**ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**

**УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

КАЛЮЖНЫЙ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**Моделирование и методы измерения параметров радиокомпонентов электронных схем**

Специальность 05.13.12 - Системы автоматизации проектирования

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –

кандидат технических наук, доцент Мирошник И.А.

**Воронеж** 2004

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Основные обозначения и сокращения

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ РАДИОКОМПОНЕНТОВ

1.1. Структура элементной базы радиоэлектронных

1.2. Связь двухполюсных и многополюсных радиокомпонентов

1.3. Модели радиокомпонентов

1.3.1.Общие положения

1.3.2.Классификация моделей радиокомпонентов

1.3.3.Основные требования к моделям

1.3.4.Макромодели пассивных радиокомпонентов

1.3.5.Встроенные макромодели транзисторов

1.3.6.Макромодели, определяемые пользователем

1.3.7.Факторные статистические модели многополюсных радиокомпонентов

1.4. Измерительные задачи

1.5. Выводы по главе

ГЛАВА2. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАКРОМОДЕЛИЙ МНОГОПОЛЮСНЫХ РАДИОКОПОНЕНТОВ

2.1. Общие положения

2.2. Матричное представление динамических параметров многополюсника

2.2.1Определение Y и Z матриц

2.2.2.Измерение матриц рассеяния в схемах с конечными активными нагрузками

2.3. Измерение Y – параметров многополюсника с учётом паразитных параметров измерительных цепей

2.3.1 Паразитные параметры измерительных схем

2.3.2.Первый метод определения Y- матриц с учётом паразитных параметров измерительных цепей

2.3.3.Второй определения Y- матриц при комплексном характере полюсных нагрузок и образцовых мер

2.3.4.Третий метод измерения – полное исключение влияния входной цепи измерительного прибора на результаты измерений

2.4. Калибровка измерительных цепей

2.4.1.Измерение динамических параметров двухполюсных элементов

2.4.2.Определение динамических параметров образцовых мер

2.4.3.Аттестация паразитных параметров контактно-соединительных цепей

2.4.4.Корректировка Y- матриц по данным аттестации контактно-соединительных цепей

2.5. Измерения в переменном базисе полюсных нагрузок

2.6. Выводы по главе

ГЛАВА3 ПЛАНИРОВАНИЕ АКТИВНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

3.1.Традиционные подходы в области измерений ВАХ

3.2.Содержание планов активного факторного эксперимента

3.3.Алгоритм обработки матрицы

3.4. Алгоритм формирования макромоделей биполярных

транзисторов

3.5. Выводы по главе

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ РАДИОКОМПОНЕНТОВ

4.1 .Калибровка образцовых мер в СВЧ диапазоне

4.2.Определение рационального режима измерения двухполюсников в схемах с конечными нагрузками

4.3. Измерение вольт-амперных характеристик биполярного транзистора

4.4. Выводы по главе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ А Модуль расчёта оптимального режима вухполюсника в оболочке Mathcad

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Файл данных для МПЛ



ПРИЛОЖЕНИЕ В Файл данных для МПЛ



ПРИЛОЖЕНИЕ Г Файл результатов расчёта модели транзистора на основе ВАХ

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Листинг программы для расчёта модели транзистора на основе ВАХ

**ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

А - акустоэлектронный компонент

АК - активный компонент

АФЭ - активный факторный эксперимент

АФФ - аналитическая факторная функция

БМ - библиотека моделей

БТ - биполярный транзистор

ВЧ - высокая частота

ВАХ - вольт-амперная характеристика

Г - гибридный компонент

Д - дискретный радиокомпонент

ДП - двухполюсник

ДФЭ - дробный факторный эксперимент

И - интегральный компонент

ИС - интегральная схема

КФУ - коэффициент факторного уравнения

ММ - математическая модель

МП - многополюсник

МПЛ - матрица планирования

ПК - пассивный компонент

ПФЭ - полный факторный эксперимент

ПФУ - постоянная факторного уравнения

Р - радиокомпонент с распределёнными параметрами

РК - радиокомпонент

РЭА - радиоэлектронная аппаратура

РЭС - радиоэлектронных систем

САПР - система автоматизированного проектирования

СВЧ - сверхвысокая частота - точка спектра плана

ТСП - табличная факторная функция

ТФФ ТЭФФ - табличное значение элементарной факторной функции

**Ф -** функциональный компонент

ФСМ - факторная статистическая модель

ФЭ - факторный эксперимент

Ц - цифровой компонент

ЦАМ - цифровая аналитическая макромодель

ЭБ - элементная база

ЭВМ - электронно-вычислительная машина

ЭС - электронная схема

ЭФФ - элементарная факторная функция

**ВВЕДЕНИЕ**

Алгоритмические методы широко используются для измерения и расчёта параметров математических моделей (ММ) радиокомпонентов (РК) в системах автоматизированного проектирования (САПР) электронных схем (ЭС). Это обусловлено тем, что на данный момент накоплено достаточное количество ММ РК, применяемых для проектирования ЭС с использованием современных электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и программного обеспечения, например PSpice [1].

Алгоритмические методы применяются также для измерения параметров РК на производстве с целью проведения входного и выходного контроля, стабильности технологического процесса, проведения отбраковки радиокомпонентов по различным параметрам.

К этому следует добавить, что на территории России, стран СНГ и за рубежом налажено производство широкого ассортимента стандартных РК, что определяет значительную потребность в использовании таких методов измерения и снижении стоимости исследований в данной области.

Исследования поведения РК, а также попытки их описания с помощью формул, графиков и т.д., т.е. составление ММ РК, при изменении различных условий работы и внешних факторов появлялись с момента изобретения всё новых и новых РК. Данные исследования проводились в основном без использования ЭВМ, что увеличивало срок и стоимость разработок.

Появление алгоритмических методов измерения было обусловлено несколькими факторами:

1. Увеличением количества РК.
2. Усложнение проектируемых устройств.
3. Необходимостью снижения времени и стоимости разработок.
4. Появлением ЭВМ, удовлетворяющих требованиям разработчиков электронных схем.

Измерения параметров РК с использованием ЭВМ можно отнести к 60-70 годам XX века. Для этих целей использовались ЭВМ с довольно низкими параметрами и несовершенное программное обеспечение. Поэтому высокая стоимость и сложность работ не позволили наладить регулярное и комплексное исследование в данном направлении. Внедрение ЭВМ в цикл проектирования выдвинуло на передний план алгоритмические методы измерения параметров ММРК.

Системное исследование в этой области можно отнести к 70-80 годам XX века, т.е. к моменту "компьютерной революции". Комплексный характер работ в области моделирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) наиболее полно сформулировал Логан [2,3], который связал САПР РЭА с системным подходом, включающим в себя:

1. Разработку ММ.
2. Проверку адекватности ММ.
3. Описание разбросов параметров.
4. Влияние окружающей среды (температура, влажность, механические воздействия и т.д.).
5. Исследование надёжности и процессов старения.

На повышение точности измерений, уменьшение сроков и стоимости исследований, разработок наряду с применением ЭВМ большое влияние оказывает метод измерения. Поэтому выбор метода измерения имеет одно из основных значений.

Цель диссертационной работызаключается в:

1. Анализ разнообразия РК, применяемых САПР ЭС.
2. Формировании новых методов решения задачи измерения динамических параметров моделей РК.
3. Формировании модели биполярного транзистора на основе ВАХ с использованием планирования эксперимента и новых методов измерения.

Диссертационная работа направлена на повышение точности измерения, скорости, упрощения измерений с помощью ЭВМ за счёт использования наиболее эффективных методов измерения.

Предметами исследованияявляются:

1. Алгоритмические методы измерения параметров моделей РК.

2. Динамическая модель многополюсника на основе Y-матрицы.

3. Модель биполярного транзистора на основе ВАХ.

Исходя из всего вышеизложенного, **научная проблема** диссертационного исследования формулируется следующим образом.

Разработка алгоритмических методов измерения статических и динамических параметров моделей РК, формирование ММ РК.

Исследования направлены на:

1. Поиск путей повышения качества ММ РК и РА на основе анализа состояния вопросов теории и практики их проектирования, современных тенденций развития.

2. Развития теоретических положений по расчёту и проектированию ММ РК и РЭА

3. Разработку методов измерения и моделирования РК и РЭА на основе известных теоретических положений, нового метода расчёта, результатов натурных испытаний.

**Научная новизна работы** заключается в:

1. Создании новой классификации РК и моделей РК ориентированной на САПР ЭС.

2. Разработке новых методов измерения параметров моделей РК.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем: 1. Использование предложенных методов позволяет сократить время моделирования РК при обеспечении заданной точности и реализовать интерактивный режим работы пользователя.

1. На производстве данный метод может быть применён с целью проведения входного и выходного контроля, контроля стабильности технологического процесса, проведения отбраковки радиокомпонентов по различным параметрам.
2. Применение разработанных методов повышает надёжность создаваемых РК.

**Публикации**. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ. Из них 8 статей в межвузовских сборниках научных трудов, 4 тезисов докладов на конференциях.

Разработанные методы измерения внедрены в учебный процесс на кафедре "Радиоэлектронных устройств и систем" Воронежского государственного технического университета, а также в производственный процесс на ОАО "Электросигнал" г. Воронеж.

ГЛАВА 1 содержит анализ элементной базы РЭС с точки зрения её применения в САПР ЭС, а также произведено деление РК на ДП и МП радиокомпоненты; анализ моделей РК с целью их классификации; выделен класс алгоритмических моделей; сформулированы требования к моделям; рассмотрены модели пассивных, активных РК, транзисторов, факторные модели; поставлены измерительные задачи.

ГЛАВА 2 является основной теоретической главой и содержит основные положения по разработанным методам измерения на основе базовой методики.

В ней отражён базовый метод измерения параметров ДП и МП на основе Y матриц, основанный на измерении матриц холостого хода, нагруженного режима и вектора калибровочных напряжений. Указаны достоинства и недостатки при измерении данным способом.

Описаны идеальный метод измерения при использовании чисто активных нагрузок, учитывающий систематические погрешности.

Метод измерения при использовании одного векторного вольтметра.

Метод измерения при использовании нескольких векторных вольтметров или одного векторного вольтметра с несколькими измерительными входами.

Описаны достоинства и недостатки данных методов для различных условиях измерительного процесса.

ГЛАВА 3 содержит сравнительный анализ различных планов экспериментов, теоретические положения по формированию модели биполярного транзистора на основе ВАХ, алгоритмы обработки МПЛ.

ГЛАВА 4 является исследовательской, практической главой. В ней

содержатся результаты исследований и практических измерений. Проведено исследование возможности применения стандартной образцовой меры в виде

резистора поверхностного монтажа при измерениях по методикам описанным в ГЛАВЕ 2, исследование по определению рационального режима измерения двухполюсников, а также произведена разработка программы для проведения измерений по методике описанной в ГЛАВЕ 3 и её практическая апробация.

**ГЛАВА 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МОДЕЛЕЙ РАДИОКОМПОНЕНТОВ**

1.1. Структура элементной базы радиоэлектронных схем

Элементную базу (ЭБ) радиоэлектронных систем (РЭС) составляет множество различных радиокомпонентов (РК), на основе которых производится проектирование РЭС. В самом общем случае ЭБ РЭС может быть представлена структурной схемой, показанной на рис. 1.1.

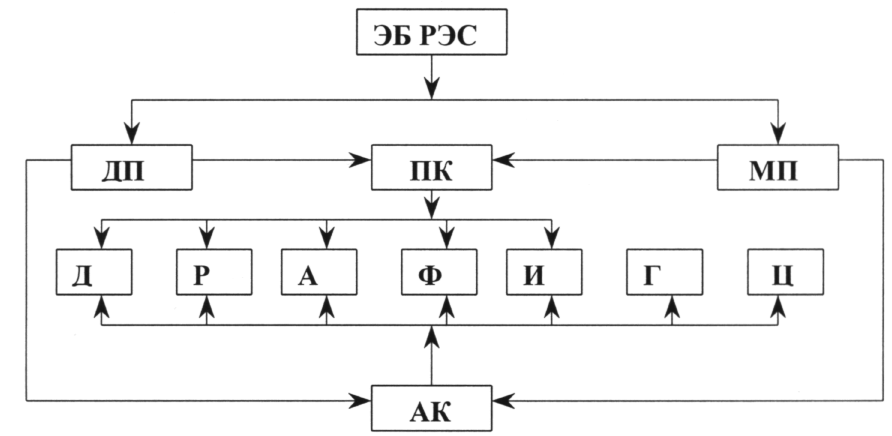


Рис. 1.1. - Структурная схема ЭБ РЭС

Согласно схемы рис. 1.1 ЭБ РЭС может быть подразделена на двухполюсные (ДП) и многополюсные (МП) РК, которые в свою очередь могут быть представлены пассивными (ПК) и активными (АК) РК. Под ПК будем понимать РК, в процессе функционирования которых не происходит увеличение уровня мощности сигнала поступающего на РК за счёт дополнительных источников энергии. Остальные РК будем считать активными.

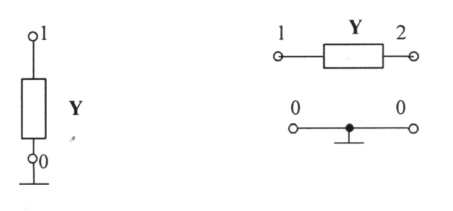
АК и ПК предлагается разделить на следующие крупные классы: 1. Дискретные (Д), отличающиеся законченностью конструкции и готовностью к непосредственному применению в сложных РЭС.

1. Компоненты с распределёнными параметрами (Р), принцип действия которых основан на использовании волновых процессов в электромагнитных и акустоэлектронных устройствах.
2. Акустоэлектронные (А), работающих на основе акустоэлектронных явлениях в твёрдом теле.
3. Функциональные (Ф), предназначенные для глубокой обработки электрических сигналов.
4. Интегральные (И), полученные по интегральным технологиям.
5. Гибридные (Г), полученные по смешанным технологиям.
6. Цифровые (Ц), предназначенные для цифровой обработки сигналов.

Структурная схема рис. 1.1, по существу, отвечает классификации ЭБ РЭС, ориентированной на применение РК в САПР.

**1.2. Связь двухполюсных и многополюсных радиокомпонентов**

Разделение РК на ДП и МП достаточно условное. Так, любой ДП в зависимости от способа включения в электрическую схему можно рассматривать как собственно ДП или как МП, а именно четырёхполюсник рис. 1.2.



а) б)

Рис. 1.2. - Варианты включения ДП: а) как собственно ДП;

б) как четырёхполюсник; *у -* его полная проводимость.

0,1,2 - узлы подключения к схеме.

С другой стороны любой МП моно включить как ДП, например соединяя с общей шиной все полюса МП, кроме одного.

При проектирование РК и идентификации его параметров необходимо учитывать область действия физических законов связанных с его функционированием. Особое внимание необходимо уделять электрофизическим законам которые определяют основные электрические параметры РК. В каждом конкретном случае доминирует одно из электрофизических явлений, но также проявляется влияние и других паразитных.

Количество МП можно считать безграничным так как МП проектируется на основе ДП, а каждому реальному МП отвечает определённый способ соединения составляющих его ДП.

**1.3. Модели радиокомпонентов**

**1.3.1.Общие положения**

Под моделью РК будем понимать любое математическое описание, отражающее с требуемой точностью его поведение в реальных условиях.

Если РК является элементом электронной схемы, то его моделью будем называть математическое описание связей между токами и напряжениями, возникающими между его полюсами в статическом и динамическом режимах работы. В частности моделями могут быть уравнения вольт - амперных характеристик (ВАХ), дифференциальные уравнения переходных процессов, частотные характеристики и т.п. [4,5].

Математическую модель РК можно рассматривать как некоторый оператор, ставящий в соответствие системе внутренних параметров , ... , совокупность связанных между собой внешних параметров ... , . Вид функциональной связи зависит от принципа действия РК, а содержание "внешних" и "внутренних" параметров РК определяет его физическая сущность и способ использования.



Так для моделей РК внешними параметрами являются токи и напряжения, так как преобладающим методом расчёта электрических схем является расчёт по токам и напряжениям [5].

Внутренними параметрами модели РК могут быть его электрические, электрофизические или конструктивно-технологические параметры.

Электрическими будем считать параметры, определяемые только при электрических измерениях (коэффициенты усиления, крутизна, входное и выходное сопротивления и т.п.). В некоторых случаях это параметры "чёрного ящика", которым трудно придать физический смысл. Электрические параметры, как правило, являются функциями электрофизических и конструктивно—технологических параметров, которые можно считать первичными параметрами, а электрические - вторичными.

При расчёте интегральных схем (ИС) важное значение имеет учёт первичных параметров с точки зрения оптимизации процесса изготовления ИС.

При расчётах электронных схем, спроектированных на основе готовых конструктивно завершённых компонентов, что характерно для предприятий сборщиков радиоэлектронных средств (РЭС), достаточно владеть

информацией только о внешних параметрах РК. По сути дела внешние параметры РК при этом выполняют функцию внутренних параметров проектируемого изделия.

**1.3.2.Классификация моделей радиокомпонентов**

Достаточно убедительная классификация моделей РК, приведённая в [5], отражена на структурной схеме рис. 1.3.

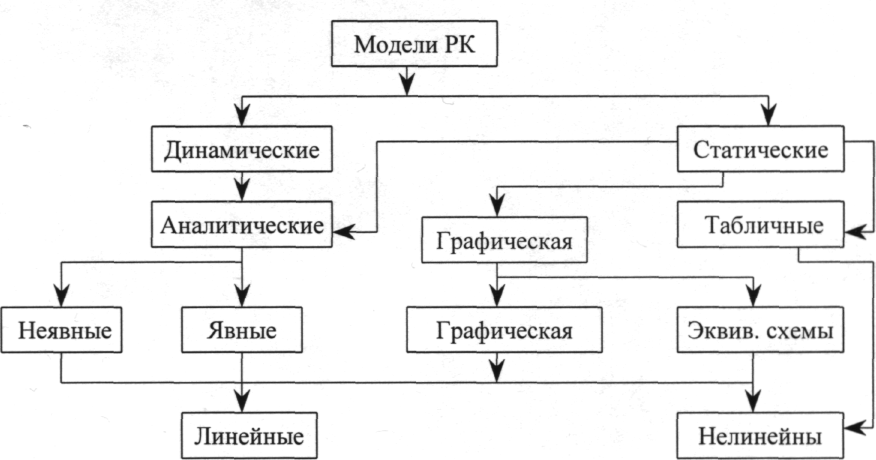


Рис. 1.3. - Классификация моделей РК

Статические модели отражают только связь между постоянными токами и напряжениями, тогда как динамические учитывают частотные или временные зависимости параметров РК, возникающими из-за влияния внутренних индуктивностей и ёмкостей РК.

По способу представления модели могут быть заданы аналитически, графически или таблично. Отсюда следуют понятия аналитических, графических и табличных моделей. Такое разделение нужно считать условным. На практике, как правило, широко используют комплексные модели РК. Например, на графических моделях типа эквивалентных схем для описания нелинейных элементов широко используют аналитические зависимости, а обработка данных табличных моделей производится математическими методами по специально разработанных алгоритмам.

Аналитические статические модели РК представляют обычно в виде явных зависимостей токов и напряжений, выраженных в виде уравнений ВАХ.

Динамические модели удобно представлять в неявном виде в форме дифференциальных уравнений [5].

Графические модели могут быть представлены в двух видах: в форме графиков функциональной связи токов и напряжений, в форме эквивалентных схем. Эквивалентные схемы наглядны, но требуют дополнительного анализа для получения значений токов и напряжений, что существенно усложняет общуюструктуру схемы анализируемого устройства.

Графическую статическую модель можно представить в форме графиков ВАХ или в форме статической эквивалентной схемы. Графики ВАХ не позволяют их непосредственное использование, так как для их ввода в ЭВМ необходимы преобразования в цифровую форму. С другой стороны, эквивалентная схема требует дополнительного описания в виде аналитических зависимостей между токами и напряжениями нелинейных элементов, входящих в состав этой схемы. Эквивалентная схема удобна для анализа функционирования РК, моделируемого этой схемой, а для расчёта РЭС более удобна соответствующая ей аналитическая макромодель, в которую включено математическое описание тех её элементов, параметры которых зависят от статического режима [5].

Табличные модели представляют собой таблицы соответствующих графиков ВАХ. Полученные экспериментальным путём, по которым рассчитывают соответствующие режимы РК. Для получения таких таблиц целесообразно использовать теорию методов планирования эксперимента [5].

На практике любую из рассматриваемых моделей оформляют в виде библиотечной подпрограммы, задав алгоритм вычисления требуемых для анализа параметров РЭС по данным аналитических или графических моделей.

Современное развитие ЭВМ и измерительной техники позволяет среди аналитических и графических моделей выделить класс алгоритмических моделей [5], которые характерны тем, что вследствие сложности связей между токами и напряжениями рассчитывать их можно только численными методами, задав алгоритм, метод вычислений. По существу это цифровые модели, которые реализуются в виде подпрограмм, обрабатывающих экспериментальные данные на этапе подготовки данных или во время расчёта РЭС.