14 – Эквивалентная схема индуктивности L

Если на индуктивность подан постоянный подмагничивающий ток I_0 , то можно выделить дифференциальную индуктивность L_d и статическую индуктивность $L_{ст}$ определяемую выражениями:

$$L_{cm} = \frac{\psi}{I} \Big|_p = m_L \operatorname{tg} \alpha$$

$$L_\partial = \frac{d\psi}{di} \Big|_p = m_L \operatorname{tg} \beta$$

В обмотке за счет протекания тока создается напряженность магнитного поля H , определяемая по закону полного тока:

$$i \cdot w = H \cdot l_{cp} \Rightarrow H = i \cdot w / l_{cp}; [H] = A / \mu$$

Если магнитная проницаемость материала μ , то величина индукции в сердечнике $B = \mu \mu_0 H$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м).

Для тороидального сердечника в предположении равномерного распределения магнитного поля справедливо:

$$\psi = BS w; H = i \cdot w / l_{cp}; l_{cp} = \pi(d_1 + d_2)/2; L = \psi/i = \mu \mu_0 S w^2 / l_{cp}$$

Магнитную характеристику материала обычно аппроксимируют кусочно-линейной функцией при грубом расчете.

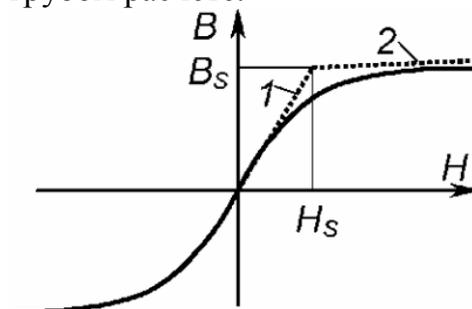


Рисунок 15 – Аппроксимация кусочно-линейной функцией магнитной характеристики материала при грубом расчете

При этом в диапазоне:

$$\begin{aligned} & - H_s \leq H \leq H_s, \\ & L = B_s / H_s, \text{ при} \\ & |H| > H_s, L = 0, \text{ т.е. } B = B_s \end{aligned}$$

Такая аппроксимация является весьма грубой, в частности, она не отражает реальных физических процессов во второй области.

Если предположить, что в области насыщения свойства ферромагнетика исчезают вовсе, то это означает, что μ ферромагнетика становится равной 1. Т.е. при $|H| > H_s$ магнитный поток необходимо считать по формуле:

$$B = \mu_0 H.$$

Это соответствует аппроксимации, линия 2.

В ряде случаев оказывается более удобной аппроксимации магнитной характеристики аналитическим выражением вида:

$$B = B_s \operatorname{th} \beta H,$$

где коэффициент β выражает «крутизну» и момент перегиба магнитной характеристики.

Переменная величина индуктивности может привести к различию переходных процессов в схемах, если сердечник работает с подмагничиванием или без него. Ряд магнитных материалов обладает гистерезисными свойствами, которые проявляются в том, что кривая намагничивания превращается в петлю, которая зависит от напряженности поля перемангничивания H , скорости и амплитуды B_s индукции в сердечнике. Существует ряд моделей, описывающих эту петлю.

Рассмотрим модель Джилса-Аттертона.

Основа модели – безгистерезисная кривая, которая представляет собой зависимость безгистерезисной намагниченности от H . Она получается в том случае, когда в дополнение к постоянной составляющей на магнитный материал воздействует сильное переменное поле с амплитудой, постепенно убывающей до нуля.

Связь между B , H и намагниченностью M :

$$B = \mu_0(M + H)$$

При помещении образца во внешнее магнитное поле магнитные моменты отдельных доменов начинают поворачиваться, ориентируясь вдоль силовых линий магнитного поля. При слабых полях этот поворот сопровождается упругим прогибом доменной стенки, при сильных полях – смещением границ доменов (эффект сухого трения). Прогиб стенки – обратимый процесс, т.е. при снятии внешнего магнитного поля домен возвращается в исходное состояние, не изменяя границ. При «сухом трении» после снятия поля внутренняя намагниченность остается. Она характеризуется намагниченностью M (размерность A/M). Величина индукции определяется формулой.

Модель Джилса-Аттертона предполагает, что безгистерезисная намагниченность зависит от величины H по следующей формуле:

$$M_{ат} = M_s (H/A) / |H/A| + 1$$

где M_s – намагниченность насыщения;
 A – коэффициент кривой (ее формы).

$$M_{an} = M_s \frac{H}{H + A}$$

где A определяется как величина напряженности, при которой $M_{an} = M/S^2$. Для введения гистерезисной зависимости в модель существует дифференциальное уравнение, учитывающее эффект сухого и вязкого трения. В больших полях (сухое трение) форма петли описывается уравнением:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{K} \delta,$$

где δ – учитывает коэффициент перемангничивания; K – величина коэрцитивной силы петли.

На петле есть 4 участка с различными состояниями сердечника, каждое из которых связано с M , M_{an} и H .

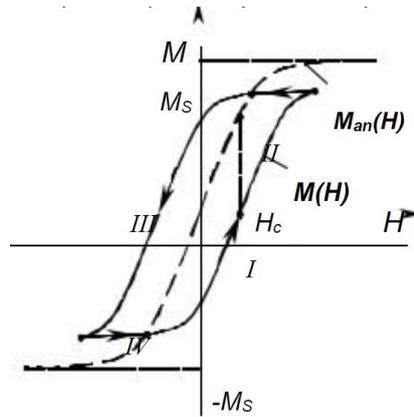


Рисунок 16 – Коэрцитивная сила петли

Коэрцитивная сила петли – напряженность магнитного поля, при которой индукция в образце (намагниченность) равна 0 (точка H_c). В зависимости от участка, по которому ползет рабочая точка, изменяется и коэффициент δ в дифференциальном уравнении.

$$\text{Участок I: } \frac{dM}{dH} > 0; M_{an} > M; \quad \delta > 0 \text{ (обычно)}$$

принимается $\delta=1$)

$$\text{Участок II: } \frac{dM}{dH} = 0; M = const; \quad \delta = 0$$

$$\text{Участок IV: } \frac{dM}{dH} = 0; M = const; \quad \delta = 0$$

$$\text{Участок III: } \frac{dM}{dH} > 0; M > M_{an}; \quad \delta < 0 \text{ } (\delta=-1)$$

Коэффициент δ берут соответствующим на любом шаге расчета петли. Рассмотрим поведение безгистерезисной кривой Man и петли перемагничивания вблизи H , равной H_c .

Пусть в петле: $\frac{dM_{an}}{dH} \Big|_{H \approx 0} = \frac{dM}{dH} \Big|_{H \approx H_c}$

т.е. характеристики M и Man имеют одинаковый наклон.

Рассмотрим треугольник с вершинами 0, H_c , $Man(H_c)$:

$$M_{an}(H_c) = \frac{dM}{dH} H_c$$

Уравнение Джилса-Аттертона описывает явление вязкого трения, соответствующее малым возмущениям внешнего поля. Это достигается введением добавки следующего вида:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_{an} - M}{K} \delta + \frac{C}{1+C} \frac{dM_{an}}{dH}$$

где C – коэффициент (отношение начальной и безгистерезисной магнитной проницаемости при

$$H=0); K=HC.$$

Т.к. при малых полях доменные стенки сначала прогибаются, намагниченность материала оказывается заметно меньше, чем если бы доменные структуры одновременно повернулись бы на определенный угол.

Введем понятие начальной магнитной проницаемости μ_i , которая всегда меньше чем μ_{an} . Этот эффект учитывается с помощью коэффициента C в уравнении:

Моделирование трансформатора

Трансформатор представляет собой магнитопровод, на котором выполнены две или более обмотки.

По магнитопроводу замыкается магнитный поток Φ_m , который обеспечивает магнитную связь между обмотками. Существуют потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, создаваемые токами i_1 , и i_2 , не замыкающиеся по магнитопроводу и не являющиеся общими для обмоток. Обмотки имеют омические сопротивления r_1 и r_2 , а также другие паразитные параметры, например, межвитковые и межобмоточные емкости.

Идеальный трансформатор представляется элементом, в котором отсутствуют потоки рассеяния, активные сопротивления обмоток, паразитные емкости. Индуктивность намагничивания равна бесконечности, т.е. ток намагничивания равен 0.

При этом обмотки пронизывают одинаковые потоки и по закону электромагнитной индукции для обеих обмоток можно записать, что:

$$u_1 = e_1 = d\Psi_M/dt = w_1 \cdot d\Psi_M/dt;$$

$$u_2 = e_2 = d\Psi_M/dt = w_2 \cdot d\Psi_M/dt;$$

$$e_2 = e_1 w_2/w_1 = e_1 n$$

Здесь $n=w_2/w_1$ – коэффициент трансформации трансформатора. Из закона сохранения энергии следует, что:

$$i_1 \cdot e_1 = i_2 \cdot e_2, \text{ т.е.}$$

$$i_2 = i_1/n$$

Это же вывод можно получить, используя закон полного тока с учетом того обстоятельства, что $i_{\mu}=0$:

$$\Sigma iw = 0;$$

$$i_1 \cdot w_1 = i_2 \cdot w_2$$

При указанных допущениях трансформатор можно представить эквивалентной схемой (См. Рис. 17).

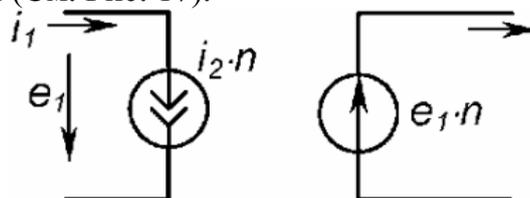


Рисунок 17 – Эквивалентная схема трансформатора

Модель крайне проста, однако применяется крайне редко, т.к. не позволяет учесть принципиально важных для трансформатора явлений – накопления энергии в магнитопроводe и необходимость восстановления магнитного состояния сердечника.

Для ее учета представляют трансформатор совершенным элементом, в котором отсутствуют потоки рассеяния, но имеется конечная величина индуктивности намагничивания L_μ . Последняя определяет ток намагничивания, протекающий по первичной обмотке, и приводит к эквивалентной схеме (См. Рис. 18).

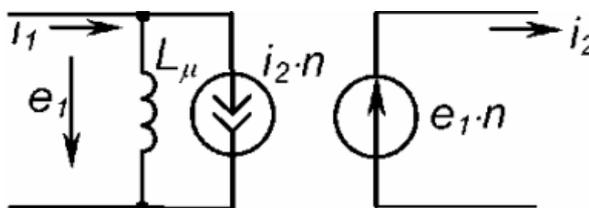


Рисунок 18 – Полная эквивалентная схема трансформатора

В ряде случаев, особенно при расчете достаточно простых цепей, представляется удобным «привести» трансформатор к одной из сторон: первичной или вторичной, представив процесс передачи энергии через магнитопровод непосредственным подключением нагрузки к цепи источника энергии.

Если, например, трансформатор нагружен на активное сопротивление R , то величина тока нагрузки в первичной цепи определится:

$$i_{12} = i_2 \cdot n = u_2 n / R_2$$

Тогда эквивалентное сопротивление нагрузки, подключенной к первичной цепи, равно:

$$R'_2 = u_1 / i_{12} = u_1 \cdot R_2 / u_2 \cdot n = R_2 / n^2$$

Несложно показать, что индуктивность, включенная в качестве нагрузки, приводится к первичной стороне в виде:

$$L_2 = L_2 / n^2$$

Емкость – в соответствии с соотношением:

$$C'_2 = C_2 \cdot n^2$$

Таким образом; эквивалентная схема «приведенного» к первичной обмотке трансформатора имеет вид (См. Рис. 19):

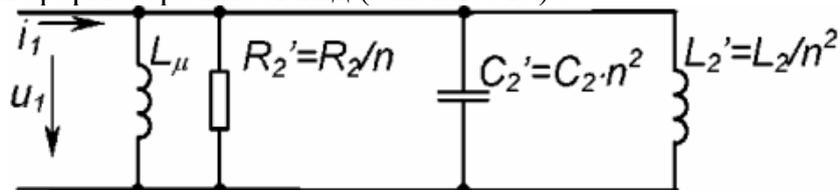


Рисунок 19 – Эквивалентная схема «приведенного» к первичной обмотке трансформатора

Выполнение трансформатора с сердечником из магнитопровода в виде ферромагнетика приводит к нелинейной зависимости $L(i)$.

Совершенная эквивалентная схема трансформатора с учетом L_μ позволяет учесть важнейшую особенность его – необходимость восстановления исходного магнитного состояния сердечника.

Так, с учетом приведенной выше эквивалентной схемы, можно показать, что подача импульсного напряжения на трансформатор в соответствии со схемой на рисунке 20, приведет к тому, что на вторичной обмотке будет формироваться импульс напряжения вида (См. Рис. 21):

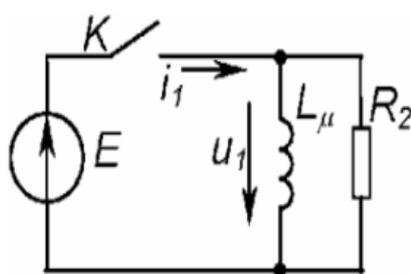


Рисунок 20 – Совершенная эквивалентная схема трансформатора с учетом L_{μ}

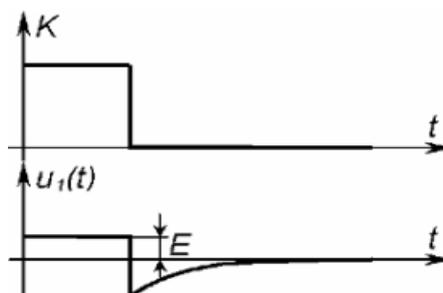


Рисунок 21 – Импульс напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Таким образом, при расчете трансформаторных цепей необходимо учитывать время восстановления магнитного состояния и формировать специальными цепями (цепями восстановления), форму напряжения при восстановлении. В показанном выше случае, при размыкании ключа K и отсутствии нагрузки, напряжение на ключе может стремиться к бесконечности, что приведет к его пробую.

Приведенные модели трансформатора являются низкочастотными, т.к. не учитывают влияние индуктивностей рассеяния и емкостей между обмотками. Полная эквивалентная схема трансформатора, приведенная к первичной цепи, имеет вид (См. Рис. 22).

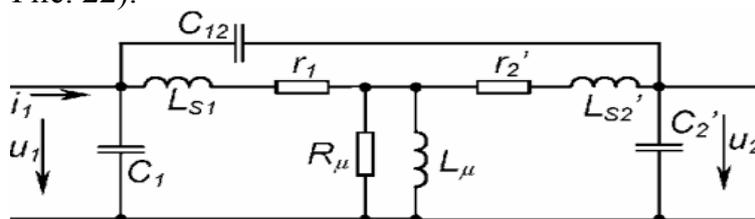


Рисунок 22. – Полная эквивалентная схема трансформатора, приведенная к первичной цепи

Здесь L_{s1} , L_{s2}' – индуктивность рассеяния первичной обмотки и приведенная к первичной индуктивность рассеяния вторичной обмотки; C_1 , C_2' – емкость первичной и приведенная к первичной емкость вторичной обмотки;

C_{12} – емкость между первичной и вторичной обмотками, R_{μ} – эквивалентное сопротивление, отображающее потери в магнитопроводе.

Расчет переходных процессов в такой схеме, разумеется, весьма сложен, поэтому ее в ряде случаев упрощают. Дело в том, что индуктивность намагничивания имеет величину на 3-4 порядка большую, чем индуктивность рассеивания. Поэтому постоянные времени при расчете могут различаться на 4 и более порядков. С другой стороны, в зависимости от того, является трансформатор понижающим или повышающим, существенно меняется приведенная величина индуктивности рассеивания L_{s1} :

$$L_{s2} = L_{s2}/n^2$$

Аналогично, в повышающих трансформаторах наибольшее влияние имеет приведенная к первичной обмотке емкость вторичной C_2 :

$$C_2' = C_2 \cdot n^2$$

Как правило, индуктивности рассеяния не оказывают существенного влияния на процессы в цепях намагничивания, поэтому оказывается возможным

объединить индуктивности рассеяния в одну. То же следует и для резисторов, отображающих омические потери в обмотках.

Поэтому для *повышающего* трансформатора $n \gg 1$ эквивалентная схема трансформатора имеет вид (См. Рис. 23). для *понижающего* – соответственно (См. Рис. 24).

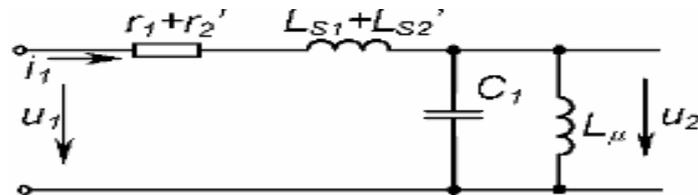


Рисунок 23 – Эквивалентная схема повышающего трансформатора

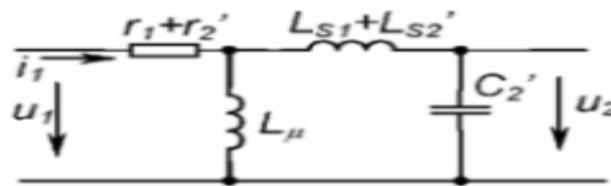


Рисунок 24 – Эквивалентная схема понижающего трансформатора

Тема 11.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Вопросы:

1. Моделирование полупроводниковых диодов.
2. Модель биполярного транзистора.
3. Определение параметров модели биполярного транзистора.
4. Малосигнальная динамическая модель биполярного транзистора.

Модели полупроводниковых приборов, как правило, нелинейные, можно сформировать двумя способами.

При первом (физическом) способе проводят анализ электрических процессов, происходящих в структуре полупроводникового прибора, выражают токи и напряжения на электродах прибора в соответствии с процессами, происходящими в нем, что, собственно, и дает ВАХ-прибора.

Полученную модель представляют базовыми моделями резисторов, индуктивностей и емкостей, зависимыми и независимыми источниками тока и напряжения, добавив реактивные компоненты, соответствующие свойствам конструктивного оформления прибора, получают полную модель, причем в нее входят параметры структуры прибора и его корпуса.

При втором подходе используется ВАХ-прибора, которая известна или снята экспериментально. ВАХ аппроксимируется с заданной точностью на том участке, на котором предполагается работа прибора.

При этом модель будет содержать некоторые эмпирические коэффициенты, не связанные с реальной физической структурой прибора.

При втором подходе за основу может быть принята также некоторая графическая модель.

ВАХ полупроводникового диода использует решение уравнения непрерывности, которое связывает концентрацию носителей заряда в любой точке полупроводника с параметрами электрического поля в полупроводнике,

скоростью генерации и рекомбинации носителей заряда, диффузией носителей и временем.

При этом, с учетом некоторых допущений (нулевая ширина **p-n**-перехода, отсутствие омического сопротивления базовой области перехода, отсутствие явлений пробоя перехода и поверхностных состояний), ВАХ перехода имеет вид:

$$I = I_0 \cdot (e^{U/\Psi_T} - 1) \text{ здесь}$$

$$I = q \cdot S (D_p p_{n0}/L_p + D_n n_{p0}/L_n)$$

Где **q** – заряд электрона, **S** – площадь **p-n**-перехода, **p_{n0}**, **n_{p0}** – концентрации неосновных носителей в областях **n** и **p**, соответственно; **D_p**, **D_n** – коэффициенты диффузии дырок и электронов. Электрическое обозначение диода на принципиальной схеме имеет вид: 

Статическая характеристика диода, соответствующая приведенному выражению, изображена на рисунке 25.



Рисунок 25 - Статическая характеристика диода

Последнее выражение и характеристика есть статическая характеристика (модель) **p-n**-перехода. Точность модели относительно невысока, что определяется принятыми допущениями. Реальная ВАХ отличается от идеальной наличием участка рекомбинационной составляющей прямого тока, термогенерационной составляющей обратного тока, токами утечки, явлениями пробоя на обратной ветви ВАХ, наконец, наличием сопротивления базовой области **p-n**-перехода и емкостями **p-n**-перехода, характеризующими инерционность процессов в приборе.

Вольтамперную характеристику реального диода с учетом указанных характерных особенностей можно представить в виде рисунка 26, а модель диода на основе такой аппроксимации в виде рисунка 27

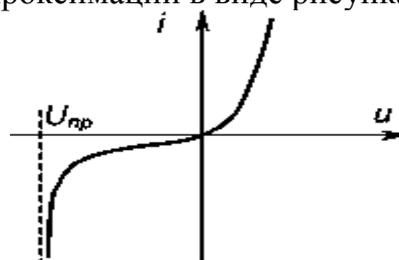


Рисунок 26 – Вольтамперная характеристика реального диода

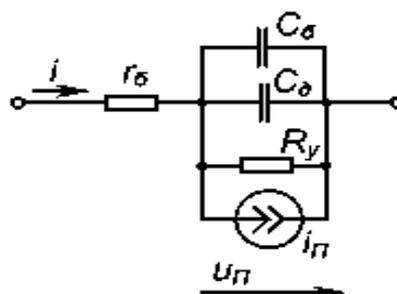


Рисунок 27 – Модель диода на основе вольтамперной характеристики реального диода

В указанной модели $i_n(U_n)$ – нелинейный источник тока, описывающий статический режим прибора в виде:

$$i = (i_n + i_y) = I_0 \cdot \left(e^{\frac{u-i \cdot r_b}{m \cdot \varphi_T}} - 1 \right) + \frac{u - i \cdot r_b}{R_y} - I_0 \cdot e^{A \cdot (U_{np} + B \cdot u)}$$

В последнем выражении I_0 – по-прежнему, тепловой ток прибора,

r_b – сопротивление базовой области перехода,

m – коэффициент, учитывающий реальную конфигурацию перехода,

U_{np} – напряжение лавинного или туннельного пробоя перехода,

A, B – коэффициенты аппроксимации ВАХ вблизи участка пробоя, причем $A < 0, B > 0$; R_y – сопротивление утечки p-n-перехода.

Необходимо отметить, что многие величины, входящие в модель – нелинейные. Сопротивление базы r_b , например, уменьшается с ростом тока через диод вследствие эффекта модуляции сопротивления, связанного с количеством носителей заряда в базовой области. Зависимость $r_b(i)$ можно представить в виде:

$$r_b = 1/k_1 + k_2 \cdot i,$$

где K_1, K_2 – некоторые коэффициенты, о величине которых речь пойдет ниже.

Емкостные составляющие модели – барьерная и диффузионная емкость p-n-перехода. Барьерная: емкость C_b – нелинейная емкость, обусловленная наличием объемного заряда неподвижных ионов донорной и акцепторной примеси вблизи границ области объемного заряда.

Нелинейная величина, зависящая от напряжения на переходе в соответствии с выражением:

$$C_b = C_{b0} (1 + n \cdot \Delta \Psi_0 / \Delta \Psi_0 - U_{np})$$

Здесь C_{b0} – величина барьерной емкости при $U_{np} = 0$,

A_{φ_0} – контактная разность потенциалов, равная $0,5 - 1V$

для полупроводников различных типов, n – показатель степени, равный $1/2$ для резких переходов и $1/3$ для плавных.

Формула точно отражает поведение барьерной емкости при обратном смещении ($U_{np} < 0$) и может дать большие погрешности при $U_{np} > 0$, т.к. в области больших токов диода, когда $U_{np} \sim \varphi_0$, $C_b \rightarrow \infty$.

При расчете могут возникать ошибки типа деления на ноль или переполнения разрядной сетки машины. Емкостью C_b при расчетах практически пренебрегать нельзя, поэтому предложены различные варианты устранения подобных неточностей и ошибок.

Например, модель Гуммеля-Пуна аппроксимирует емкость $C_b(U_{np})$ на прямом участке ВАХ выражением:

$$C_b = C_{b0} (1 + n \cdot U_{np} / \Delta \Psi_0)$$

На прямом участке вольтамперной характеристики важное значение имеет нелинейная диффузионная емкость p-n-перехода, которая определяется эффектом накопления носителей заряда в области базы при прямом смещении.

Величина $C_d(i)$ определяется соотношением:

$$C_d = (I_0 + i) \cdot \tau / m \Psi_T$$

Здесь τ – постоянная времени жизни не основных носителей заряда в области базы p-n-перехода.

Рассмотрим уравнение, описывающее **p-n**-переход в областях, далеких от пробойных участков. При этом:

$$\frac{du_{\Pi}}{dt} = \frac{1}{C_{\varepsilon} + C_{\sigma}} \left(i - I_0 \cdot \left(e^{\frac{u_{\Pi}}{m\phi_T}} - 1 \right) - \frac{U_{\Pi}}{R_y} \right),$$

а напряжение на диоде определяется суммой двух составляющих:

$$u = U_{\Pi} + U_{r\phi} = U_{\Pi} + i/k_1 + k_2$$

Полученная модель достаточно сложна, т.к., прежде всего, нелинейна. На практике достаточно часто используют кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ, достаточно точно соответствующую реальной на отдельных участках характеристики. Заменяем ВАХ следующей кусочно-ломаной линией.

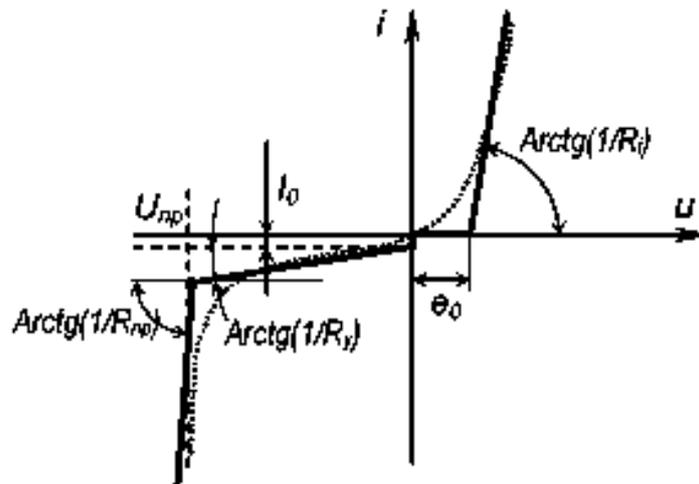


Рисунок 28 – Замена ВАХ реального диода кусочно-ломаной линией

Параметры аппроксимирующих прямых: R_i , e_0 , I_0 , R_y , U_{np} , R_{np} определяются по аппроксимируемой характеристике. Данной аппроксимации соответствует кусочно-линейная модель полупроводникового диода. Ее можно представить в виде следующей эквивалентной схемы.

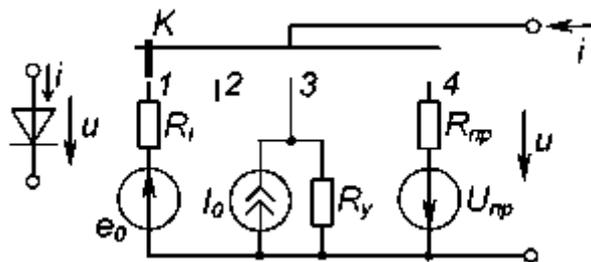


Рисунок 29 – Кусочно-линейная модель полупроводникового диода

Положение ключа **К** на указанной модели определяется из следующих условий:

1. положение при $i > 0$, $U > e_0$.
2. положение при $0 \leq U \leq e_0$.
3. положение при $-U_{np} \leq U \leq 0$; $i < 0$.
4. положение при $U < -U_{np}$.

Подобная модель достаточно груба, она используется обычно при начальном приближенном расчете электронной схемы, при самых грубых приближениях ее иногда еще более упрощают и приводят к виду (См. Рис. 30)

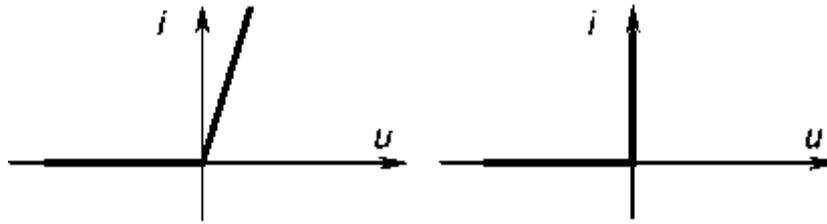


Рисунок 30 – Упрощение ВАХ диода

Модель биполярного транзистора

При этом можно записать: $U_{\max} = U_{\text{н}}(\mathbf{I}) + U_{\text{рб}}(\mathbf{I}) = U_{\text{н}}(\mathbf{I}) + U(\mathbf{0})$

Транзистор представляет собой структуру, состоящую из 2-х **p-n**-переходов. В нормальном усилительном режиме работы эмиттерный переход инжектирует носители заряда, которые, частично рекомбинируя в области базы попадают в коллекторный переход и создают коллекторный ток.

Ток рекомбинации носителей заряда в базе создает ток базы. Геометрия транзистора определяется таким образом, что рекомбинационная составляющая тока базы мала по сравнению с инжекционной составляющей тока эмиттера, поэтому создается возможность малой величиной базового тока управлять значительными величинами тока коллектора.

Таким образом, транзистор обладает способностью усиления тока, что определяет его основные свойства. Эквивалентная схема такой структуры может быть отображена двумя источниками тока и двумя **p-n**-переходами, а также элементами, дополняющими модели **p-n**-переходов:

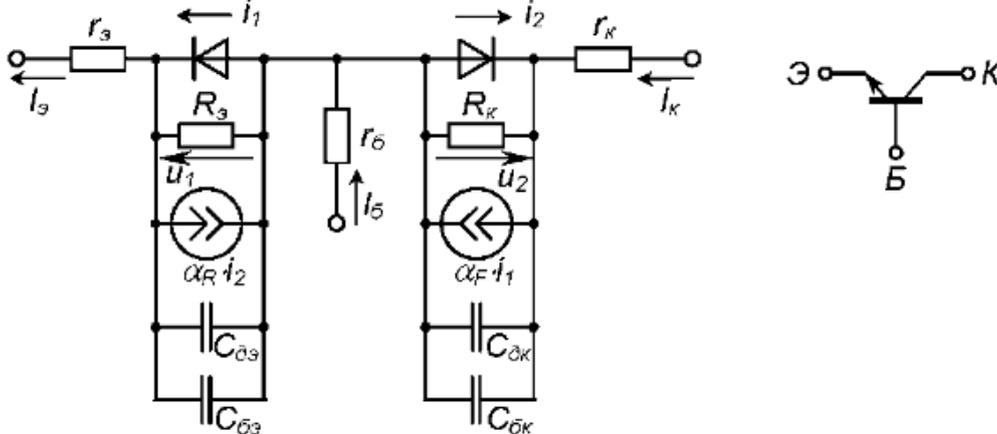


Рисунок 31 – Модель транзистора, предложенная Эберсом и Моллом в 1954 году

Такая модель, предложенная Эберсом и Моллом в 1954 году, получила названия модели Эберса-Молла.

Как и для случая **p-n**-перехода, токи диодов, инжектирующиеся через переходы, определяются в виде:

$$i_1 = I'_{\text{э0}} \cdot \left(e^{\frac{U_1}{m_s \varphi_T}} - 1 \right); \quad i_2 = I'_{\text{к0}} \left(e^{\frac{U_2}{m_k \varphi_T}} - 1 \right)$$

В статике, пренебрегая токами через сопротивления утечек, можно записать:

$$I_{\text{э}} = I'_{\text{э0}} \cdot \left(e^{\frac{U_1}{m_s \varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_R \cdot I'_{\text{к0}} \left(e^{\frac{U_2}{m_k \varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_K = \alpha_F \cdot I'_{\varepsilon 0} \cdot \left(e^{\frac{U_1}{m_e \varphi_T}} - 1 \right) - I'_{\kappa 0} \cdot \left(e^{\frac{U_2}{m_k \varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_{\delta} = I_{\varepsilon} - I_K$$

Несложно получить, что величина токов I_{ε} и I_K соответствует токам эмиттерного и коллекторного переходов при величине напряжения $U_2=0$ и $U_1=0$, соответственно, т.е. при закорачивании выводов коллектора и базы, и эмиттера и базы, соответственно и большой величине отрицательного напряжения на переходе.

В справочной литературе более часто встречаются в качестве параметров на транзисторы, токи $I_{\varepsilon 0}$ и $I_{\kappa 0}$, которые определяются токами эмиттерного и коллекторного переходов, соответственно, при разомкнутом электроде коллектора и эмиттера: $I_K=0$; $I_{\varepsilon}=0$



Рисунок 32 – Определение токов $I_{\varepsilon 0}$ и $I_{\kappa 0}$ эмиттерного и коллекторного переходов, соответственно, при разомкнутом электроде коллектора и эмиттера

Рассмотрим соотношения, связывающие $I'_{\varepsilon 0}$ и $I'_{\kappa 0}$ с величинами $I_{\varepsilon 0}$ и $I_{\kappa 0}$. В этом случае, например, при обрыве коллекторного перехода, ток $I_K=0$. Подставляя в уравнения модели $I_K=0$, несложно получить:

$$I'_{\varepsilon 0} = \frac{I_{\varepsilon 0}}{1 - \alpha_F \alpha_R}; \quad I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon 0} \cdot \left(e^{\frac{U_1}{m_e \varphi_T}} - 1 \right)$$

$I_{\varepsilon 0}$ – это обратный ток эмиттерного перехода при подаче на него запирающего напряжения $m_e \varphi_T$, много большего $I_{\varepsilon 0}$, и обрыве коллектора. Аналогично можно показать, что:

$$I'_{\kappa 0} = \frac{I_{\kappa 0}}{1 - \alpha_F \alpha_R}; \quad I_K = -I_{\kappa 0} \cdot \left(e^{\frac{U_2}{m_k \varphi_T}} - 1 \right)$$

Биполярный транзистор характеризуется коэффициентом передачи тока эмиттера α или тока базы β . Связь между коэффициентами осуществляется соотношениями:

$$\alpha = \frac{I_K}{I_{\varepsilon}}; \quad \beta = \frac{I_K}{I_{\delta}}; \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}; \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Динамические параметры транзистора учитываются в модели Эберса-Молла емкостными параметрами: барьерными емкостями $C_{\delta\varepsilon}$ и $C_{\delta\kappa}$, диффузионными емкостями $C_{\delta\varepsilon}$ и $C_{\delta\kappa}$:

$$C_{\delta\varepsilon} = \frac{\tau_F}{m_e \varphi_T} \cdot (i_{\varepsilon} + I'_{\varepsilon 0}); \quad C_{\delta\kappa} = \frac{\tau_{Rt}}{m_k \varphi_T} \cdot (i_K + I'_{\kappa 0})$$

Здесь t_F и t_R - постоянные времени жизни для нормального и инверсного включения транзистора. Следует отметить, что транзистор представляет собой существенно нелинейную структуру, поэтому все его параметры α , β , C_k , C_3 не постоянны, а зависят от режима, т.е. величины напряжений U_1 и U_2 , а также токов i_1 и i_2 .

Определение параметров модели биполярного транзистора

Определение теплового тока I_{30} и m_3 осуществляется путем снятия зависимости $I_3(U_{бэ})$.

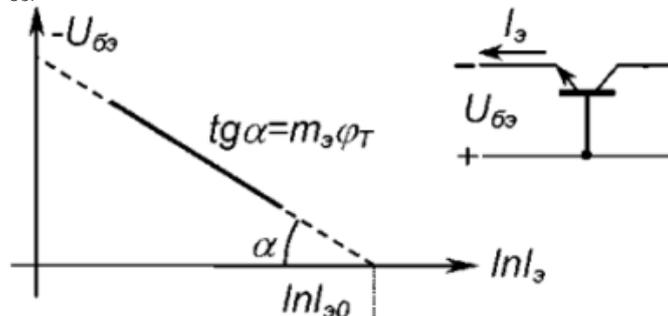


Рисунок 33 – Зависимость теплового тока I_{30} и m_3 в полулогарифмическом масштабе

Измерение $\beta_N(\alpha_N)$ осуществляется при $U_{к6} = 0$.

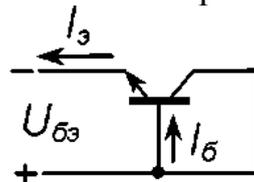


Рисунок 34 – Схема измерения $\beta_N(\alpha_N)$ биполярного транзистора

Аналогично, в инверсном режиме измеряются параметры $I_{к0}$, m_k и β_R . Определение сопротивлений r_3 , r_6 и r_k осуществляется в измерительной схеме.

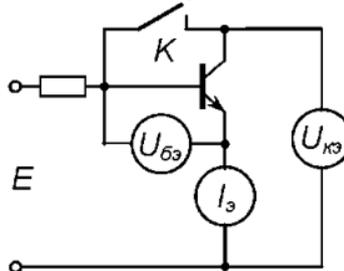


Рисунок 35 – Схема определения сопротивлений r_3 , r_6 и r_k биполярного транзистора

$$\beta_N = I_3 - I_6 / I_6;$$

$$\alpha_F = \beta_F / 1 + \beta_F;$$

1. При разомкнутом ключе K снимается зависимость $I_3 = f(U_{кэ})$.

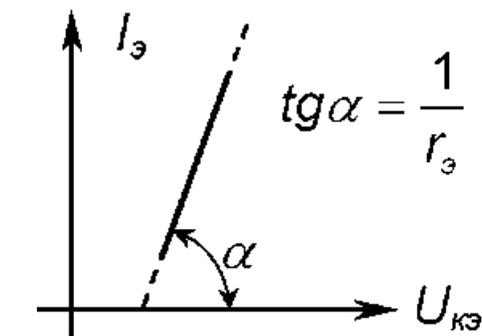


Рисунок 36 – Зависимость $I_3 = f(U_{кэ})$

2. Сопротивление r_k определяется аналогичным образом при инверсном включении транзистора и разомкнутом ключе K .

3. Для определения r_6 в измерительной установке определяется значения напряжения U_{63} при замкнутом ключе K $U_{63} = U_{631}$ и разомкнутом ключе K ($U_{63} = U_{632}$) и при одинаковых значениях тока I_3 :

$$\begin{aligned} U_{631} &= U_3 + r_6 I_6 + r_3 I_3, \\ U_{632} &= U_3 + I_3 (r_6 + r_3) \end{aligned}$$

U_3 - напряжение на переходе Эмиттер – База.

Так как $r_6 \gg r_3$, то $I_3 (r_6 + r_3) \gg r_6 I_6 + r_3 I_3$, откуда:

$$r_6 = (U_{632} - U_{631}) / I_3$$

Для определения параметра τ_f измеряется граничная частота усиления тока f_T как функция тока I_K . Аналитически эта связь определяется как:

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \tau_F + r_k \cdot C_{кб} + \frac{m_3 \cdot \varphi_T}{I_K} \cdot (C_{\delta n} + C_{кб})$$

Экстраполяция зависимости при $1/I_K \rightarrow 0$ позволяет при известных r_k и $C_{кб}$ определить τ_f .

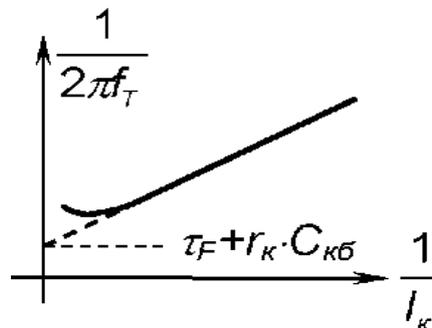


Рисунок 37 – Экстраполяция зависимости τ_f биполярного транзистора

Параметр τ_R определяется по результатам измерения постоянной рассасывания транзистора $\tau_{ин}$:

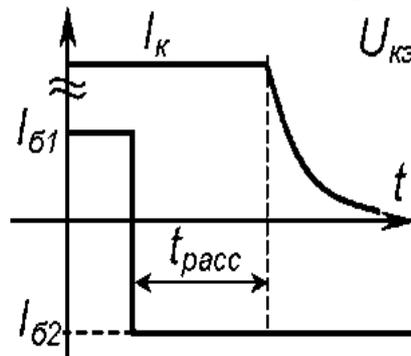


Рисунок 38 – Зависимость определения τ_R по результатам постоянной рассасывания

Измеряем $t_{расс}$ с использованием временных диаграмм, далее определяем:

$$\tau_{ин} = \frac{t_{расс}}{\ln \left[\frac{I_{\delta 1} + |I_{\delta 2}|}{\frac{I_{кн}}{\beta_F} + |I_{\delta 2}|} \right]}$$

Далее вычисляется:

$$\tau_R = \frac{1}{\beta_R} \cdot \left[\tau_{\text{об}} \cdot \frac{\beta_F + \beta_R + 1}{\beta_F} - \tau_F \cdot (\beta_R + 1) \right]$$

Малосигнальная динамическая модель биполярного транзистора

Для активного нормального режима малого сигнала широко используется простая модификация модели Эберса-Молла, которая может быть получена из основной модели при учете:

- а) прямого смещения эмиттерного перехода $U_{\text{бэ}} > 0$;
- б) большого отрицательного смещения на коллекторном переходе $U_{\text{бк}} < 0$;
- в) малого изменения напряжений и токов относительно рабочей точки по постоянному току. Рассмотрим для этого случая уравнения Эберса-Молла:

$$I_{\text{э}} = I'_{\text{э0}} \cdot \left(e^{\frac{U_{\text{бэ}}}{m_{\text{э}} \varphi_T}} - 1 \right) + \alpha_R \cdot I'_{\text{к0}} \quad I_{\text{к}} = \alpha_F \cdot I'_{\text{э0}} \cdot \left(e^{\frac{U_{\text{бэ}}}{m_{\text{э}} \varphi_T}} - 1 \right) + I'_{\text{к0}}$$

Выразим ток коллектора $I_{\text{к}}$ через ток эмиттера $I_{\text{э}}$:

$$I_{\text{к}} = \alpha_F \cdot I_{\text{э}} - \alpha_F \alpha_R I'_{\text{к0}} + I'_{\text{к0}} = \alpha_F \cdot I_{\text{э}} + (1 - \alpha_F \alpha_R) I'_{\text{к0}}$$

$$I_{\text{к}} = \alpha_F \cdot I_{\text{э}} + I_{\text{к0}}$$

Для малых приращений (режим малого сигнала):

$$i_{\text{к}} = \alpha_F \cdot i_{\text{э}} = \alpha_F \cdot \frac{U_{\text{бэ}}}{r_{\text{э дифф}}}, \quad \text{где } r_{\text{э дифф}} = \frac{m_{\text{э}} \varphi_T}{I_{\text{э}}}$$

Таким образом, малосигнальная эквивалентная схема биполярного транзистора в нормальном активном режиме выглядит следующим образом.

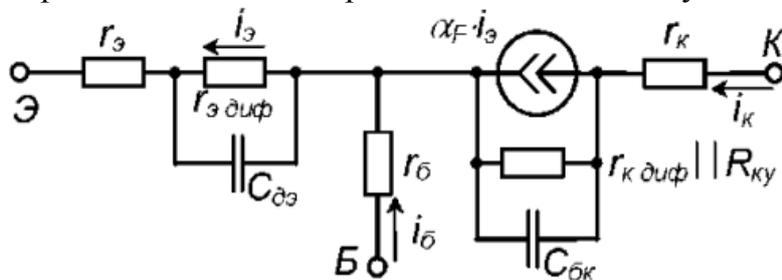


Рисунок 39 – Малосигнальная эквивалентная схема биполярного транзистора в нормальном активном режиме

Отметим, что в большинстве режимов можно пренебречь $r_{\text{э}}$, $r_{\text{к}}$ и $R_{\text{кУ}}$ ($r_{\text{э дифф}} \gg r_{\text{э}}$, $R_{\text{кУ}} \gg r_{\text{к дифф}}$, $r_{\text{к дифф}} \gg r_{\text{к}}$), а диффузионная емкость эмиттерного перехода $C_{\text{дэ}}$ учитывается частотно-зависимым коэффициентом передачи тока эмиттера

$$\alpha_F(p) = \frac{\alpha_F}{1 + p \tau_{\text{э}}}$$

С учетом сказанного малосигнальная инерционная схема замещения биполярного транзистора преобразуется к виду.

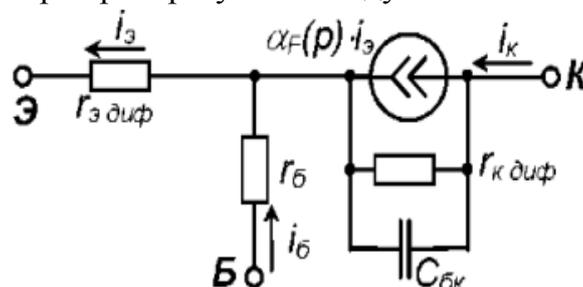


Рисунок 40 – Малосигнальная инерционная схема замещения биполярного транзистора

$$\alpha_F(p) = \frac{\alpha_F}{1 + p\tau_s}; \quad \beta_F(p) = \frac{\alpha_F(p)}{1 - \alpha_F(p)} = \frac{\alpha_F}{1 + p\tau_s} \cdot \frac{1}{\frac{1 + p\tau_s - \alpha_F}{1 + p\tau_s}} = \frac{\alpha_F}{1 + p\tau_s - \alpha_F}$$

$$\beta_F(p) = \frac{\frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}}{1 + \frac{p\tau_s}{1 - \alpha_F}} = \frac{\beta_F}{1 + (\beta_F + 1)p\tau_s}; \quad \beta_F(p) = \frac{\beta_F}{1 + p\tau_\beta}, \quad \text{где } \tau_\beta = (\beta_F + 1)\tau_s$$

Учитывая, что ток эмиттера равен сумме коллекторного и базового токов, схему можно преобразовать к виду:

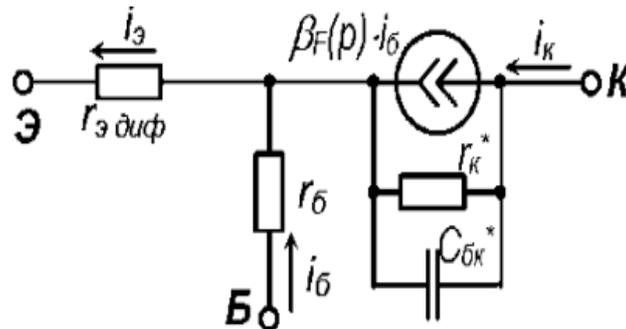


Рисунок 41 – Малосигнальная инерционная схема замещения биполярного транзистора

Для этого необходимо использовать следующие тривиальные преобразования:

$$i_s = i_b + \alpha_F(p) \cdot i_s + \frac{u}{r_s} + u \cdot p c_{бк} \Leftrightarrow i_s - i_b = \alpha_F(p) \cdot (i_b + i_s) + \frac{u}{r_s} + u \cdot p c_{бк} \Leftrightarrow$$

$$i_s(1 - \alpha_F(p)) = i_b \cdot \alpha_F(p) + \frac{u}{r_s} + u \cdot p c_{бк} \Leftrightarrow i_s = \frac{\alpha_F(p)}{(1 - \alpha_F(p))} \cdot i_b + \frac{u}{r_s \cdot (1 - \alpha_F(p))} + \frac{u \cdot p c_{бк}}{1 - \alpha_F(p)}$$

или

$$i_k = \beta_F(p) \cdot i_b + \frac{u}{r_k^*} + u \cdot p c_{бк}^*$$

$$i_k = \beta_F(p) \cdot i_b + \frac{u}{r_k \cdot \frac{1}{1 + \beta_F(p)}} + u \cdot p c_{бк} \cdot (1 + \beta_F(p))$$

где:

$$\beta_F(p) = \frac{\beta_F}{1 + p\tau_s(1 + \beta_F)} = \frac{\beta_F}{1 + p\tau_\beta}$$

$$c_{бк}^*(p) = c_{бк}(1 + \beta_F(p)); \quad r_k^*(p) = \frac{r_k}{1 + \beta_F(p)}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе изучения учебного пособия и прохождения дисциплины «Программное обеспечение схмотехнических устройств» студент должен освоить образовательную программу высшего образования – программу бакалавриата по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», направленность (профиль) – Защищенные сети связи, квалификация – бакалавр.

Дисциплина «Программное обеспечение схмотехнических устройств» нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций: ПК-1 Способен к эксплуатации и развитию сетевых платформ, систем и сетей передачи. Содержание дисциплины охватывает широкий круг вопросов: от фундаментальных основ и физических принципов функционирования электронных приборов различного назначения и их характеристик до рассмотрения схмотехнических решений, применяемых при проектировании аналоговых электронных устройств, методах анализа устройств, которые обеспечивают усиление и обработку аналоговых сигналов, в том числе и с использованием интегральных микросхем, выпускаемых промышленностью особенностями их практического применения.

Преподавание дисциплины «Программное обеспечение схмотехнических устройств» предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, лабораторные работы, практические занятия, самостоятельная работа обучающегося.

**ПЕРЕЧЕНЬ
РЕКОМЕНДОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАНЯТИЯМ**

1. Авдеев В.А. Периферийные устройства: интерфейсы, схемотехника, программирование / В.А. Авдеев. – 2-е изд. – Саратов: Профобразование, 2019. – 848 с.
2. Алехин В.А. Электроника и схемотехника. Конспект лекций с использованием компьютерного моделирования в среде «Tina-Ti»: мультимедийное электронное учебное пособие / В.А. Алехин. – Саратов: Вузовское образование, 2017. – 484 с.
3. Алехин В.А. Электроника и схемотехника. Мультимедийный практикум с использованием компьютерного моделирования в программной среде «TINA» / В.А. Алехин. – Саратов : Вузовское образование, 2017. – 290 с.
- Архипов С.Н. Схемотехника телекоммуникационных устройств: учебно-методическое пособие / С.Н. Архипов. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. – 101 с.
4. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М. Методы моделирования радиоэлектронных компонентов и устройств: монография / В.Н. Бирюков, А.М. Пилипенко – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. – 168 с.
5. Булатов В.Н. Микропроцессорная техника. Схемотехника и программирование: учебное пособие / В. Н. Булатов, О. В. Худорожков. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2016. – 377 с.
6. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – 4-е, изд. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 636 с.
7. Гаврилов С. А. Схемотехника. Мастер-класс / С. А. Гаврилов. – СПб: Наука и Техника, 2016. – 384 с. // Лань: Электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/90216>.
8. Галочкин В.А Схемотехника радиотехнических устройств. Учебник / В.А. Галочкин. – Москва: Инфра-Инженерия, 2023. – 323с.
9. Кравец А.В. Учебное пособие по курсу «Схемотехника аналоговых электронных устройств» / А.В. Кравец. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – 184с.
10. Купцов С.В. Практическая схемотехника: Учебное пособие / С.В. Купцов, В.Т. Николаев, В.Н. Тикменов; под редакцией В. Н. Тикменова. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 296 с. // Лань: Электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/91152>.
11. Логвинов В.В., Матвеева О.В. Учебно-методическое пособие по дисциплине «Схемотехника телекоммуникационных устройств» / В.В. Логвинов, О.В. Матвеева. – Москва: МТУСИ, 2016. – 46 с.
12. Лоскутов Е.Д. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебное пособие / Е.Д. Лоскутов. – Саратов Вузовское образование, 2016. – 264 с.

13. Орлова М.Н. Схемотехника: Курс лекций / М.Н. Орлова, И.В. Борзых. – Москва: МИСиС, 2016. – 83 с. // Лань: Электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/93603>.
14. Основы цифровой схемотехники: Учебное пособие. Часть 1 // Составители: В.И. Клюкин, Ю.К. Николаенков, Е.Н. Бормонтов. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016. – 93с.
15. Пуховский В.Н. Электротехника, электроника и схемотехника. Модуль «Цифровая схемотехника»: Учебное пособие / В.Н. Пуховский, М.Ю. Поленов. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. – 163 с.
17. Суханова Н.В. Основы электроники и цифровой схемотехники: учебное пособие / Н.В. Суханова. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2017. – 96 с.
18. Суханова Н.В. Электроника и схемотехника: лабораторный практикум. Учебное пособие / Н.В. Суханова. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – 91 с.
19. Ульрих Титце. Полупроводниковая схемотехника. Т. II / Ульрих Титце, Кристоф Шенк. – Саратов: Профобразование, 2019. – 940 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/88004.htm>.
20. Харрис Д.М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. Дополнение по архитектуре ARM / Д. М. Харрис, С.Л. Харрис; перевод с английского А. А. Слинкин. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 356 с. // Лань: Электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/111431>.
21. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл; Перевод с английского: Б.Н. Бронина, А.И. Короткова, М.Н. Микшиса, Л.В. Поспелова, О.А. Соболеой, Ю.В. Чечеткина. – Москва: БИНОМ, 2014. – 704 с. – URL: https://miphworld.ru/wp-content/uploads/Khorovits_P_Khill_U_-_Iskusstvo_skhemotekhniki_-_2014.pdf.
22. Чикалов А.Н. Схемотехника телекоммуникационных устройств: учебное пособие / А.Н. Чикалов, С.В. Соколов, Е.В. Титов; под редакцией С.В. Соколова. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2017. – 322 с. // Лань: Электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/111115>.
23. Шошин Е.Л. Схемотехника телекоммуникационных устройств: проектирование широкополосных усилителей на биполярных транзисторах: Учебное пособие / Е.Л. Шошин. – Саратов: Вузовское образование, 2020. – 69 с.
24. Юрчук С.Ю., Мурашев В.Н. Моделирование полупроводниковых приборов: Курс лекций / С.Ю. Юрчук, В.Н. Мурашева. – Москва: МИСиС, 2001. – 98с.
25. Ярочкина Г.В. Основы электротехники: учеб. пособие для учреждений нач. проф. образования / Г.В. Ярочкина. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 240 с.

Учебное издание

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие в 2-х частях

Часть 1

АВТОРЫ:

Р.М. Данилов, Н.С. Данилова, Н.В. Шульженко

Под общей редакцией

Р.М. Данилова

Учебное пособие издается авторской редакции

Подписано в печать 24.07.2024г.

Сдано в печать 25.07.2024г.

Бумага для множительных аппаратов.

Формат 60x84/16. Тираж 50 экз. Усл. печ. л. 4,0

Редакционно-издательская группа
Хабаровский институт инфокоммуникай (филиал) ФГОБУ ВО
«Сибирский государственный университет коммуникаций и информатики»
(ХИИК СибГУТИ)
680000, г. Хабаровск, ул. Ленина 73.