

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.С. ИШКОВ

**Основы компьютерного проектирования
и моделирования радиоэлектронных средств**

Учебное пособие

ПЕНЗА 2010

УДК 621.396.6.001.57(07)

Учебное пособие предназначено для ознакомления студентов с основными способами и методами проектирования и схемотехнического моделирования радиоэлектронных средств с помощью ПЭВМ. Приведены основные сведения, необходимые для грамотной работы с системой моделирования Electronics WorkBench и программой Capture CIS системы OrCAD.

Учебное пособие подготовлено на кафедре "Радиотехника и радиоэлектронные системы" и предназначено для студентов специальности 210302.

Ил. 46, табл. 3, библиогр. 31 назв.

Автор: **А.С. Ишков**

Содержание

Введение	4
1 Цели, способы, задачи и процессы автоматизированного компьютерного проектирования РЭС	5
2 Математические основы компьютерного моделирования компонентов РЭС	15
3 Схемотехническое моделирование аналоговых устройств	23
4 Функциональное моделирование РЭС	36
5 Методы расчета и анализа выходных параметров схем	41
6 Использование программных средств для схемотехнического проектирования и моделирования РЭС	45
Библиографический список	61

Введение

Курс «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств», изучаемый студентами специальности 210302 «Радиотехника» охватывает вопросы постановки задачи процессов проектирования и моделирования радиоэлектронных средств (РЭС), методы построения математических моделей РЭС и расчета электрических схем.

1 Цели, способы, задачи и процессы автоматизированного компьютерного проектирования РЭС

1.1 Общие сведения о процессе проектирования

Проектирование – комплекс работ, проводимых с целью получения описания нового или модернизируемого технического объекта, достаточных для реализации или изготовления объекта в заданных условиях.

Проектирование РЭС – процесс разработки технической документации, на основании которой может быть получено РЭС, выполняющее возложенные на него функции.

Объектами проектирования являются изделие или какой-либо процесс, связанный с его производством.

Примерами реальных объектов проектирования из области энергетики, радиотехники и электроники являются:

- проектирование высоковольтных электрических сетей, тепловых и атомных электростанций;
- проектирование радиотехнических систем и устройств, сложных электронных схем;
- трассировка печатных плат и др.

Основные понятия и термины

Проектное решение – промежуточное или окончательное описание объекта проектирования технической документацией заданной формы, необходимое и достаточное для окончания проектирования или выбора путей его продолжения.

Типовое проектное решение – известное проектное решение, хорошо проверенное в предыдущих разработках и используемое в процессе проектирования.

Частное проектное решение – промежуточное описание объекта проектирования, частично удовлетворяющее требованиям задания на проектирование.

Проектный документ – документ, выполненный по заданной форме, в котором содержится какое-либо проектное решение.

Описание объекта проектирования производится заданием его характеристик и их числовыми значениями или параметрами. Например, напряжение питания U – характеристика, а $U = 220_{-15\%}^{+10\%}$ В – это параметр.

Параметры элементов, из которых состоит проектируемое устройство, называются внутренними; параметры, по которым оценивается качество устройства – выходными; параметры действующих на устройство внешних информационных сигналов – входными, а параметры окружающей среды – внешними. Фазовыми переменными называют величины, характеризующие физическое или информационное состояние объекта.

Например, для транзисторного усилителя: фазовые переменные – напряжения и токи всех ветвей (как функции времени или частоты), входные параметры – частота и амплитуда гармонического входного сигнала, спектральная характеристика входного сигнала, внутренние параметры – параметры

транзисторов, значения сопротивлений резисторов, выходные параметры – коэффициент нелинейных искажений, потребляемая мощность, внешний параметр – температура окружающей среды.

Комплекс проектных работ включает в себя:

- теоретические и экспериментальные исследования,
- расчеты,
- анализ,
- конструирование и другие виды работ.

Особенно интенсивное развитие автоматизированное проектирование получило в радиоэлектронике. Это объясняется следующими основными причинами:

- во-первых, радиоэлектронные системы – достаточно сложные системы с высокой степенью интеграции БИС (больших интегральных схем) и СБИС (сверхбольших ИМС), когда количество компонентов достигает нескольких миллионов на одном кристалле, процесс их проектирования трудоемок.

- во-вторых, высокой экономической эффективностью методов автоматизированного проектирования РЭС, поскольку для них стоимость проектирования составляет значительную долю общих затрат на производство.

Зачастую, проектирование подразумевает учет противоречивых требований по функциональным, эксплуатационным качествам, энергопотреблению, дизайну. Сам процесс разработки должен удовлетворять таким требованиям, как продолжительность, стоимость, привлечение дополнительных инструментальных средств.

Результат проектирования – это либо окончательное описание в виде комплекта конструкторско-технологической документации (чертежи, спецификации, пояснительные записки, схемы, программы для ЭВМ или управляемого технологического оборудования, фотошаблоны, маршрутные карты технологического процесса и др.), либо промежуточное (текстовые документы, эскизы, описания на языке САПР и др.).

1.2 Методы и способы проектирования

Основные методы проектирования:

- декомпозиция (алгоритмическая или объектно-ориентированная),
- абстракция (будучи не в состоянии полностью воссоздать сложные объекты, происходит игнорирование не слишком важных деталей и, таким образом, анализируется обобщенная, идеализированная модель),
- установление иерархии (классификация).

При алгоритмической декомпозиции процесс разделяется на модули, выполняющие один из этапов общего процесса – то, что в программировании называется структурным проектированием «сверху вниз». При объектно-ориентированной декомпозиции сложная система рассматривается как упорядоченная совокупность объектов, которые в процессе взаимодействия друг с другом определяют поведение системы (граф).

Способы проектирования:

- натурное макетирование,
- физическое моделирование,

- математическое моделирование с использованием методов многовариантного проектирования и оптимизации.

Основное достоинство натурального макетирования и физического моделирования - максимальная достоверность результатов, обусловленная работой с реальной схемой, недостатки – дороговизна реализации, длительность изготовления макета, использование ручного труда и др. В настоящее время интенсивно используется и развивается проектирование РЭС с применением математических методов и средств вычислительной техники, комплексной автоматизации проектных работ, что позволило заменить макетирование и физическое моделирование математическим моделированием. Главным средством автоматизации проектирования являются персональные ЭВМ и управляемые ими технические средства.

Автоматизированное проектирование - это научно-техническое направление, которое заключается в применении сочетания достижений вычислительной математики, теории проектирования и средств вычислительной техники к задачам проектирования реальных объектов той или иной физической природы с участием человека.

Автоматическое проектирование - в полном объеме от формулирования ТЗ до получения проектной технической документации без участия человека.

1.3 Уровни проектирования в радиоэлектронике

При проектировании технических систем используется блочно-иерархический подход, при котором представление о проектируемой системе (включая модели, постановки проектных задач и пр.) разделяется на иерархические уровни. Цель – замена малого числа задач чрезмерной сложности большим числом задач допустимой сложности. Уровни различаются степенью детализации представлений об объекте, каждому уровню соответствует свое определение системы и элемента. Части объекта, рассматриваемые как элементы на некотором k -ом уровне, описываются как системы на соседнем, более низком $(k+1)$ уровне. Это декомпозиция объекта по степени детализации.

Выделяются следующие уровни проектирования:

- структурный;
- функциональный;
- конструкторский;
- технологический;
- алгоритмический или тестовый.

Конструкторский уровень определяет геометрические формы объекта и его элементов, их взаимное расположение в пространстве с учетом тепловых, механических, прочностных характеристик проектируемого объекта.

Технологический уровень описывает способы и средства изготовления объекта и его элементов, в частности, с подготовкой программ для станков с числовым программным управлением.

Тестовый уровень состоит в проектировании тестов при производстве и применении БИС, разработке методов входного, пооперационного и входного контроля.

На структурном уровне объект проектирования представляется в виде структурной схемы, т.е. совокупности взаимосвязанных достаточно крупных завершенных блоков. При этом физические каналы связи между блоками могут рассматриваться как отдельные блоки с соответствующими параметрами, а графические связи между блоками на схеме считаются идеальными каналами. Исходными данными при проектировании структурной схемы обычно являются: тип, параметры и характеристики отдельных блоков структуры (надежность, точность, пропускная способность и т.п.); требования к выходным параметрам и характеристикам всей системы (производительность, стоимость, надежность).

Функциональный уровень связан с описанием принципов действия и процессов функционирования объекта. В настоящее время в теории автоматизированного проектирования применительно к радиоэлектронике оформились следующие функциональные уровни проектирования. Эти уровни различаются прежде всего сущностью решаемых задач и вытекающим отсюда различием математических аппаратов и образуют следующую иерархию:

- первый уровень – уровень автоматизированного структурного проектирования (АСтП);
- второй уровень – уровень автоматизированного функционально-логического проектирования (АФЛП);
- третий уровень – уровень автоматизированного схемотехнического проектирования (АСхП);
- четвертый уровень – уровень автоматизированного компонентного проектирования (АКП);
- пятый уровень – уровень автоматизированного конструкторско-технологического проектирования (АКТП).

Так, например, на уровне АСтП проектируется структурная схема РЭС. Обеспечиваются заданные информационные и точностные характеристики, при этом широко применяются теория игр, теория массового обслуживания, математический аппарат численных методов, статистическое моделирование.

На уровне АФЛП обеспечивается выполнение функционального назначения устройств объекта на основе знаний приближенной или идеализированной формы входных и внутренних сигналов. Проектируются функциональные схемы всех устройств, входящих в РЭС, при этом широко используются спектральный анализ, теория цифровых автоматов, логическая математика и численные методы моделирования и преобразования сигналов.

На уровне АСхП проектируются принципиальные электрические схемы узлов и элементов, для чего широко используют теорию электрических цепей с сосредоточенными параметрами наряду с численными методами решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

На уровне АКП разрабатываются новые пассивные и активные отдельные компоненты ИС, рассматриваемые как участки полупроводникового кристалла или дискретные компоненты. Для этого широко применяются методы математической физики и физики твердого тела, а также численные методы решения уравнений в частных производных.

На уровне АКТП занимаются конструкторско-технологическим проектированием; здесь используются математические аппараты теории принятия

решений, направленных графов, а также многокритериальные подходы к конструированию.

1.4 Типы задач проектирования РЭС

Проектирование РЭС заключается в решении задач расчета, анализа, оптимизации и синтеза на каждом из уровней представления объекта.

Расчет – определение выходных параметров и характеристик устройства при неизменных значениях его внутренних параметров и постоянной структуре. Пример: расчет широкополосного усилителя, включая расчет режима по постоянному току, полосу пропускания, площадь усиления и т.п.

Анализ – определение изменения выходных параметров и характеристик устройства в зависимости от изменения его внутренних и входных параметров (задача расчета иногда называется одновариантным анализом, а задача анализа – многовариантным). Например, вариация номиналов пассивных компонентов оценивает их влияние на функциональные выходные характеристики (АЧХ и ФЧХ) усилителя.

Оптимизация – определение наилучших в том или ином смысле значений выходных параметров и характеристик путем целенаправленного изменения внутренних параметров устройства (параметрическая оптимизация) или структуры устройства (структурная оптимизация).

Синтез – получение или генерация исходного варианта устройства, включая его структуру (структурный синтез) и значения внутренних параметров (параметрический синтез). Указанная генерация может выполняться различными способами: выбором из уже известных устройств, построением на основе определенных теоретических соотношений, путем изобретательства, эвристического решения и др. Примеры: двойной RC-мост Вина, схема RC-генератора Сифорова.

Синтез называется оптимальным, если полученное устройство является «наилучшим» в каком-либо смысле.

1.5 Типовая блок-схема процесса проектирования

Процесс проектирования носит итерационный характер, т.к. в большинстве случаев устройство, полученное в результате синтеза, требует доработки, чтобы удовлетворять многочисленным требованиям.

Процесс проектирования сложных систем развивается во времени, проходя несколько стадий. Выделяют стадии технического задания (ТЗ), научно-исследовательских работ (НИР), ТЗ на опытно-конструкторскую работу (ОКР), испытаний и внедрения.

На стадии ТЗ на основании изучения потребностей общества в получении новых изделий, научно – технических достижений в данной и смежных отраслях промышленности, имеющихся ресурсов, определяют назначение, основные принципы построения технического объекта и формулируют ТЗ на его проектирование. Если к началу проектных работ необходимо получение новых научных знаний, то проводят НИР. Они подразделяются на: фундаментальные, в которых открываются неизвестные свойства природы; поисковые, в которых исследуются возможности применения открытых свойств для получения нуж-

ного технического эффекта; прикладные, в которых доказывается принципиальная работоспособность объекта, как правило, с недостаточно высокими характеристиками. Достижение нужного значения выходных параметров – задача стадии ОКР. Стадия НИР может быть пропущена, если для решения задачи проектирования нет необходимости в новой информации исследовательского характера. После проведения НИР проводится уточнение ТЗ и формулируется ТЗ на ОКР. Стадия ОКР проводится в четыре этапа: техническое предложение, эскизный, технический, рабочий проекты. На этапе технического предложения выбирается способ реализации поставленной в ТЗ задачи. На этапе эскизного проекта проверяются корректность и реализуемость решений принятых на предыдущем этапе, и определяющих функционирование будущего объекта. Создается эскизная документация. На этапе технического проекта, выполняется всесторонняя проработка всех частей проекта, конкретизируются и детализируются технические решения. Создается конструкторская документация.

На этапе рабочего проекта формируется вся необходимая документация для изготовления изделия. Далее создается опытный образец или партия изделий. Проводятся испытания, по результатам которых вносятся необходимые коррективы в техническую документацию, после чего осуществляется внедрение в производство. Как показывает мировая практика, 80% всех затрат приходится на стадию внедрения, 16% – на стадию ОКР, а 4% – на стадию НИР.

На рисунке 1 представлена типовая схема отдельного этапа проектирования:

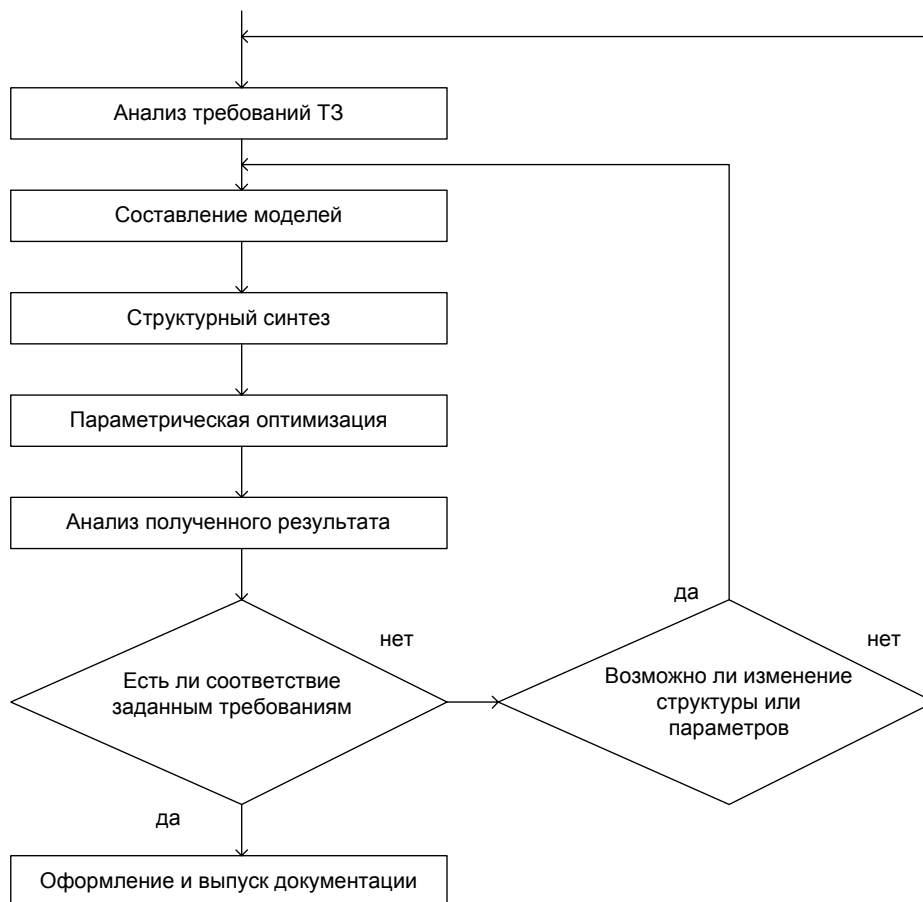


Рисунок 1 – Типовая схема отдельного этапа проектирования

Методика решения задач проектирования состоит в следующем. Теоретически можно различить два основных типа процессов проектирования:

«сверху вниз» (от сложного к простому) и «снизу вверх» (от простого к сложному). Сложные РЭС (системы, устройства) проектируются «сверху вниз», а относительно простые (элементы, узлы) – «снизу вверх». При нисходящем проектировании (проектирование «сверху вниз») решение задач проектирования верхних уровней предшествует решению задач проектирования нижних. Эта методика используется для функционального аспекта проектирования РЭС. Восходящее проектирование предусматривает обратную последовательность решения задач – снизу-вверх. Такое проектирование характерно для конструкторского аспекта или при проектировании РЭС со встроенными специализированными БИС, требующими разработки. Практически процесс проектирования сочетает оба способа на различных этапах. Комплекс декомпозируется на устройства, те, в свою очередь, на узлы, а после проектирования узлов начинается обратный процесс: «сборка» узлов в устройство, а устройств – в комплекс.

Основные принципы проектирования:

- разбиение на простые задачи,
- чередование процедур синтеза и анализа,
- проведение проектирования в виде итерационного процесса,
- усиление тщательности анализа по мере приближения к окончательному проектному решению.

1.6 Основные этапы проектирования РЭС

Основные этапы проектирования РЭС представлены на рисунке 2.

На первом этапе (1) сложное проектируемое устройство разбивается на функционально законченные блоки и вырабатываются частные технические задания (ТЗ) на каждый отдельный блок. ТЗ предусматривает описание внешних и внутренних параметров: входных и выходных сигналов, диапазона частот, потребляемой мощности, условий эксплуатации, предельных допусков на основные характеристики и т.п. На этом этапе очень многое зависит от личности разработчика-конструктора: от его знаний, интуиции, интеллекта и кругозора.

На втором этапе (2) после формулировки ТЗ на разрабатываемый блок составляется его принципиальная электрическая схема начального (нулевого) приближения. Это обычно делается разработчиком также на основании собственного опыта и опыта предыдущих разработок. Здесь же выбираются компоненты схем: транзисторы, диоды, ИМС, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др., а также номинальные значения и допуски на параметры компонентов.

Далее на третьем этапе (3) выбирается система автоматизированного схемотехнического проектирования (моделирования), а в ней программа, которая наилучшим образом подходит для анализа данной электронной схемы и позволит судить о соответствии ТЗ выбранной схеме. Подчас в выбранном пакете требуется не одна, а группа программ для проведения всех необходимых вычислений. Например, анализ по постоянному току, анализ во временной и частотной области. Затем принципиальная схема проектируемого блока подготавливается для проведения компьютерного анализа и вводится в память ПЭВМ текстовым или графическим способом (этап 4).

Далее на основании встроенной библиотеки моделей компонентов автоматически составляется математическая модель анализируемого устройства по введенной принципиальной схеме (этап 5).

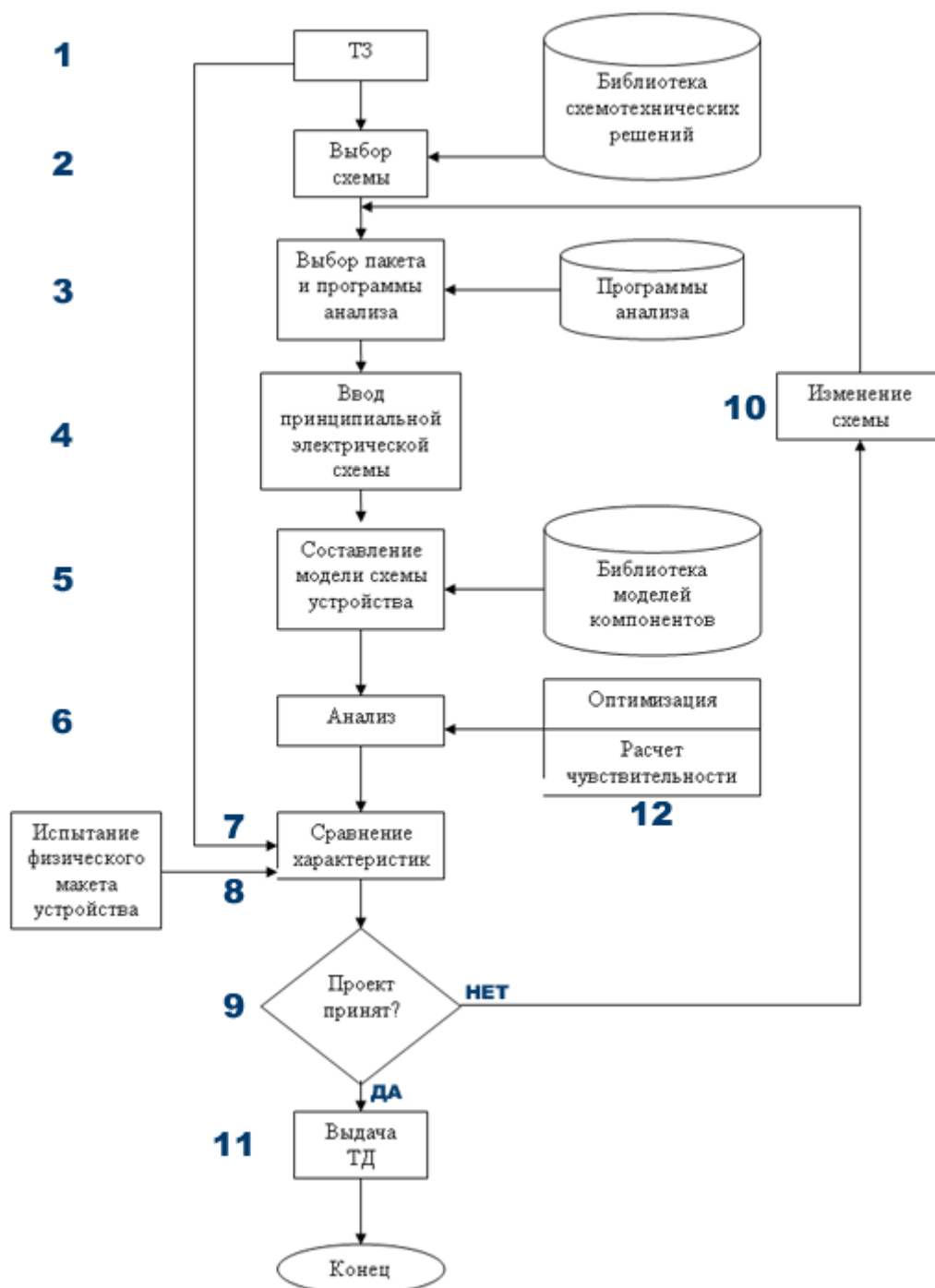


Рисунок 2 - Основные этапы автоматизированного проектирования электронных схем

На этапе 6 производится анализ математической модели электронной схемы в диалоговом режиме. Например, в случае анализа схемы аналогового устройства предполагается выполнение следующих видов расчетов:

- расчет схемы по постоянному току;
- расчет схемы в частотной области; например, вычисление АЧХ и ФЧХ, спектральной плотности шума;
- расчет во временной области; например, определение переходных и импульсных характеристик, проведение спектрального анализа.

Полученные в результате анализа характеристики схемы сравниваются с данными ТЗ и (или) с результатами испытаний макета (этапы 7 и 8).

На основании этого сравнения принимается решение о принятии или отклонении рассмотренного варианта проекта (этап 9). После принятия проекта составляется техническая документация для последующего изготовления разработанного устройства и проведения испытаний (этап 11).

Если характеристики неудовлетворительны, то принципиальная схема и (или) модели компонентов должны быть изменены (этап 10).

Цикл анализа затем повторяется снова. Именно здесь, при проведении многовариантных расчетов, компьютерные программы анализа электронных схем особенно полезны: они дают возможность автоматически в течение короткого времени провести анализ многих вариантов. Модификация схемы может производиться также с помощью специальных программ оптимизации на ПЭВМ (этап 12). По окончании оптимизации можно рассчитать чувствительность схемы, оценить влияние разброса параметров компонентов и получить другие важные характеристики.

Что касается задачи синтеза, то это весьма сложная задача, ее можно жестко алгоритмизировать только для некоторых частных случаев, например, для синтеза пассивных и активных аналоговых и цифровых частотных фильтров. В других случаях обычно задача синтеза решается эвристическим путем, основываясь на предыдущем опыте.

Отметим, что автоматизированное проектирование электронных схем с помощью ПЭВМ имеет ряд преимуществ перед традиционным способом проектирования «вручную» с последующей доводкой на физическом макете. Разработчик может использовать возможности ПЭВМ в нескольких областях. Во-первых, с помощью прикладных программ гораздо легче наблюдать эффект варьирования параметров схемы, чем с помощью сугубо экспериментальных исследований. Во-вторых, имеется возможность анализировать критические режимы работы устройства без физического разрушения его компонентов. В-третьих, программы анализа позволяют оценить работу схемы при наихудшем сочетании параметров, что трудно и не всегда возможно осуществить экспериментально. В-четвертых, программы дают возможность провести такие измерения на модели электронной схемы, которые трудно выполнить экспериментально в лаборатории.

1.7 Понятие технологичности процесса проектирования

Процесс проектирования технологичен, если он обеспечивает требуемое качество и стоимость проектирования, время разработки, а также удобство, экономичность, адекватность разработки требуемому уровню развития технологий проектирования. Сложные системы обычно создаются на основе устойчивых промежуточных форм. Эта тенденция хорошо просматривается в проектировании современных ПК, когда параллельно ведется совершенствование устоявшихся моделей изделий и разработка и апробация новых архитектурных решений (Pentium 3 и 4). Другой пример – использование Пентагоном в настоящее время “устаревшего” языка ADA для создания ПО космических систем, самонаводящихся ракет и т.д.

1.8 Программные средства функционального проектирования РЭС

Основные программные средства функционального проектирования РЭС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Уровень проектирования	Задачи	САПР, ППП, среды, программы
Функциональный	Функциональное моделирование РЭУ (системы радиоавтоматики и другие радиотехнические устройства)	SystemView (Elanix), Simulink , Signal Processing (MatLab),
	Функциональное и логическое моделирование цифровых схем	VHDL (язык описания аппаратуры), OrCad
	Моделирование систем сбора и обработки данных	LabView , LabWindows (NI)
	Проектирование устройств цифровой обработки сигналов, в том числе проектирование цифровых фильтров	DSPworks , SigLab , SystemView , SPW/HDS Monarch , QEDesign 1000+
	Проектирование схем на основе ПЛИС и микроконтроллеров	Max+Plus (Altera) WebFITTER (Xilinx) Easy Analog Design Software (Motorola), Nexar , MPLab , PROTEUS , TASKING (программирование контроллеров)
Схемотехнический	Схемотехническое моделирование аналоговых и аналого-цифровых устройств, в т. ч. проектирование аналоговых фильтров	Pspice→ Design Lab 8.0, → OrCad 9.0 Electronics WorkBench , APLAC 7.0 , MicroCap Dr. Spice (ф. Deutch Research) CircuitStudio (для PROTEL) OrCad 9.0
	Проектирование аналоговых программируемых БИС	Pac Designer (Lattice Semiconductors) AnadigmDesigner (беспл.)
Компонентный	Проектирование устройств СВЧ	MicroWave Office (AWR) , Analog Office , Visual System Simulator , APLAC , SuperNEC

2 Математические основы компьютерного моделирования компонентов РЭС

2.1 Математические модели и их характеристики

Моделирование это замещение исследуемой системы её условным образом (моделью), с целью последующего изучения свойств системы посредством исследования свойств ее модели.

Модель – упрощенное представление реального явления или объекта. Различают физические и математические модели.

Математическая модель технического объекта – совокупность математических объектов (чисел, переменных, множеств, графов, матриц и др.) и отношений между ними, адекватно отражающих некоторые свойства объекта с требуемой степенью точности.

Математическую модель (ММ) можно рассматривать как некоторый оператор, ставящий в соответствие системе внутренних параметров объекта x_1, \dots, x_n , внутрисистемных параметров $z_1 \dots z_i$, управляющих параметров $u_1 \dots u_j$ совокупность функционально связанных между собой внешних параметров y_1, \dots, y_m (рисунок 3).

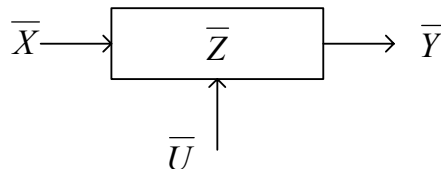


Рисунок 3 – Объект моделирования

Математическое моделирование – анализ объекта, представленного математической моделью.

Примерами ММ могут быть уравнения вольт - амперных характеристик или дифференциальные уравнения переходных процессов в компоненте.

Пример. Математической моделью полупроводникового диода можно считать уравнение его вольт-амперной характеристики:

$$i = I_0 \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right) = q \frac{SD_p p_0}{L_p} \left(e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где I_0 — тепловой ток; φ_T — температурный потенциал; q — заряд электрона; S — площадь $p-n$ перехода; D_p — коэффициент диффузии дырок; p_0 — равновесная концентрация дырок; L_p — диффузионная длина дырок в базе диода.

В данном случае внешними параметрами модели являются ток i и напряжение u , а внутренними можно считать либо электрический параметр I_0 , либо геометрические и электрофизические параметры диода S , p_0 , L_p и др.

Математические модели могут быть представлены:

- действительными или комплексными величинами;
- векторами, матрицами;
- геометрическими образами;
- неравенствами, функциями, функционалами;
- множествами;

- алгебраическими, разностными, дифференциальными и интегральными уравнениями;

- функциями распределения вероятности, статистиками.

Если математическая модель реализована на ЭВМ, то моделирование называется машинным или компьютерным.

Пример. Физическая модель колебательного контура может быть представлена в виде принципиальной схемы (рисунок 4), элементами которой являются резистор с сопротивлением R , катушка индуктивности с индуктивностью L и конденсатор емкостью C .

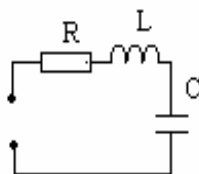


Рисунок 4 – Схема колебательного контура

Математическая модель процесса $g(t)$ накопления конденсатором заряда, протекающего в электрической цепи под воздействием электродвижущей силы $E(t)$, представляется обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$a_1 \frac{\partial^2 z(t)}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial z(t)}{\partial t} + a_0 z(t) = f(t).$$

Для колебательного контура: $z(t)=g(t)$, $f(t)=E(t)$, $a_1=R$, $a_2=L$, $a_0=1/C$.

Одно из основных требований к внутренним параметрам модели — возможность их измерения, прямого или косвенного. В противном случае ценность модели существенно падает, поскольку требования к внутренним параметрам, полученные в результате анализа и оптимизации схемы, не возможно реализовать.

2.2 Виды математического моделирования

В инженерной практике используются два вида математического моделирования: аналитическое и имитационное.

При аналитическом моделировании модель системы или ее элементов имеет вид функциональных зависимостей между входными, выходными и параметрами состояния системы. Это могут быть математические или логические функции, а модели могут иметь вид алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений или логических условий.

Исследования поведения системы или ее элементов по аналитическим моделям состоит в решении аналитически, либо численными методами соответствующих уравнений и интерпретации полученных результатов.

Последовательность действий при аналитическом моделировании:

1) теоретическое исследование характеристик объекта (надежности, производительности, точности и др.);

2) вывод расчетных формул, уравнений или алгоритмов и реализация их на ЭВМ.

Основные способы реализации аналитического моделирования при проектировании РЭС:

1. Программирование: получение ММ в виде системы уравнений → выбор или разработка численного метода (дискретизация) → разработка алгоритма → составление программы (Pascal, Delphi).

2. С помощью математических программ: получение ММ в виде системы уравнений → решение с помощью универсальных математических программ и сред → инженерная интерпретация полученных результатов (MathCAD, MatLab, Mathematics).

3. В среде схемотехнического моделирования: разработка принципиальной или функциональной схемы → описание схемы и заданий на моделирование на входном языке системы моделирования (графическое или текстовое). Получение и решение ММ реализует сама среда! (Electronics WorkBench, OrCAD).

Имитационное моделирование используется для анализа сложных систем на уровне структурных и функциональных схем аналоговых устройств и для моделирования цифровых устройств (Simulink, MatLab, LabView, SystemView, MicroLogic, языки VHDL, GPSS). Процесс функционирования исследуемого объекта воспроизводится на ЭВМ в отсутствие аналитических зависимостей между входными, выходными параметрами и параметрами состояния системы, при этом сохраняется логическая структура системы и последовательность протекания процессов во времени. По результатам имитационного моделирования на ЭВМ можно прогнозировать поведение исследуемой системы.

Последовательность действий:

- 1) построение модели проектируемого устройства;
- 2) реализация модели на ЭВМ;
- 3) расчет характеристик объекта проектирования на основе результатов моделирования.

2.3 Классификация математических моделей РЭС

1 По характеру зависимостей:

1.1 Линейные, нелинейные. Линейные модели основаны на использовании только линейных зависимостей между токами и напряжениями в случае аналитического представления только линейных пассивных элементов и идеальных генераторов тока и напряжения в случае представления в виде схем замещения. Нелинейные модели обязательно включают в себя элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Для проверки моделей на линейность используют принцип суперпозиции, например:

$$y^2 = (y_1 + y_2)^2 \neq y_1^2 + y_2^2 - \text{нелинейная ММ};$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial x} = \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial U_2}{\partial x} - \text{линейная ММ}.$$

Линейные модели описываются линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными или разностными).

1.2 Статические – динамические.

Если среди независимых переменных модели есть время, то модель является динамической, иначе - статической.

1.3 Стационарные – нестационарные.

Стационарная – модель с неизменными во времени параметрами, нестационарная – с переменными.

1.4 Модели со сосредоточенными параметрами и с распределенными параметрами.

Модель с распределенными параметрами – ММ, в которой учитывается пространственная зависимость ее параметров. Такие модели описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

1.5 Детерминированные и стохастические модели.

Детерминированная – модель, состояние которой можно определить в любой момент времени; для стохастической известно лишь множество возможных состояний.

1.6 Непрерывные и дискретные модели.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 2, & x > 6 \\ 3, & x > 20 \end{cases} \quad \text{- дискретная ММ;}$$

$f(x) = \sin x$ – непрерывная ММ.

2 По характеру отражаемых свойств:

- функциональные – отражают свойства, связанные с процессом функционирования объекта,
- технологические – с процессами изготовления,
- структурные – отражают чаще всего геометрические свойства.

3 По способу получения модели:

- теоретические – полученные на основе изучения физических закономерностей функционирования объекта,
- эмпирические – на основе изучения внешних проявлений объекта.

4 По способу представления:

- аналитические – представленные в формульном виде,
- алгоритмические – в виде реализации численного метода,
- топологические (в виде графов),
- табличные (таблицы и матрицы),
- схемы замещения,
- описание на входном языке САПР.

Схемы замещения сложных компонентов схем строятся из базовых элементов. В зависимости от цели моделирования для одного объекта может быть построено несколько моделей. Так, работа схемы в режиме по постоянному току описывается системой нелинейных уравнений, работа той же схемы в динамике – системой интегро-дифференциальных уравнений. Для транзистора (рисунков 5), операционного усилителя существует несколько моделей, представленных разными схемами замещения.

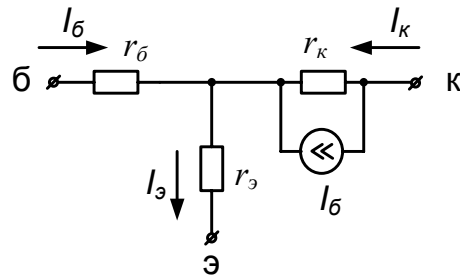


Рисунок 5 – Т-образная схема замещения транзистора

В схемотехническом моделировании базовыми считаются двухполюсники R , C , L , управляемые и неуправляемые источники токов и напряжений. Простейшая модель операционного усилителя может быть построена в виде управляемого источника напряжения с заданным коэффициентом усиления (рисунки 6 - 9).

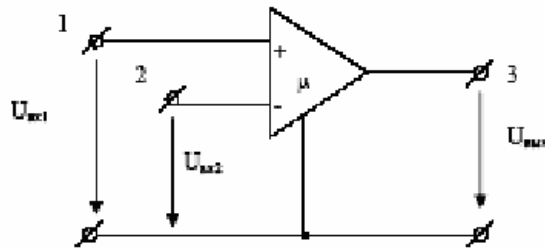


Рисунок 6 – Схема операционного усилителя

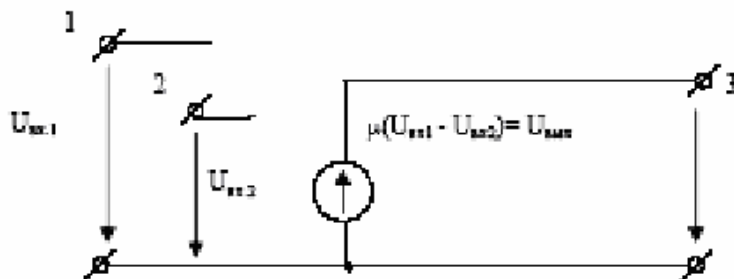


Рисунок 7 – Схема замещения операционного усилителя

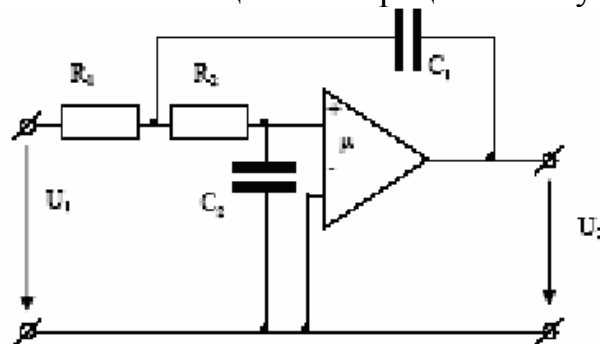


Рисунок 8 – Схема цепи с операционным усилителем

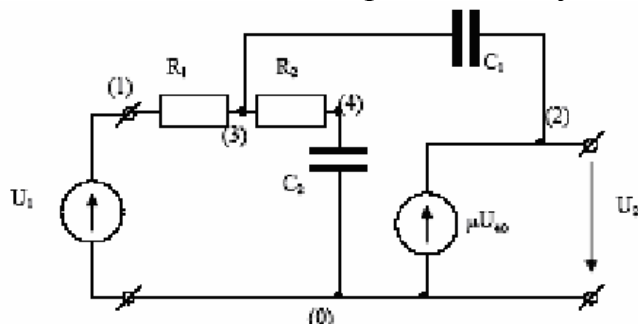


Рисунок 9 – Схема цепи со схемой замещения операционного усилителя

При компьютерном моделировании и проектировании часто используют смешанные формы представления: так, модель диода можно задать аналитически в виде уравнения вольт-амперной характеристики и графически в виде схемы замещения или графика вольт-амперной характеристики. Табличное задание используется лишь в тех случаях, когда компонент описывается сложной экспериментальной зависимостью, для которой трудно найти удобное и точное аналитическое выражение или схему замещения.

5 По уровню проектирования и типу решаемых уравнений:

Каждому аспекту и уровню абстрагирования соответствуют свои модели, различающиеся принадлежностью к используемому математическому аппарату.

Таблица 2

Аспект или уровень абстрагирования	Объекты проектирования	Математические модели устройств, схем	Математические модели компонентов
Системный	Вычислительные системы, радиотехнические системы	Имитационные модели массового обслуживания	
Функционально-логический	Устройства и блоки цифровой аппаратуры	Системы логических уравнений, программы.	Логические уравнения
	Устройства и блоки аналоговой аппаратуры	Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы интегродифференциальных уравнений	Алгебраические уравнения, интегродифференциальные уравнения
Схемотехнический	Радиоэлектронные схемы	Системы ОДУ, системы интегродифференциальных уравнений	Алгебраические уравнения, системы уравнений
Компонентный	Элементы ИМС в процессе их функционирования и изготовления, полупроводниковые структуры и компоненты	Уравнения математической физики (ДУ в частных производных)	Уравнения в частных производных
Конструкторский	Печатные платы	Графы, таблицы, матрицы, регрессионные уравнения	Графы, матрицы

6 По диапазону рабочих сигналов различают модели для малого сигнала (малосигнальные) и для большого сигнала. Обычно малосигнальные модели — линейные, поскольку они получаются при рассмотрении малых отклонений то-

ков и напряжений от стационарной рабочей точки, так что нелинейностью характеристик можно пренебречь. Модели большого сигнала, как правило, нелинейны.

7 По диапазону рабочих частот различают низкочастотные модели, в которых инерционность модели на высоких частотах не учитывается, и высокочастотные модели, в которых она учтена либо дифференциальным уравнением, описывающим переходный процесс внутри компонента, либо дополнительными внешними емкостями.

8 По уровню проработки:

- исходное уравнение $F(x)=0$,

- теоретический алгоритм. Если это нелинейное уравнение, то его решение может быть выполнено с помощью метода Ньютона, тогда теоретический алгоритм будет представлен итерационным алгоритмом реализации формулы $F'(x^{(k)})\Delta x^{(k)} = -F(x^{(k)})$, или алгоритмом, соответствующим методу простых итераций $x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda F(x^{(k)})$,

- машинный алгоритм, учитывает все реальные особенности численной реализации – ограниченная точность вычислений (должен быть предусмотрен критерий остановки вычислений по достижении ε ($\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| < \varepsilon$), остановку вычислений при несходимости и др.).

2.4 Методы построения моделей компонентов. Оценка точности соответствия модели реальному компоненту

Как правило, в САПР обращение к модели заключается в перечислении численных значений параметров. Параметры – коэффициенты уравнений, описывающих тот или иной компонент. Модель радиоэлектронного компонента должна быть построена таким образом, чтобы параметрам модели соответствовали реальные измеряемые характеристики моделируемого объекта. Такие характеристики обычно представлены в справочниках или в фирменных описаниях, поставляемых с изделиями.

Общая методика получения ММ компонентов:

1. Устанавливаются свойства моделируемого объекта, подлежащие отображению в модели. При этом определяются смысл и перечень выходных и входных параметров.

2. Выбирается структура модели (система математических соотношений модели в параметрическом виде, с неопределенными численными значениями параметров), часто в виде схем. Схемы должны быть такими, чтобы им однозначно соответствовало математическое описание.

3. Решается задача идентификации, то есть рассчитываются численные значения параметров модели для заданной структуры модели.

4. Определяются погрешности модели в выбранных тестовых задачах. Если условия в тестовых испытаниях не выполняются, переходят к п. 2.

5. Решается задача отыскания допустимых диапазонов изменений внешних параметров, в пределах которых модель адекватна объекту.

Для оценки точности соответствия модели реальному компоненту наиболее часто используются следующие характеристики:

1 Максимальное относительное отклонение в рабочем диапазоне:

$$\delta_i = \frac{|i_m - i_k|_{\text{макс}}}{i_k}, \quad \delta_u = \frac{|u_m - u_k|_{\text{макс}}}{u_k},$$

где i_m , u_m , i_k , u_k — соответственно токи и напряжения вольт-амперных характеристик модели и компонента.

2 Среднеквадратическое относительное отклонение в рабочем диапазоне:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{i_{m_j} - i_{k_j}}{i_{k_j}} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\delta_{i_j})^2}{n}},$$
$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{u_{m_j} - u_{k_j}}{u_{k_j}} \right)^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\delta_{u_j})^2}{n}},$$

где n — число точек измерения.

Данная характеристика точности усредняет отдельные «выбросы» ошибок и характеризует расхождение модели и компонента не в одной точке, а в некотором диапазоне.

3 Схемотехническое моделирование аналоговых устройств

3.1 Общие сведения о схемотехническом моделировании (СхМ)

Под схемотехническим моделированием понимают моделирование электрических процессов в электронных устройствах, изображаемых в виде принципиальных электрических схем.

Цель СхМ состоит обычно в определении формы и параметров сигналов тока и напряжения, возникающих в разных точках схемы.

Схемотехническое моделирование учитывает, в отличие от информационного, реальные физические ограничения в электрических процессах – так называемые законы сохранения. Это первый и второй законы Кирхгофа.

СхМ соответствуют электрические модели, которые включают либо системы 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 которой можно в ЭВМ получить систему уравнений, связывающих напряжения и токи в модели объекта.

Математическая модель в СхМ в общем случае состоит из двух подсистем:

- 1) Компонентные уравнения - модели отдельных элементов (зависимости тока и напряжения),
- 2) Топологические - уравнения электрического равновесия на основе 1 и 2 законов Кирхгофа.

Основными задачами СхМ являются расчет статического режима, переходных процессов, частотных характеристик.

На основе решения этих задач вычисляют:

- параметры сигналов (фронт, длительность, задержку и др.),
- спектр выходного сигнала,
- чувствительность схемы к изменению параметров ее элементов,
- проводят статистический анализ схемы и оптимизацию ее параметров.

3.2 Моделирование статического режима

Моделирование статического режима электронной схемы основывается на определении фиксированных, постоянных значений токов и напряжений. Такой режим характеризуется отсутствием переходных процессов. Он включает в себя определение узловых напряжений в схеме при заданных параметрах источников постоянного тока и требует решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Анализ работы такой цепи требует предварительного составления некоторой модели - схемы замещения. В схеме замещения элементы реальной цепи заменяются своими моделями.

Математическая модель цепи представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, решая которую с помощью того или иного численного метода, можно найти значения токов и напряжений на резистивных элементах схемы.

Исходная модель схемы:

$$\sum i = 0; \sum u = 0 \quad (*);$$

$$I = F(U) \text{ или } U = F_1(I),$$

где (*) – системы уравнений Кирхгофа, I , U – векторы рассчитываемых напряжений и токов ветвей.

По типу электрических величин, выбираемых в качестве независимых переменных, можно выделить следующие методы расчета статического режима схем:

- 1) токов и напряжений ветвей,
- 2) токов ветвей,
- 3) напряжений ветвей,
- 4) узловых потенциалов,
- 5) контурных токов.

С целью понижения порядка ММ рекомендуется использовать 4 и 5 методы.

Пример. Составить математическую модель схемы, представленную на рисунке 10.

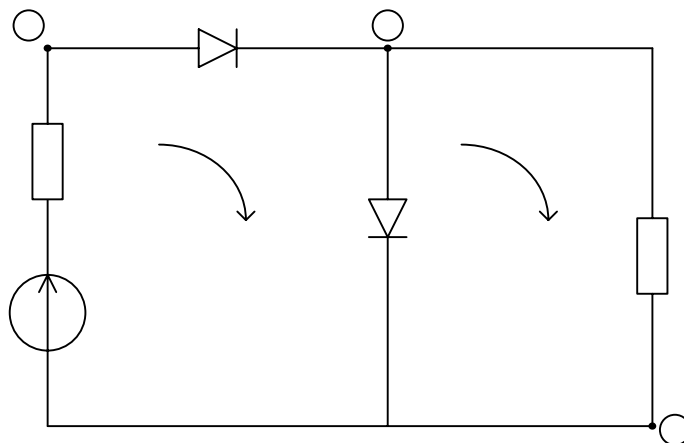


Рисунок 10

Учитывая, что ток течет от точки большего потенциала к точке меньшего и в соответствии с направлением токов, примем $u_1 = \varphi_1 - \varphi_2$, $u_2 = \varphi_2$, потенциал точки 3 принят равным нулю.

Метод использует систему уравнений, составленную по первому закону Кирхгофа. Число уравнений на единицу меньше числа узлов. В качестве неизвестных выступают узловые потенциалы (узловые напряжения), взятые относительно одного из узлов, принятый равным нулю. В результате решения системы уравнений находим эти узловые потенциалы.

$$1) \frac{E - \varphi_1}{R_1} - I_{01} \left(\exp\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}\right) - 1 \right) = 0, \quad 1$$

$$2) I_{01} \left(\exp\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}\right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp\left(\frac{\varphi_2}{\varphi_T}\right) - 1 \right) - \frac{\varphi_2}{R_2} = 0.$$

Основные численные методы расчета ММ в статическом режиме

Полученные выше уравнения представляют собой систему нелинейных уравнений.

VD1

R1

I1

$$\left. \begin{array}{l} F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \text{или в векторной форме: } F(x) = 0,$$

где x – вектор с n компонентами, F – вещественная вектор-функция с n компонентами.

Для решения систем нелинейных уравнений на ЭВМ используются методы, в основе которых лежит принцип последовательных приближений (итераций), когда решение многократно уточняется, пока не достигнет требуемой точности.

Основными характеристиками численных методов решения систем конечных нелинейных уравнений являются скорость сходимости и область сходимости, определяемая условиями сходимости. Скорость сходимости оценивается обычно по изменению расстояния до точки решения в двух последовательных итерациях.

Для решения системы $F(x) = 0$ можно использовать метод простых итераций:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda F(x^{(k)}),$$

где k – номер итерации, λ – множитель, регулирующий сходимость.

В общем случае этот метод не гарантирует сходимости, однако при расчете большинства аperiodических негенераторных схем при малых λ алгоритм будет сходиться. Главный недостаток этого метода – медленная сходимость, поэтому для решения системы $F(x) = 0$ используется метод Ньютона:

$$F'(x^k) \cdot \Delta x^k = -F(x^k) \quad (GxU=I),$$

где $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$ – вектор неизвестных на k и $k+1$ итерации,

$F'(x^k)$ – матрица Якоби, элементами которой являются производные

$$\frac{\partial F_i}{\partial x^k},$$

$F(x^k)$ – вектор поправок,

Необходимо решить эту систему, т.е. найти вектор $\bar{X} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$, удовлетворяющий систему с точностью ε .

Геометрическая сущность метода Ньютона состоит в том, что на каждом цикле итерации кривая $f(x)$ заменяется прямой линией, касательной к $f(x)$ в точке x^k , где k — номер приближения (рисунок 11).

1. Выберем произвольную точку x_0 на оси x и заданную погрешность решения ε .

2. Проведем касательную к функции $F(x)$ в точке $(x_0, F(x_0))$.

Определим точку, в которой касательная пересекает линию $y=0$.

Обозначим эту точку x_1 .

3. Вычислим значение функции $F(x)$ в точке x_1 . Если $|F(x_1)| > \varepsilon$

или $|x_0 - x_1| > \varepsilon$, тогда в качестве новой точки x_0 выберем x_1 (т.е. $x_0 = x_1$)

и перейдем к пункту 2.

4. Итерационный процесс заканчивается, когда выполняется одно из условий: $\|\Delta x_i\| \leq \varepsilon_1$, $\|F(x_n)\| \leq \varepsilon_2$.

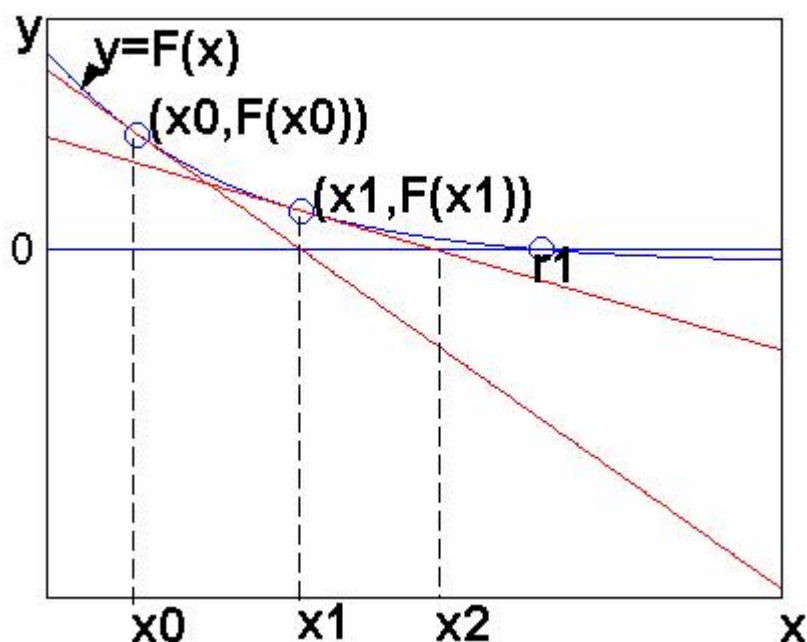


Рисунок 11

Для оценки скорости сходимости метода Ньютона производится разложение $F(x)$ в ряд Тейлора с точностью до квадратичного члена. Таким образом, ошибка каждого последующего приближения уменьшается пропорционально квадрату ошибки предыдущего приближения. Поэтому говорят, что метод Ньютона сходится квадратично.

Таким образом, применение метода Ньютона выливается к выполнению следующих операторов:

- выбирается начальное приближение $x = x_0$;
- вычисляется матрица Якоби \mathbf{Y} в точке x_0 ;
- решается система линейных алгебраических уравнений и затем вычисляется вектор поправок.
- проверяется условия прекращения итерационного процесса: $\|\Delta \mathbf{x}\| < \varepsilon$, где ε – заданная погрешность решения.

У метода Ньютона большая скорость сходимости, но по сравнению с методом простых итераций малая область сходимости.

3.3 Моделирование статического режима при формировании ММ в базисе узловых потенциалов

В большинстве программ для компьютерного моделирования и проектирования РЭС для СхМ используется базис узловых потенциалов φ , в котором исходная модель-уравнение, соответствующая уравнению $F(x) = 0$, имеет вид $I(\varphi) = 0$, где $I(\varphi)$ – вектор узловых токов.

Модель схемы формируется в виде, соответствующем решению методом Ньютона: $Y(\varphi^k)\Delta\varphi^k = -I(\varphi^k)$, где $Y = \left[\frac{\partial I}{\partial \varphi} \right]$ – матрица узловых проводимостей,

$\Delta\varphi^k = \varphi^{k+1} - \varphi^k$ – вектор поправок.

Разложим функцию $I(\varphi)$ в ряд Тейлора, удерживая в нем члены, содержащие первые производные не выше первого порядка:

$$\sum_{j=1}^n I_1^{(k)} + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n I_1^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} \cdot \Delta\varphi_1^{(k+1)} + \dots + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n I_1^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \cdot \Delta\varphi_n^{(k+1)} = 0,$$

$$\sum_{j=2}^n I_2^{(k)} + \frac{\partial \left(\sum_{j=2}^n I_2^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} \cdot \Delta\varphi_1^{(k+1)} + \dots + \frac{\partial \left(\sum_{j=2}^n I_2^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \cdot \Delta\varphi_n^{(k+1)} = 0,$$

.....

$$\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} + \frac{\partial \left(\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} \cdot \Delta\varphi_1^{(k+1)} + \dots + \frac{\partial \left(\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \cdot \Delta\varphi_n^{(k+1)} = 0,$$

где $I = I(\varphi_1^k, \varphi_2^k, \varphi_n^k)$ – ток ветви, $j = 1, 2, \dots, n$ – номер узла, $\sum_{j=n}^n I_n^{(k)}$ – узловой ток

узла n (алгебраическая сумма токов ветвей), $\frac{\partial \left(\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n}$ – собственная (при $j = n$)

или взаимная (при $j \neq n$) узловая проводимость.

Матрица узловых проводимостей * вектор поправок = - вектор узловых токов.

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n I_1^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} & \dots & \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^n I_1^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \\ \frac{\partial \left(\sum_{j=2}^n I_2^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} & \dots & \frac{\partial \left(\sum_{j=2}^n I_2^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \left(\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \right)}{\partial \varphi_1} & \dots & \frac{\partial \left(\sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \right)}{\partial \varphi_n} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta\varphi_1^{(k+1)} \\ \Delta\varphi_2^{(k+1)} \\ \dots \\ \Delta\varphi_n^{(k+1)} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \sum_{j=1}^n I_1^{(k)} \\ \sum_{j=2}^n I_2^{(k)} \\ \dots \\ \sum_{j=n}^n I_n^{(k)} \end{vmatrix}.$$

Чтобы решить систему нелинейных уравнений, необходимо сформировать векторы узловых токов и матрицы узловых проводимостей, причем и то, и другое формируется при каждой итерации k . Их методика формирования заключается в последовательном рассмотрении каждого элемента схемы и определении его вклада в соответствующий вектор и матрицу. Далее необходимо рассчитать матрицу Якоби. Каждая строка матрицы получается дифференцированием соответствующих уравнений $I(\varphi_1^k, \varphi_2^k, \varphi_n^k)$ по переменным $\varphi_1^k, \varphi_2^k, \varphi_n^k$. В результате получим матрицу дифференциальных проводимостей. Она имеет такую же форму, что и узловая матрица проводимостей. Линейные проводимости в этой матрице остаются неизменными, а на месте нелинейных проводимостей появляются производные от токов по соответствующим напряжениям. Эти производные могут быть рассчитаны при напряжениях, полученных в предыдущей итерации. При формировании матрицы Якоби проводимость каждого двухполюсника должна записываться в качестве слагаемого со знаком «+» на диагональных элементах и со знаком «-» в составе взаимных проводимостей.

При использовании метода Ньютона большое значение имеет выбор начального приближения решения. Неправильный выбор начального приближения, особенно при наличии в схеме диодов, усложняет получение правильного результата. Во многих случаях определение начальных условий может быть проведено на основе практического опыта.

Пример. Составить матрицу дифференциальных проводимостей для схемы, представленной на рисунке 12.

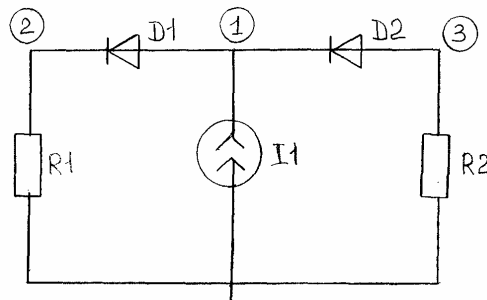


Рисунок 12

Токи диодов VD1 и VD 2

$$I_{VD1} = I_{0VD1} \cdot \left[e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} - 1 \right],$$

$$I_{VD2} = I_{0VD2} \cdot \left[e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} - 1 \right].$$

По закону Кирхгофа для токов получим систему уравнений

$$I_{VD1} - I_{VD2} - I_1 = 0,$$

$$G_1 \varphi_2 - I_{VD1} = 0,$$

$$G_2 \varphi_3 + I_{VD2} = 0.$$

Подставив значения токов диодов, получим

$$\begin{aligned}
I_{0VD1} \cdot \begin{bmatrix} e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} & -1 \end{bmatrix} - I_{0VD2} \cdot \begin{bmatrix} e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} & -1 \end{bmatrix} - I_1 &= 0, \\
G_1 \varphi_2 - I_{0VD1} \cdot \begin{bmatrix} e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} & -1 \end{bmatrix} &= 0, \\
G_2 \varphi_3 + I_{0VD2} \cdot \begin{bmatrix} e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} & -1 \end{bmatrix} &= 0.
\end{aligned}$$

Определим матрицу дифференциальных проводимостей. Получим частные производные по φ_1 , φ_2 и φ_3

$$\begin{vmatrix}
\frac{I_{0VD1}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} + \frac{I_{0VD2}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} & -\frac{I_{0VD1}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} & -\frac{I_{0VD2}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} \\
-\frac{I_{0VD1}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} & G_1 + \frac{I_{0VD1}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} & 0 \\
-\frac{I_{0VD2}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} & 0 & G_2 + \frac{I_{0VD2}}{\varphi_T} \cdot e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}}
\end{vmatrix}.$$

Заметим, что

$$\left. \begin{aligned}
\frac{I_{0VD1}}{\varphi_T} e^{\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_T}} &= g_{VD1} \\
\frac{I_{0VD2}}{\varphi_T} e^{\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_T}} &= g_{VD2}
\end{aligned} \right\} \text{дифференциальные проводимости диодов.}$$

Тогда, окончательно, матрица Якоби имеет вид

$$\begin{vmatrix}
g_{VD1} + g_{VD2} & -g_{VD1} & -g_{VD2} \\
-g_{VD1} & G_1 + g_{VD2} & 0 \\
-g_{VD2} & 0 & G_2 + g_{VD2}
\end{vmatrix}.$$

В полученной матрице по диагонали стоят узловые проводимости, в результате расчета матрицы и решения системы уравнений, получаем значения узловых напряжений. Далее на основании закона Ома определяются токи ветвей.

3.4 Моделирование переходных процессов. Формы моделей

Изменение топологии цепи или параметров входящих в неё элементов (подключение или отключение ветвей, изменение параметров источников энергии или пассивных элементов) нарушает периодический характер изменения токов и напряжений, то есть приводит к тому, что режим работы цепи становится неустановившимся. Неустановившиеся процессы при переходе от одного установившегося режима к другому, называются переходными процессами. Начало отсчета времени переходного процесса обычно совмещается с момен-

том коммутации. Переходной характеристикой цепи называется отклик цепи на воздействие в виде единичной ступени при нулевых начальных условиях.

Анализ переходных процессов или в общем случае анализ нелинейной инерционной электронной схемы во временной области включает в себя составление ММ и её численное решение. При составлении такой системы целесообразно также использовать метод узловых потенциалов.

Целью расчета переходных процессов является определение времени перехода схемы из одного статического режима в другой, времени достижения токами и напряжениями схемы заданных уровней или установлении соотношений между ними на отдельных элементах, формы переходного процесса.

Математическую основу анализа переходных процессов в схемах составляет численное решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка, описывающих поведение схемы под воздействием сигналов.

В зависимости от выбранного базиса исходные модели используются две формы представления модели схемы для расчета переходных процессов – явная и неявная.

Явная форма: $\frac{dx}{dt} = F(x, t)$, $\frac{dx}{dt}$ - вектор неизвестных. В правой части соотношения - известные величины, поэтому значение $\frac{dx}{dt}$ оказывается представленным в явном виде и может быть вычислено непосредственно.

Неявная форма: $F\left(\frac{dx}{dt}, x, t\right) = 0$, $F\left(\frac{dx}{dt}, x, \int x dt, t\right) = 0$ – интегро-дифференциальное неявное уравнение. Переменными x являются напряжения на конденсаторах и токи в индуктивностях. Неявными называются уравнения, в которых искомая переменная находится не только в левой, но и правой части алгоритма решения ОДУ.

Представление ММ схемы в явной форме налагает ограничения на выбор независимых переменных – ими могут быть только напряжения на емкостях u_C и токи индуктивностей i_L , которые описываются дифференциальными или интегральными зависимостями:

$$i_C = C \frac{du_C(t)}{dt}, \quad u_L = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt, \quad i_L = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt.$$

Пример: Составить ММ линейной схемы на рисунке 13.

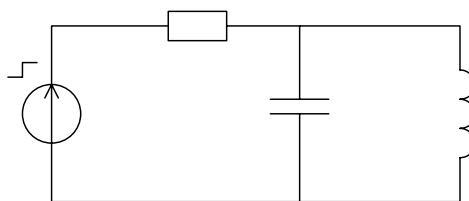


Рисунок 13

Выберем в качестве независимых переменных ток i_L и напряжение u_C и запишем для них систему топологических уравнений:

$$\begin{aligned} i_C + i_L - i_R &= 0, \\ -E + u_R + u_C &= 0, \\ u_L - u_C &= 0. \end{aligned}$$

Используя компонентные уравнения $u_R = Ri_R$, $i_C = Cdu_C/dt$, $u_L = Ldi_L/dt$, получим систему:

$$\begin{aligned} \frac{du_C(t)}{dt} &= \frac{1}{C} \left(\frac{-E - u_C(t)}{R} - i_L(t) \right) \\ \frac{di_L(t)}{dt} &= \frac{u_C(t)}{L} \end{aligned}$$

3.5 Численные методы решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений при моделировании переходных процессов

Задача расчета переходного процесса в схеме математически формулируется как задача Коши, т.е. ищется решение $x(t)$ на интервале от 0 до t при заданных начальных условиях $x(t_0) = x_0$. Искомая функция $x(t)$ определяется в отдельных точках (узлах) t_1, t_2, \dots, t_n , на которые разбивается заданный интервал времени. Расстояние между узлами $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ называется шагом интегрирования h , который определяется в процессе вычислений или может быть задан.

Таким образом, процесс решения задачи сводится к нахождению для очередного момента времени t_{n+1} значения $x_{n+1} = x(t_{n+1})$ по уже известным значениям узловых напряжений (или токов) и их производных в предыдущих временных узлах.

Методами решения уравнения $\frac{dx}{dt} = F(x(t), t)$ является явный метод Эйлера: $x_{n+1} = x_n + hf(x_n, t_n)$ и неявный метод Эйлера: $x_{n+1} = x_n + hf(x_{n+1}, t_{n+1})$.

Пример. Рассчитать переходной процесс в цепи, изображённой на рисунке 14, с помощью прямой формулы Эйлера.

В такой цепи происходит разряд конденсатора с ёмкостью $C = 1$ мкФ, заряженного до напряжения 1 В, через резистор с сопротивлением $R = 1$ кОм.

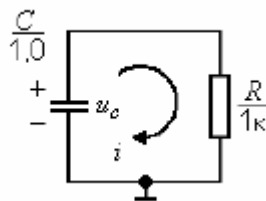


Рисунок 14

Если принять $u_C(t) = x(t)$, $x(0) = 1$ В и постоянную времени $\tau = RC = 10^{-3}$ сек, то процессы в этой цепи будут описываться дифференциальным уравнением

$$\frac{du_C(t)}{dt} = \frac{u_C(t)}{RC} = -RC \cdot u_C(t)$$

Если решать это уравнение с помощью прямой формулы Эйлера и выбрать $h = 200$ мкс с начальным условием $x(0) = 1$, то

$$x(200 \text{ мкс}) = x_1 = 1 - 200 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 1 = 0,8$$

$$x(400 \text{ мкс}) = x_2 = 0,8 - 200 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 0,8 = 0,64$$

и т.д.

На практике модель схемы чаще представляется в неявной форме

$$F\left(\frac{dx}{dt}, x, \int x dt, t\right) = 0. (*)$$

При этом модель формируется на основе замены дифференциальных и интегральных уравнений на соответствующие им конечно-разностные уравнения с помощью дискретизации компонентных уравнений емкости и индуктивности:

$$\frac{dx}{dt} \approx f(x_{n+1}, x_n, x_{n-k}), \int_a^b x(t) dt \approx f(x_{n+1}, x_n, x_{n-k}).$$

Таким образом, от системы (*) переходим к системе конечно-разностных алгебраических уравнений

$$F_i(x_{n+1}, x_n, \dots, x_{n-k}) = 0, \quad i = 1, \dots, p.$$

Составленная модель решается относительно x_{n+1} каким-либо численным методом, обычно методом Ньютона.

Расчет неявной формы модели схемы в базисе узловых потенциалов

Так как в базисе узловых потенциалов уравнения должны иметь вид $I = f(U)$, то для емкости и индуктивности используются компонентные уравнения вида:

$$i_C = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad i_L = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt.$$

Далее данные уравнения дискретизируются. Дискретные модели вытекают из неявных алгоритмов, в частности из обратной формулы Эйлера.

Дискретные уравнения для емкости и индуктивности имеют вид:

$$i_{C,n+1} = C \frac{du_C(t)}{dt} \approx C \frac{u_{C,n+1} - u_{C,n}}{h}, \quad h = t_{n+1} - t_n,$$

$$i_{L,n+1} = i_{L,n} + \frac{1}{L} \int_{t_n}^{t_{n+1}} u_L(dt) \approx i_{L,n} + \frac{h}{L} u_{L,n+1}.$$

При решении методом Ньютона в каждом из полученных уравнений вектор токов рассматривается как уравнение тока соответствующей ветви, при этом напряжения $u_{C,n+1}$, $u_{L,n+1}$ заменяются через разности узловых потенциалов, а значения $u_{C,n}$, $i_{L,n}$, $u_{L,n}$ предполагаются известными из предыдущих расчетов или начальных условий. Таким образом, в базисе узловых потенциалов формирование модели схемы для расчета переходных процессов не отличается от формирования модели для расчета статического режима.

Пример. Составить математическую модель для схемы на рисунке 15.

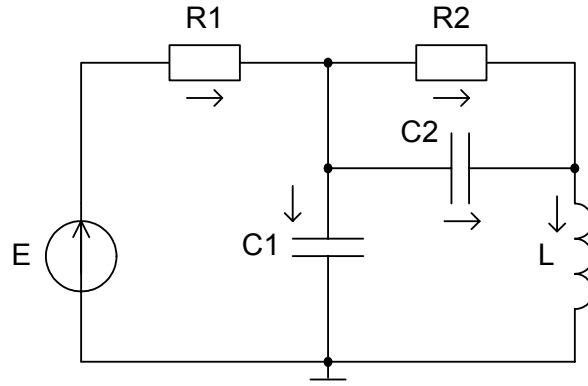


Рисунок 15

Используя алгоритм составления уравнений методом Ньютона и дискретные уравнения для емкости и индуктивности, получим:

$$I(\varphi) = \begin{vmatrix} -\frac{E - \varphi_{1,n+1}}{R1} + C2 \frac{(\varphi_{1,n+1} - \varphi_{2,n+1}) - u_{C2,n}}{h_{n+1}} + C1 \frac{\varphi_{1,n+1} - u_{C2,n}}{h_{n+1}} + \frac{\varphi_{1,n+1} - \varphi_{2,n+1}}{R2} \\ \frac{\varphi_{1,n+1} - \varphi_{2,n+1}}{R2} - C2 \frac{(\varphi_{1,n+1} - \varphi_{2,n+1}) - u_{C2,n}}{h_{n+1}} + \frac{h_{n+1}}{L} \varphi_{2,n+1} + i_{L,n} \end{vmatrix}$$

$$Y = \begin{vmatrix} \frac{1}{R1} + \frac{C1}{h_{n+1}} + \frac{C2}{h_{n+1}} + \frac{1}{R2} & -\frac{C2}{h_{n+1}} - \frac{1}{R2} \\ -\frac{C2}{h_{n+1}} - \frac{1}{R2} & \frac{1}{R2} + \frac{C2}{h_{n+1}} + \frac{h_{n+1}}{L} \end{vmatrix}.$$

В усилительных устройствах может наблюдаться большой разброс постоянных времени. Постоянные времени в области нижних τ_n и верхних частот τ_e сильно отличаются друг от друга ($\tau_n \gg \tau_e$). Прямой метод Эйлера устойчив, если шаг интегрирования h меньше самой малой из постоянных времени схемы, т.е. $h < \tau_e$. Такое соотношение разумно при исследовании быстро нарастающих (или спадающих) фронтов импульса. Однако оно совершенно недопустимо при исследовании медленных процессов на вершине импульса: решение слишком затягивается, а укрупнить шаг нельзя из-за потери устойчивости. В связи с этим, при расчёте переходных процессов в нелинейных инерционных схемах с большим разбросом постоянных времени используются неявные методы интегрирования, в том числе с автоматическим выбором шага интегрирования в зависимости от скорости изменения решения. Таким образом, на «крутых участках», где решение изменяется быстро, выбирается «мелкий» шаг, а на «пологих» - величина шага увеличивается.

3.6 Моделирование частотных характеристик

Для вычисления таких показателей как добротность, полоса пропускания, равномерность усиления в частотном диапазоне, при исследовании колебательных стационарных процессов, анализе устойчивости, расчете искажений информации, представляемой спектральными составляющими сигналов необходимо определение АЧХ и ФЧХ.

В зависимости от исходных данных моделирование частотных характеристик может быть проведено: 1) на основе известной математической модели,

2) результатов моделирования во временной области (переходных и импульсных характеристик), 3) известной схемной модели.

При моделировании частотных характеристик оператор $\frac{d}{dt}$ заменяется на оператор $j\omega$. Частотную характеристику схемы можно определить как отношение спектра (преобразования Фурье) выходного сигнала к спектру входного сигнала.

В программах моделирования и проектирования РЭС наибольшее распространение получил численный подход, когда АЧХ вычисляется как численное значение комплексной передаточной характеристика схемы $F(j\omega)$ при разных значениях ω , т.е. поточечно. Комплексная передаточная характеристика определяется как

$$F(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{A_1(\omega) + jB_1(\omega)}{A_2(\omega) + jB_2(\omega)}, \text{ где } j\omega - \text{ комплексная частота, } A, B$$

- действительная и мнимая части соответствующих спектров сигналов.

АЧХ и ФЧХ соответственно имеют вид:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{A_1^2(\omega) + B_1^2(\omega)}}{\sqrt{A_2^2(\omega) + B_2^2(\omega)}}, \quad \Psi(\omega) = \text{arctg} \frac{B_1(\omega)A_2(\omega) - A_1(\omega)B_2(\omega)}{A_1(\omega)A_2(\omega) + B_1(\omega)B_2(\omega)}.$$

Численное моделирование частотных характеристик по известным импульсным $g(t)$ и переходным $h(t)$ характеристикам

Для связи $F(j\omega)$ с $g(t)$ в основе лежат формулы интеграла Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt;$$

откуда получаем следующее выражение:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Используется также соотношение, связывающие переходные и импульсные характеристики:

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

Алгоритм определения частотных характеристик сводится к заданию последовательности частот, формированию и вычислению передаточной характеристики, вычислению и выводу АЧХ и ФЧХ. Для реализации могут быть использованы системы компьютерной математики.

Если программе известны коэффициенты числителя и знаменателя передаточной характеристики модели, то расчет частотных характеристик не вызывает затруднений. Гораздо чаще программы математического моделирования располагают результатом идентификации в матричной форме. Рассмотрим этот подход применительно к базису узловых потенциалов.

Пусть в качестве входного сигнала используется источник напряжения с единичной комплексной амплитудой, нулевой начальной фазой, тогда

$$F(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = U_{\text{ВЫХ}}(j\omega).$$

Базой для моделирования служат методы составления компонентных и топологических уравнений. Компонентные уравнения реактивных ветвей принимают вид:

$$i_C = j\omega C(\varphi_{\text{нач}} - \varphi_{\text{кон}}), \quad i_L = -\frac{j}{\omega L}(\varphi_{\text{нач}} - \varphi_{\text{кон}}),$$

где $(\varphi_{\text{нач}}, \varphi_{\text{кон}})$ потенциалы на концах реактивных ветвей.

Данные уравнения используются при формировании вектора узловых токов. Проводимости равны:

$$G_C = j\omega C, \quad G_L = -\frac{j}{\omega L} (**).$$

Эти уравнения используются при формировании матрицы узловых проводимостей.

Узловое уравнение линейной схемы в частотной схеме имеет вид:

$$Y(j\omega) \varphi(j\omega) = -I(j\omega).$$

Подставляя в данное уравнения частоты ω_i и вычисляя вектор $\varphi(j\omega_i)$ на каждой частоте, получаем комплексную частотную характеристику схемы. Для расчета частотной характеристики в узле схемы k , на каждой частоте ω_i нужно выбирать из вектора $\varphi(j\omega_i)$ комплексное значение $\varphi_k(j\omega_i) = A_k(\omega_i) + jB_k(\omega_i)$ и вычислять АЧХ и ФЧХ в данном узле:

$$\varphi_{k_{\text{ачх}}}(\omega_i) = \sqrt{A_k^2(\omega_i) + B_k^2(\omega_i)}, \quad \varphi_{k_{\text{фчх}}}(\omega_i) = \arctg \frac{B_k^2(\omega_i)}{A_k^2(\omega_i)}.$$

Пример. Составить математическую модель схемы на рисунке 16 в виде $Y(j\omega) \varphi(j\omega) = -I(j\omega)$.

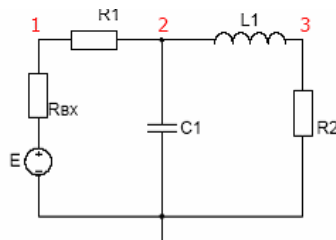


Рисунок 15

Используя методы составления компонентных и топологических уравнений, получим следующие системы уравнений, описывающие работу схемы:

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_{\text{ex}}} + \frac{1}{R_1}\right) & -\frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_1}\right) & -\frac{1}{j\omega L_1} \\ 0 & -\frac{1}{j\omega L_1} & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L_1}\right) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

4 Функциональное моделирование РЭС

4.1 Основные принципы функционального моделирования

Суть функционального моделирования (ФМ) состоит в разбиении РЭС на отдельные функциональные блоки, каждый из которых выполняет то или иное функциональное преобразование сигнала (усиление, ограничение, интегрирование и т.д.), и расчете формы сигнала и его основных параметров в каждой точке полученной функциональной схемы.

Различают два подхода к анализу функциональных схем РЭС.

Первый подход основан на использовании электрических моделей блоков. Как и в моделях СхМ, эти модели являются уравнениями связи токов и напряжений на выводах блоков. Для получения математических моделей систем и их анализа применяются методы и алгоритмы, характерные для СхМ.

Второй подход основан на ФМ и за счет допущений позволяет при тех же вычислительных ресурсах анализировать более сложные схемы. В нем используются модели, в которых фигурирует лишь одна переменная, обычно называемая сигналом.

Основным допущением, характерным для ФМ, является развязка отдельных блоков функциональной схемы, т.е. независимость характеристик отдельных блоков от режима работы других блоков. Условие развязки блоков эквивалентно выполнению условий $R_{вх} = \infty$, $R_{вых} = 0$ для каждого из блоков. Поэтому преобразование сигнала зависит только от характеристик каждого блока, а не от их взаимного влияния.

Вторым является допущение об однонаправленности элементов, т.е. сигнал на выходе любого элемента не влияет на сигнал на его входе. Поэтому ФМ системы представляет собой совокупность компонентных уравнений.

Примеры ФМ являются исследование:

- поведения системы автоматического регулирования,
- временных диаграмм аналого-цифровых схем,
- логических схем методами логического моделирования,
- в случае сложности расчета схема, например, на основе теории цепей.

4.2 Типовые элементы функциональных схем и способы их моделирования

Функциональные элементы можно свести к четырем основным типам: генераторы сигналов, безынерционные элементы, инерционные линейные элементы, инерционные нелинейные элементы.

Под моделированием элемента понимается вычисление его выходной величины y по заданному значению сигнала x .

Основной характеристикой элемента при ФМ является его функция преобразования, связывающая входной и выходной сигналы.

Генераторы сигналов (рисунок 16) – это независимые генераторы, задающие сигнал $x(t)$ и управляемые генераторы, формирующие форму или значение сигнала $x(t)$ в зависимости от управляющего воздействия u (пороговые устройства).

Функция преобразования управляемого генератора:

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t) & \text{при } u = u_1 \\ \dots & \\ x_n(t) & \text{при } u = u_n \end{cases} .$$

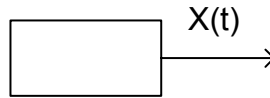


Рисунок 16

Моделирование генератора сигнала заключается в вычислении заданной функции $x(t)$ в известные моменты времени t_n . В результате непрерывная функция $x(t)$ заменяется дискретной решетчатой функцией $x_n = x(t_n)$.

Функция преобразования безинерционных линейных или нелинейных элементов (рисунок 17) представляет собой линейную или нелинейную функцию f , связывающую входной и выходной сигналы: $y = f(x)$. Нелинейный элемент позволяет преобразовать форму входного сигнала $x(t)$ в форму выходного сигнала $u(t)$:

$$u(t) = f(x(t)).$$

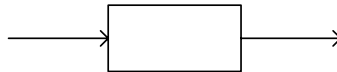


Рисунок 17

Функция преобразования инерционных линейных элементов (рисунок 18) во временной области – это переходная характеристика $h(t)$:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau ,$$

а в частотной области – коэффициент передачи $K(p)$:

$$y(p) = K(p)x(p) .$$



Рисунок 18

Примеры инерционных линейных элементов: различные типы частотных фильтров, ОУ, выполняющие функции суммирования, интегрирования, дифференцирования и другие линейные операции.

Функция преобразования инерционных нелинейных элементов (рисунок 19) это некоторый нелинейный оператор $A(x)$, например дифференциальное уравнение, ставящий в соответствие каждой реализации $x(t)$ реализацию $y(t)$. **X**

Реальный инерционный элемент можно описать системой дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} + g_i(y(t)) = \frac{dx_i(t)}{dt} + f_i(x(t)), \quad i = 1, n ,$$

где $x(t), y(t)$ – входные и выходные сигнала элемента, n – порядок системы.

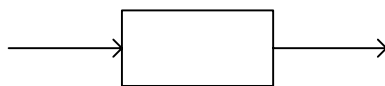


Рисунок 19

Когда составление модели в виде обыкновенного дифференциального уравнения затруднительно, элемент приближенно можно заменить последовательным соединением инерционного линейного и безынерционного нелинейного (рисунки 20, 21). Выходной сигнал существенно зависит от последовательности включения элементов.

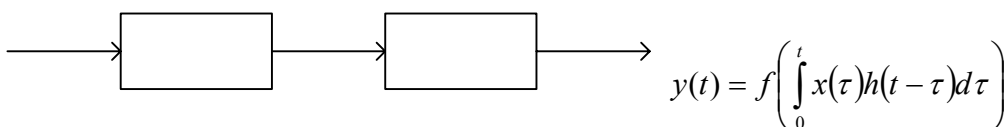


Рисунок 20

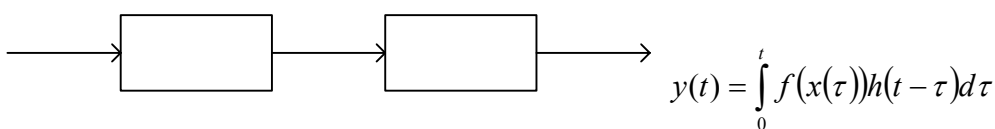


Рисунок 21

Примеры: модуляторы, ограничители амплитуды, детекторы.

4.3 Моделирование функциональных схем (ФС)

Моделирование ФС заключается в построении ФС, а затем в получении системы уравнений и ее решения.

Построение ФС может проводиться в два этапа: на первом - каждый реальный элемент устройства представляется соответствующим элементом ФС, если элемент сложный, то он разделяется на более мелкие образующие его элементы.

Основные типы структур ФС: 1) последовательная (рисунок 22);

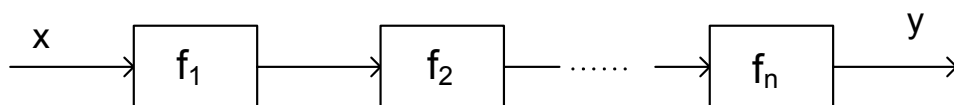


Рисунок 22

2) сложная последовательная (рисунок 23);

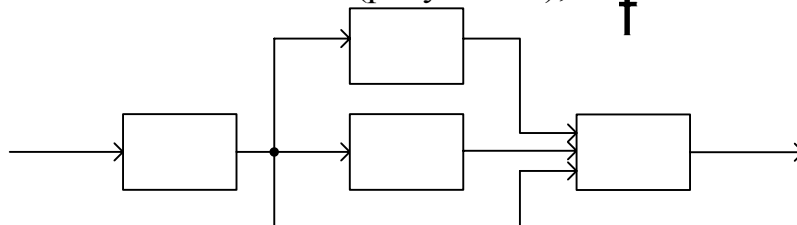


Рисунок 23

3) с обратной связью (пример схемы АРУ на рисунке 24).

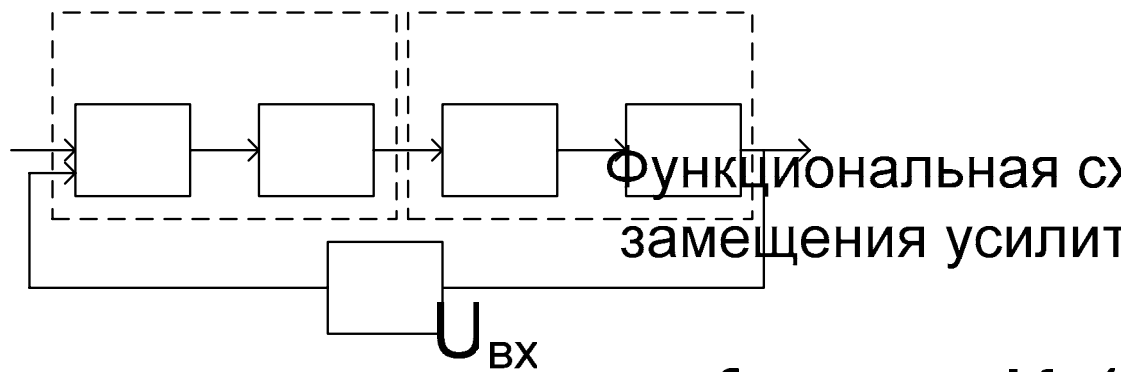


Рисунок 24

Система АРУ (автоматическая регулировка усиления) - усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, детектор, фильтр, преобразующий амплитуду низкочастотных колебаний в напряжение, управляющее усилением усилителя. Усилитель и детектор представляются нелинейным безинерционным и линейным инерционным элементами. Нелинейность f_1 характеризует зависимость коэффициента усиления от управляющего напряжения на выходе фильтра. Нелинейность f_2 – нелинейные свойства детектирующего диода.

Выделяют два подхода при получении систем уравнений ФС.

1) Формальный подход – ФС описывается уравнениями связей элементов (топологические уравнения) и уравнениями самих элементов (компонентные уравнения).

Пример. Составить компонентные и топологические уравнения для схемы на рисунке 25.

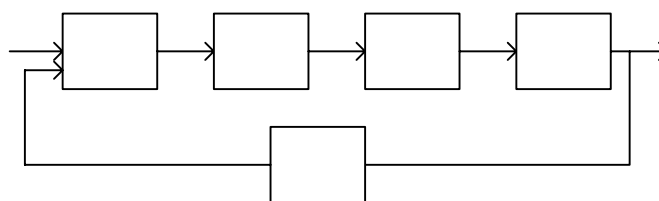


Рисунок 25

Компонентные уравнения для схемы АРУ:

$$y_1 = f_1(U_{ВХ}, U_{Ф})$$

$$y_2 = K_1(p)x_1(p)$$

$$y_3 = f_2(x_2)$$

$$y_4 = K_2(p)x_3(p)$$

$$y_5 = K_3(p)x_4(p)$$

Топологические уравнения:

$$x_1 = y_1$$

$$x_2 = y_2$$

$$x_3 = y_3$$

$$x_4 = y_4$$

$$U_{Ф} = y_5$$

Полученные уравнения решаются методом Ньютона.

2) Причинно-следственный (имитационный) – процесс моделирования имитирует прохождение сигнала от одного элемента к другому по принципу: сначала вычисляется сигнал на входе, затем сигнал на выходе. Схема должна быть ранжирована, т.е. элементы должны быть расположены так, чтобы входа-

ми элементов i -ранга были выходы элементы меньшего ранга. Моделирование в такой структуре заключается в последовательном вычислении сигнала сначала в элементах нулевого ранга (входных сигналов), затем во всех элементах первого ранга и т.д. В компьютерных программах моделирования операция ранжирования выполняется программным путем на основе информации о связях между элементами.

В общем виде уравнения имеют вид:

$y_i - f(y_i, x_i) = 0$, которое решается методом простых итераций.

Пример. Составить уравнение вида $y_i - f(y_i, x_i) = 0$ для схемы на рисунке

26.

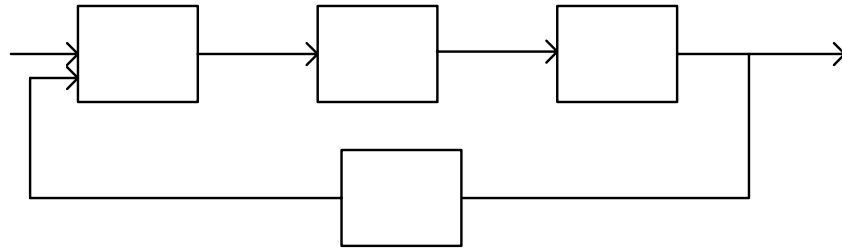


Рисунок 26

Конечное уравнение будет иметь следующий вид:

$$y_1 - f_1(x_1, f_{oc}(f_3(f_2(y_1)))) = 0$$

x_1

f_1

x_2

y_1

5 Методы расчета и анализа выходных параметров схем

5.1 Расчет выходных параметров схем

Для анализа выходных параметров схем применяется одновариантный и многовариантных расчет схем.

Задачей одновариантного расчета является определение выходных параметров схемы в статическом и динамическом режимах и при расчете частотных характеристик.

Многовариантный расчет схем представляет собой многократное вычисление выходных параметров для заданных вариантов внутренних параметров.

Алгоритмы вычисления статических выходных параметров представляют собой функциональные зависимости, содержащие в качестве аргументов токи и напряжения.

Например, определение мощности, рассеиваемой в ветви схемы:

$$P = U \cdot I.$$

В динамическом режиме средняя мощность может быть рассчитана как средняя сумма мгновенных мощностей, рассеиваемая на каждом шаге переходного процесса:

$$P_{\text{дин}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_k U_k,$$

где n – число шагов на интервале времени T .

Динамические выходные параметры (длительности задержек, фронтов, срезов, крутизна сигнала и период его следования) рассчитываются на основе оценки изменений во времени значений токов и напряжений.

Например, длительность задержки фронта t_3 (рисунок 27) вычисляется путем сравнения текущего значения U с заданным уровнем U_1 , а длительность фронта сигнала $t_{\text{ф}}$ определяется как разность моментов времени t_2 и t_1 .

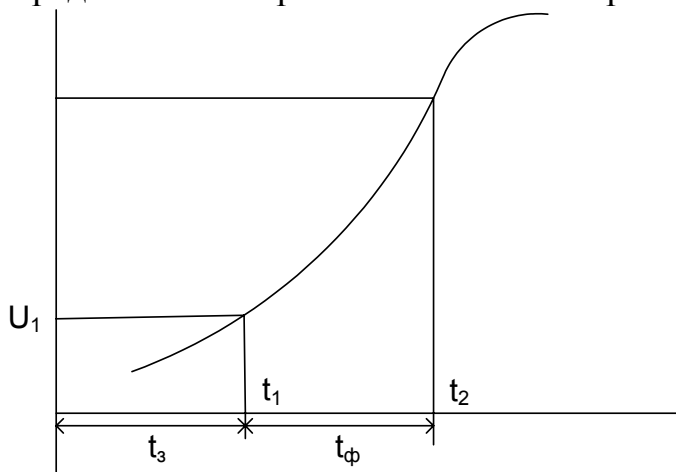


Рисунок 27

Расчет большинства выходных параметров, характеризующих переходные процессы, базируется на оценке искажений различных сигналов при их прохождении через схему. К таким выходным параметрам относятся: $\tau_{\text{ф}}$ - длительность фронта или время установления импульса, определяемые временем нарастания сигнала от уровня 0,1 до 0,9 стационарного значения; $\tau_{\text{с}}$ - длитель-

ность среза импульса, δ - выброс на вершине, Δ - неравномерность вершины импульса; τ_3 — запаздывание импульса, определяемое временем достижения до половины установившегося значения высоты импульса или его амплитуды; τ_n - время длительности выброса, возникающего в паузе импульса.

Примеры выходных параметров, наиболее часто рассчитываемые в частотной области представлены в таблице 3.

Таблица 3

Выходной параметр	Способ определения
Коэффициент усиления по напряжению, току или мощности K_0	Определяется как максимальный коэффициент усиления в пределах полосы пропускания или на центральной частоте полосы пропускания f_0
Полоса пропускания	Соответствует области частот, где коэффициент усиления не опускается ниже $0,7K_0$ по напряжению или току и $0,5K_0$ по мощности
Верхняя и нижняя граничные частоты полосы пропускания	Обычно задаются на уровне $0,7 K_0$

5.2 Анализ чувствительности

В общем случае под чувствительностью понимают реакцию схемы на малые изменения параметра её компонента. Степень влияния отклонения параметра X на функцию цепи Y оценивается коэффициентом чувствительности.

Цель анализа чувствительности заключается в нахождении тех элементов схемы и параметров этих элементов, отклонение которых от номинальных значений приводит к наибольшему отклонению выходных параметров схемы.

Анализ чувствительности обусловлен следующими причинами:

1. Чувствительность помогает сравнить качество различных цепей, имеющих одинаковый отклик при номинальных параметрах компонентов.

2. Чувствительность позволяет определить влияние разброса параметров элементов на работоспособность устройства.

3. Коэффициенты чувствительности можно учесть при оценке эффективности настройки готовой схемы.

4. Чувствительность определяет градиент целевой функции, который используется при оптимизации схемы.

Алгоритм расчета чувствительности состоит из этапов:

1. Расчет выходных параметров в номинальном режиме.

2. Выполнение n вариантов расчета, в каждом из которых дается отклонение ΔX либо в одну (*), либо в обе стороны (**), от номинального значения только одному из внутренних параметров X .

3. Расчет выходных параметров с учетом отклонений значений внутреннего параметра.

4. Расчет коэффициента чувствительности:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{\Delta x} \quad (*),$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(x + \Delta x) - y(x - \Delta x)}{2\Delta x} (**).$$

Недостатком способа (*) является невысокая точность определения коэффициентов чувствительности, что обусловлено нелинейным характером зависимости выходного параметра от внутренних. Для повышения точности используется способ (**).

5.3 Методы параметрической оптимизации

Параметрическая оптимизация РЭС – это процесс определения значений внутренних параметров X , при которых достигаются «наилучшие» или заданные значения выходных параметров Y . Так как параметрическая оптимизация используется на схмотехническом уровне моделирования РЭС, то структура схемы, т.е. типы элементов и способы их соединения, предполагаются известными.

Смысл слова «наилучшие» определяется критериями оптимальности, которые могут быть частными и обобщенными.

Критерии для оптимизации по одному параметру называются частными критериями оптимальности. Например, схему можно оптимизировать по максимальному быстродействию, по минимальной потребляемой мощности и т.д. В этом случае критерием оптимальности является максимум или минимум какого-либо одного схемного параметра.

Недостаток - улучшается только один из показателей, а все остальные поддерживаются на определенном уровне, при том, что обычно схема характеризуется не одним, а совокупностью выходных параметров.

Критерии, учитывающие несколько частных критериев, называются обобщенными, а оптимизация называется многокритериальной. Схема считается оптимальной, когда наилучшее значение принимает не каждый из выходных параметров, а какая-либо их комбинация, в которой отдельные параметры могут отличаться от своих наилучших значений.

Критерий максимальной суммы взвешенных выходных параметров:

$$K = \sum (a_i y_i^{(+)} - a_j y_j^{(-)}),$$

где $y_i^{(+)}$ - «положительные» выходные параметры схемы (быстродействие, надежность), $y_j^{(-)}$ - «отрицательные» выходные параметры (потребляемая мощность, задержка сигнала, масса). a_i, a_j – весовые коэффициенты, характеризующие важность выходных параметров для конкретного потребителя или изготовителя.

Достоинством критерия является его универсальность, недостатком – субъективный характер весовых коэффициентов.

Характерной особенностью оптимизации электронных схем является наличие ограничений на компонентные, промежуточные и схемные параметры.

Ограничения на компонентные параметры обусловлены возможностями физической реализации этих параметров (максимально достижимые значения крутизны характеристик).

Ограничения на промежуточные параметры схемы обусловлены способом функционирования схемы (максимальные напряжения между отдельными участками компонентов из-за опасности пробоя).

Ограничения на схемные параметры, как правило, формулируются в виде технических заданий и назначаются потребителями схем.

6 Использование программных средств для схемотехнического проектирования и моделирования РЭС

6.1 Программный комплекс для моделирования радиоэлектронных схем Electronics WorkBench (EWB)

Electronics Workbench представляет собой средство программной разработки и имитации электрических цепей. Особенностью программы является наличие в панели инструментов ряда кнопок с изображением элементов радиоэлектронных схем (рисунок 28).



Рисунок 28

Этапы построения схем:

1. Перенос элементов из панелей инструментов на рабочую область и примерное расположение элементов на своих местах.
2. Соединение контактов элементов.
3. Задание номиналов элементов. Двойной щелчок по элементу приводит к появлению диалогового окна его свойств. Общими для всех окон свойств являются закладки Label и Fault. В первой из них задаётся имя элемента и его обозначение (название) на схеме, во второй — возможные неисправности элемента.

В библиотеку компонентов EWB входят аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые компоненты.

1 Favorites – подсхемы пользователя.

2 Sources – источники питания и сигналов (рисунок 29). Все источники являются идеальными, например, внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, поэтому его выходное напряжение не зависит от нагрузки. Идеальный источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление, поэтому его ток не зависит от сопротивления нагрузки. Состав:



Рисунок 29

- батарея (короткая жирная черта – вывод, имеющий отрицательный потенциал по отношению к другому выводу),
- источник постоянного напряжения (V_{cc}) для питания цифровых схем
- заземление, можно использовать как источник логического нуля при моделировании,
- источник постоянного напряжения с резистором – устанавливают уровень логической единицы в конкретной точке схемы,

В источнике переменного напряжения (тока) задается эффективное значение напряжения (тока), частота и фаза сигнала.

В источнике прямоугольных импульсов задается амплитуда, частота и коэффициент заполнения импульсов. Коэффициент заполнения равен $\frac{\tau_u}{T} 100\%$ где τ_u – длительность входного импульса, T – период колебаний.

Функциональный генератор находится в панели Instruments, имеет два противофазных выхода и может генерировать сигналы синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы.

3 Basic – пассивные и коммутационные элементы (рисунок 30).

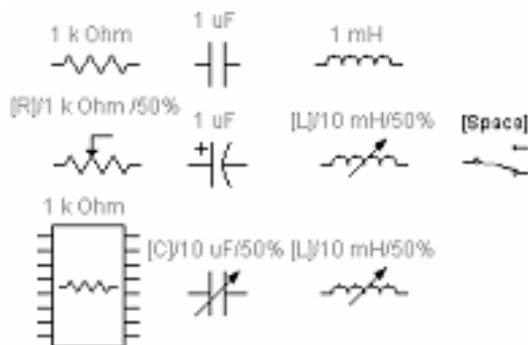


Рисунок 30

4 Diodes – диоды.

5 Transistors – транзисторы.

6 Analog ICs – аналоговые интегральные схемы (ОУ, компараторы)

7 Mixed ICs – микросхемы смешанного типа (ЦАП, АЦП, таймеры, мультивибраторы)

8 Digital ICs – цифровые ИС разных серий

9 Logic Gates – логические элементы и их ИС

10 Digital – готовые цифровые функциональные узлы и их ИС (сумматоры, триггеры, регистры, счетчики)


11 Indicators – индикаторные устройства разных типов

12 Controls – аналоговые вычислительные устройства (интеграторы и дифференциатор напряжения, умножители)

13 Miscellaneous – компоненты смешанного типа (резонатор)


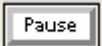
14 Instruments – приборы для исследования схем (мультиметр, осциллограф).

Способы моделирования схем:

1-й способ. Если в схеме установлены измерительные приборы, то она запускается на моделирование включением напряжения питания тумблером, расположенным в правой верхней части экрана . Там же расположена кнопка Pause, с помощью которой можно зафиксировать процесс моделирования в определенном состоянии. На экране осциллографа просматриваются графики сигналов в выбранных узлах.

2-й способ. При этом способе измерительные приборы на схеме не устанавливаются. Желательно сделать видимыми номера узлов с помощью команды Circuit/Schematic Options/Show nodes. Затем назначается вид анализа из меню Analysis. Далее в диалоговом окне устанавливаются параметры анализа и узлы, в которых просматриваются результаты моделирования (в поле Nodes for Analysis). Процесс моделирования запускается нажатием на кнопку Simulate. Графики моделирования представляются в окне Analysis Graphs. Параметры сигналов просматриваются с помощью двух визирных линий, появляющихся после щелчка на значке Toggle Cursors. (Эту команду можно выполнить и из контекстного меню). Визирные линии перемещаются мышкой и устанавливаются

ются в необходимом месте. Параметры сигналов отражаются в динамическом окне.

Виды анализа в Electronics Workbench. Рассмотрим меню Analysis программного комплекса. Первые три команды Activate, Pause и Stop аналогичны кнопкам  и . Основные виды анализа:

1 DC Operating Point — расчёт режима по постоянному току. В этом режиме из моделируемой схемы исключаются все конденсаторы и закорачиваются все индуктивности.

2 AC Frequency... — расчёт частотных характеристик (рисунок 31). Параметры анализа:

- FSTART, FSTOP — границы частотного диапазона;
- Sweep type — масштаб по горизонтали (декадный, линейный или октавный);
- Number of point — число рассчитываемых точек;
- Vertical scale — масштаб по вертикали (линейный, логарифмический или в децибелах);
- Nodes in circuit — список контрольных точек (нод) узлов цепи;
- Nodes for analysis — номера нод, для которых рассчитываются характеристики.

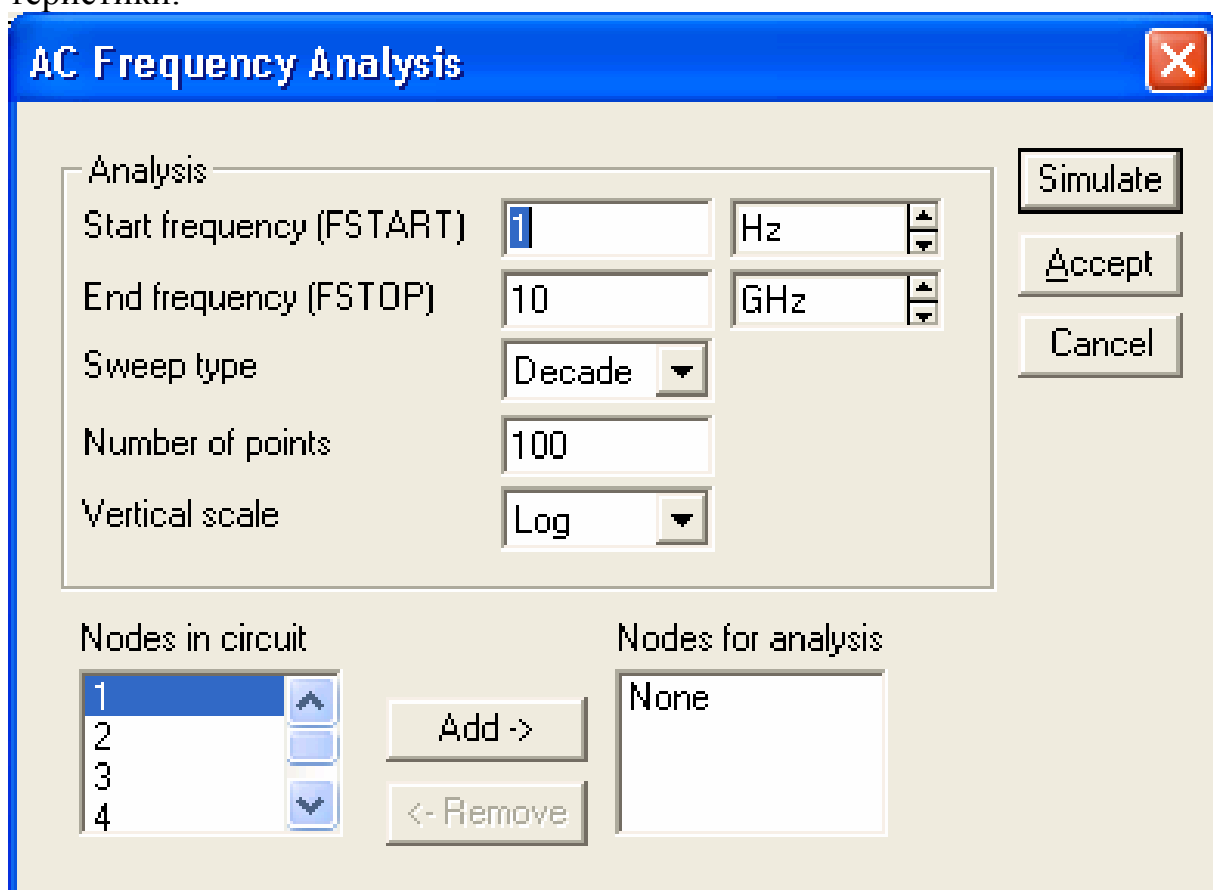


Рисунок 31

3 Transient... — расчёт переходных процессов. Диалоговое окно команды (рисунок 32) содержит следующие пункты:

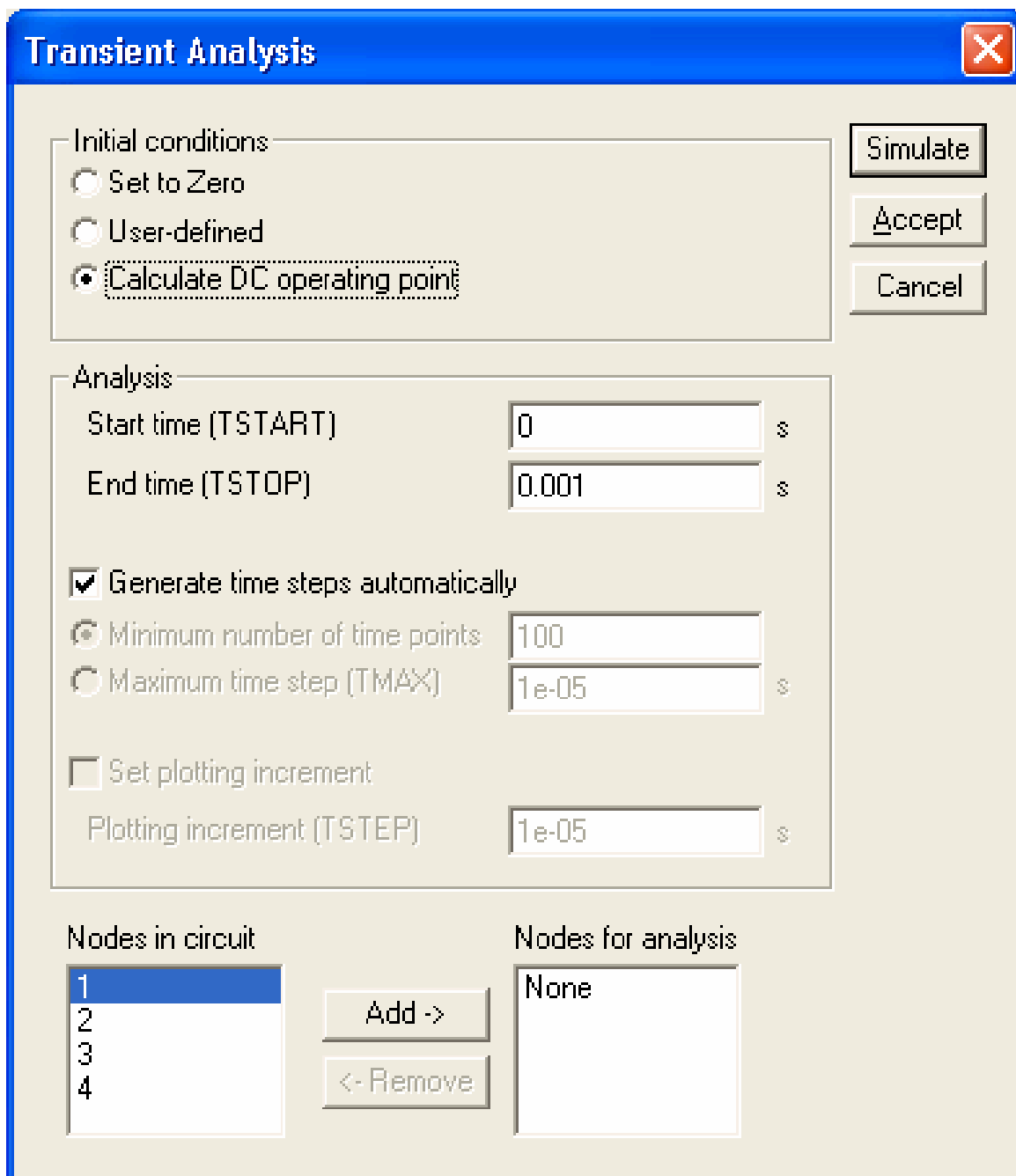


Рисунок 32

- Initial conditions — установка начальных условий моделирования;
- Set to Zero – нулевое исходное состояние;
- User-defined – под управлением пользователя;
- Calculate DC operating point – начальные условия берутся из расчёта режима по постоянному току;
- TSTART и TSTOP — время начала и окончания анализа переходных процессов;
- Generate time steps automatically — расчёт переходных процессов с переменным шагом, выбираемым автоматически;
- Tsteps — временной шаг вывода результатов моделирования на экран.

4 Fourier... —спектральный анализ (рисунок 33).

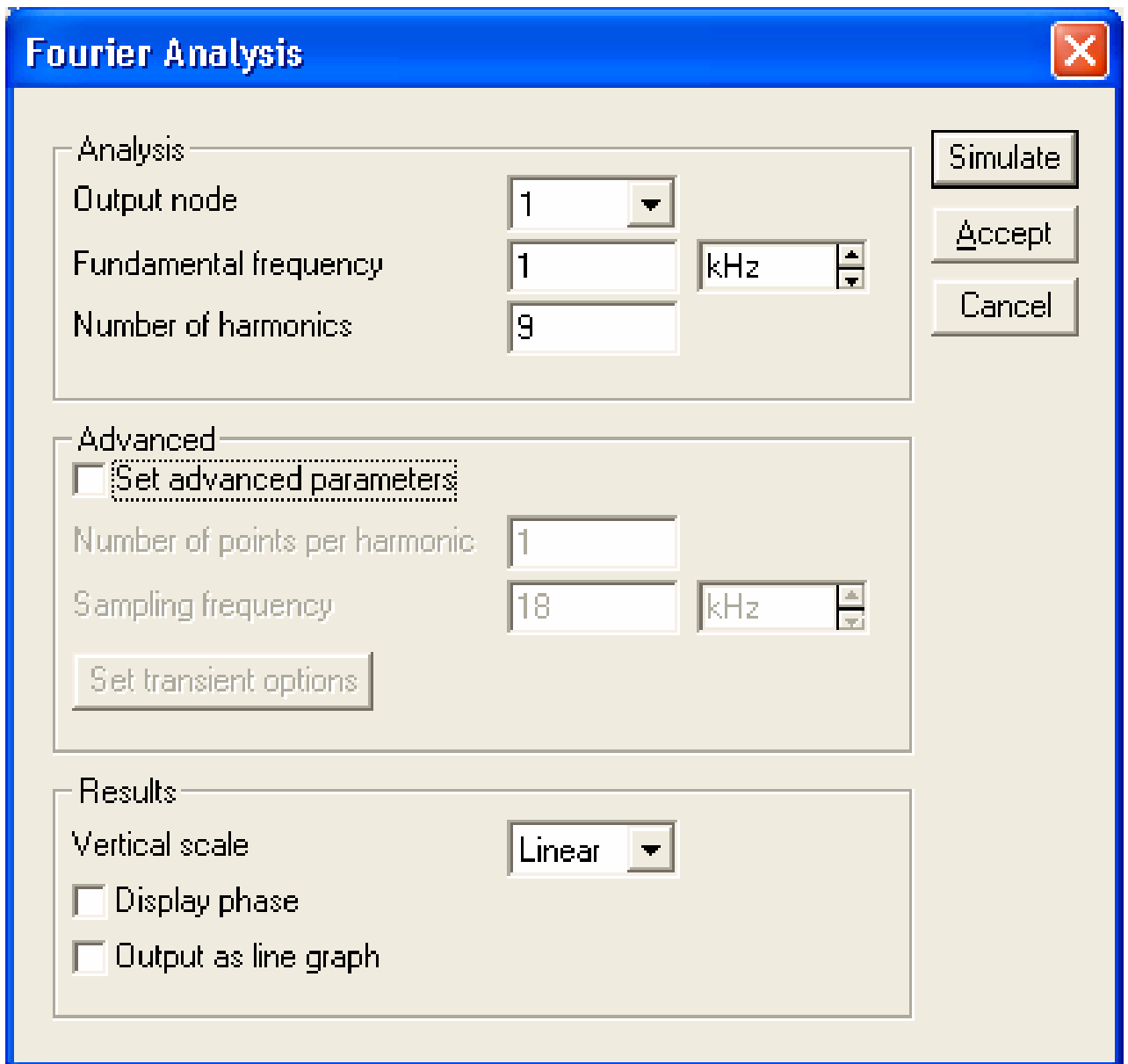


Рисунок 33

Параметры моделирования:

- Output node — номер контрольной точки, в которой анализируется спектр сигнала;
- Fundamental frequency — основная частота (частота первой гармоники);
- Number harmonic — число анализируемых гармоник;
- Vertical scale — масштаб по оси Y;
- Advanced — набор опций этого блока предназначен для проведения более тонкой структуры анализируемого сигнала;
- Number of points per harmonic — количество отсчётов на одну гармонику;
- Sampling frequency — частота следования выборок;
- Display phase — вывод на экран распределения фаз всех составляющих в виде непрерывной функции (по умолчанию выводится только график амплитуд);

- Output as line graph — вывод на экран распределения амплитуд гармоник в виде непрерывной функции (по умолчанию — в виде линейчатого спектра).

5 Monte Carlo ... — статистический анализ по методу Монте-Карло (рисунок 34).

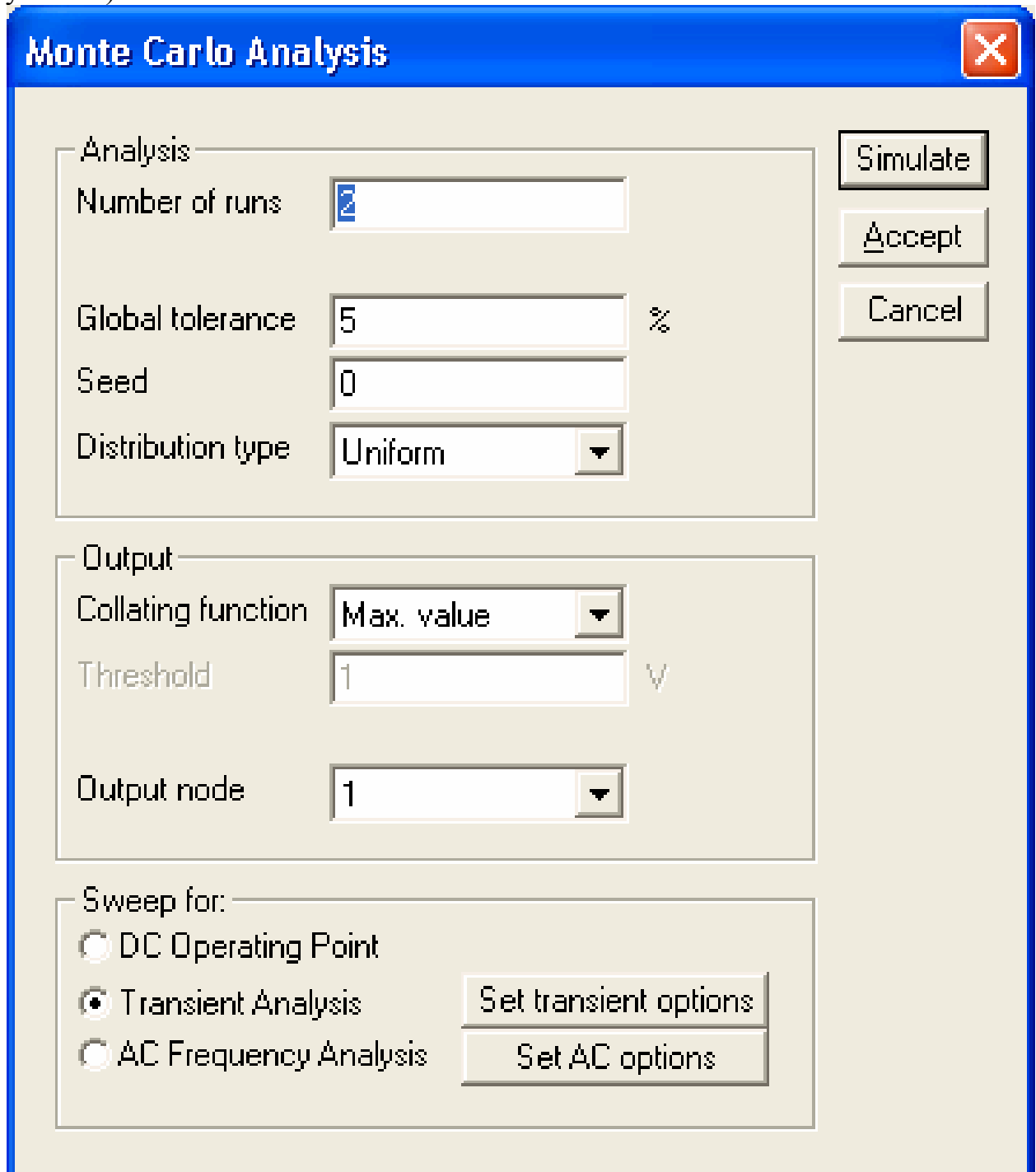


Рисунок 34

В диалоговом окне задаются следующие основные параметры:

- Number of runs — количество статистических испытаний;
- Tolerance — отклонения параметров резисторов, конденсаторов, индуктивностей, источников переменного и постоянного тока и напряжения;
- Speed — начальное значение случайной величины (0...32767);
- Distribution type — закон распределения случайных чисел.

6.2 Проектирование и моделирование РЭС в программе Capture CIS системы OrCAD

Программа OrCAD Capture CIS предназначена для создания проекта, часть которого может быть задана в виде принципиальной электрической схемы, а другая часть может быть описана на языке высокого уровня VHDL. Задание на моделирование может быть создано автоматически самой программой по графически введенной схеме или введено пользователем вручную в текстовом виде.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЭС В ПРОЕКТЕ ANALOG OR MIXED-SIGNAL CIRCUIT

(аналоговые, цифровые или смешанные аналого-цифровые устройства)

Этап 1 Выбор используемых библиотек символов для создания электрических схем. В библиотеках расположены символы компонентов:

- analog.olb – резисторы, конденсаторы и др. пассивные элементы;
- 7400.olb, 74act.olb, ... , 74s. olb – цифровые устройства;
- bipolar.olb – биполярные транзисторы;
- source.olb – источники питания и входных сигналов и другие.

Выбранным изображениям компонентов ставятся в соответствие их математические модели, описанные в формате PSpice.

Этап 2 Ввод электрической схемы – осуществляется по команде Place

- размещение на схеме элемента из соответствующей библиотеки (Place/Part)

- соединение элементов проводниками (Place/Wire)

- простановка имен цепей (Place/Net Alias) - при просмотре результатов моделирования удобно ссылаться на конкретное имя цепи.

- соединение элементов линиями групповой связи (шинами) (Place/Wire).

- соединение пересекающихся проводников курсор устанавливается в точку пересечения и выполняется команда (Place/Junction).

- ввод отводов отдельных цепей, наклоненных под углом 45° (Place/Bus Entry).

- ввод источников питания и входных сигналов (Place/Power).

В качестве источников питания и входных сигналов используется источник VDC (для цифровых микросхем источники питания не устанавливаются). Входные сигналы задаются с помощью источников VPULSE – источник прямоугольных импульсов, VAC – источник для анализа амплитудно-частотных характеристик, VSIN – источник сигнала синусоидальной формы, VPWL – источник произвольного кусочно-линейного сигнала и др.

- размещение земли (Place/Ground). Для моделирования в PSpice выбирается земля типа 0/Source.

- Создание иерархических блоков (Place/Hierarchical Block, рисунок 35).

Любой фрагмент схемы можно оформить в виде иерархического блока, символ которого представляет собой прямоугольник, и затем разместить его на схеме, что позволяет уменьшить ее размеры. Другое применение иерархических бло-

ков — представление с их помощью повторяющихся фрагментов схем: различных фильтров, усилителей, выпрямителей, сумматоров и т.п.

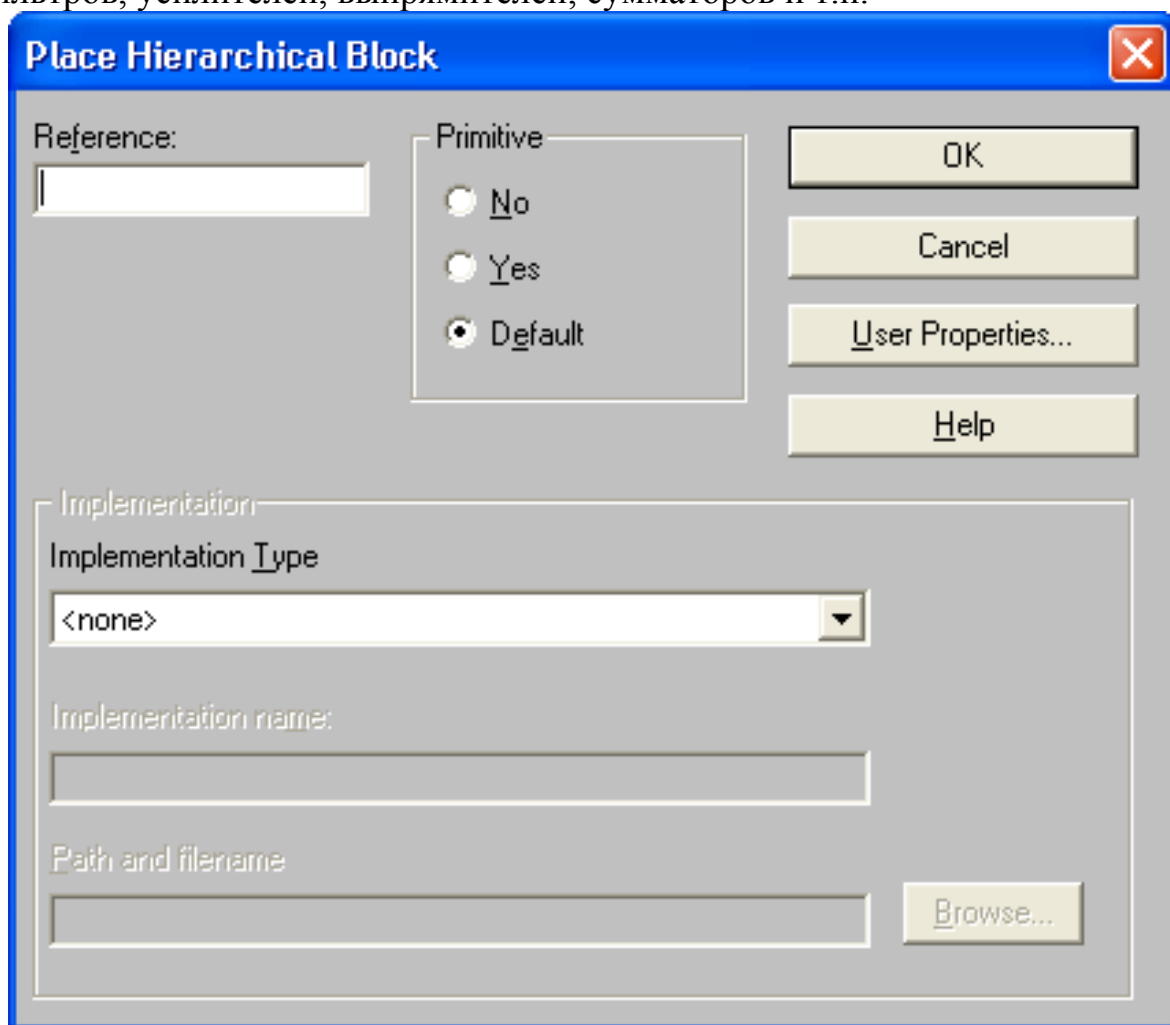


Рисунок 35

Окно содержит следующие элементы:

- Reference — позиционное обозначение иерархического блока;
- Implementation Type – тип иерархического блока, принимающий значения:
 - Schematic View — схема объекта,
 - VHDL — описание компонента на языке VHDL,
 - EDIF — список соединений в формате EDIF,
 - Project — проект ПЛИС,
 - PSpice Model — файл математической модели в формате PSpice;
 - PSpice Stimulus — файл внешнего воздействия в формате PSpice;
 - Implementation name — имя иерархического блока;
 - Path and filename — полное имя файла, в котором находится описание иерархического блока (не указывается, если файл размещается в каталоге текущего проекта, в этом случае в качестве имени его папки принимается имя иерархического блока);
- Primitive — тип блока: Yes — элементарный блок; No — блок, имеющий иерархическую структуру, Default — устанавливается по умолчанию (в соответствии с настройкой конфигурации на закладке Hierarchy команды (Options>Design Template).

Затем рисуется контур блока. При выделенном блоке по команде (Place / Hierarchical Pin) вводятся имена выводов блока. В диалоговом окне команды указываются (рисунок 36):

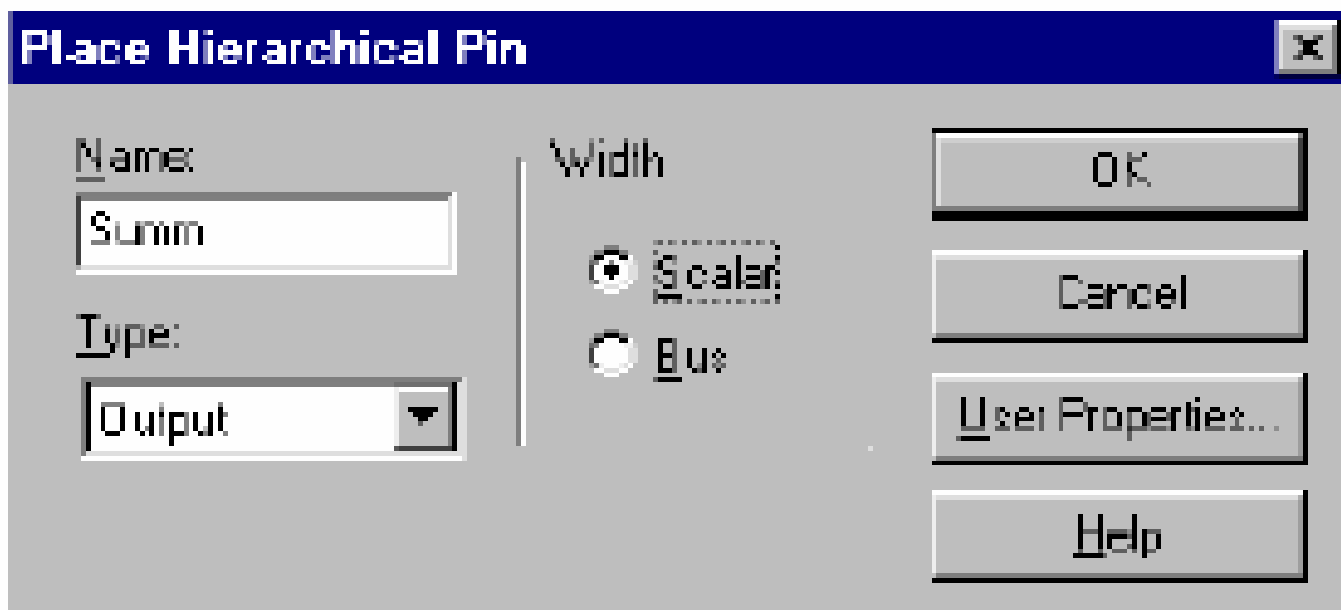


Рисунок 36

- на панели Name – имя вывода;
- на панели Type – тип вывода (вход, выход и т.д.);
- на панели Width – тип цепи (scalar – единичная цепь, bus - шина).
- Размещение символов соединителей страниц Place/Off-Page Connector. Цепи, расположенные на одной или разных страницах схемы и имеющие одинаковые имена, считаются электрически соединенными.

Этап 3 Моделирование. Задание на моделирование по команде (PSpice/New Simulation Profile) заносится в так называемый профайл (*.SIM).

В поле Analysis type выбирается тип анализа, а в поле Options по умолчанию устанавливается выбранный вид анализа (General Settings) и в дополнение к основному виду анализа можно задать дополнительные анализы.

1 AC Sweep — анализ частотных характеристик и уровня шума (рисунок 37) - определение реакции цепи на изменение частоты. Поскольку анализ является линейным, определяется только амплитуда и фаза реакции цепи, напряжение и ток не ограничиваются. Рекомендуется проводить анализ при назначении единичной амплитуды источника. При этом относительная величина выходного сигнала определяется по отношению к амплитуде входного, т.е. к 1.

При анализе шумов рассчитывается следующая информация для каждой частоты, для которой производится анализ:

- шум, генерируемый на выходе некоторого устройства, который складывается из шумов, генерируемых каждым резистором и полупроводником, из которых состоит данное устройство.

- общий выходной и эквивалентный входной шум.

При вычислении полного шума на выходе цепи определяется средне-квадратическая сумма шумов, генерируемых всеми «шумящими» элементами цепи.

При вычислении эквивалентного входного шума общий выходной шум делится на шум, который распространяется по анализируемой цепи от входа к выходу.

В разделе AC Sweep Type определяется характер изменения частоты:

- Linear — линейная шкала;
- Octave — изменение частоты октавами;
- Decade — изменение частоты декадами.

В разделе Sweep Parameters задаются параметры диапазона частот:

- Total Pts., Pts/Decade, Pts/Octave — общее количество точек при выборе линейного масштаба или количество точек по частоте на одну декаду или октаву;

- Start. Freq. — начальная частота (например, 100k — означает 100 кГц);
- End Freq. — конечная частота (например, 10G — означает 10 ГГц).

В разделе Noise Analysis устанавливаются параметры расчета спектральной плотности внутреннего шума:

- Noise Enabled — включение режима расчета уровня шума;
- Output Voltage — выходное напряжение;
- I/V Source — имя входного источника напряжения или тока;
- Interval — интервал расчета парциальных уровней шума.

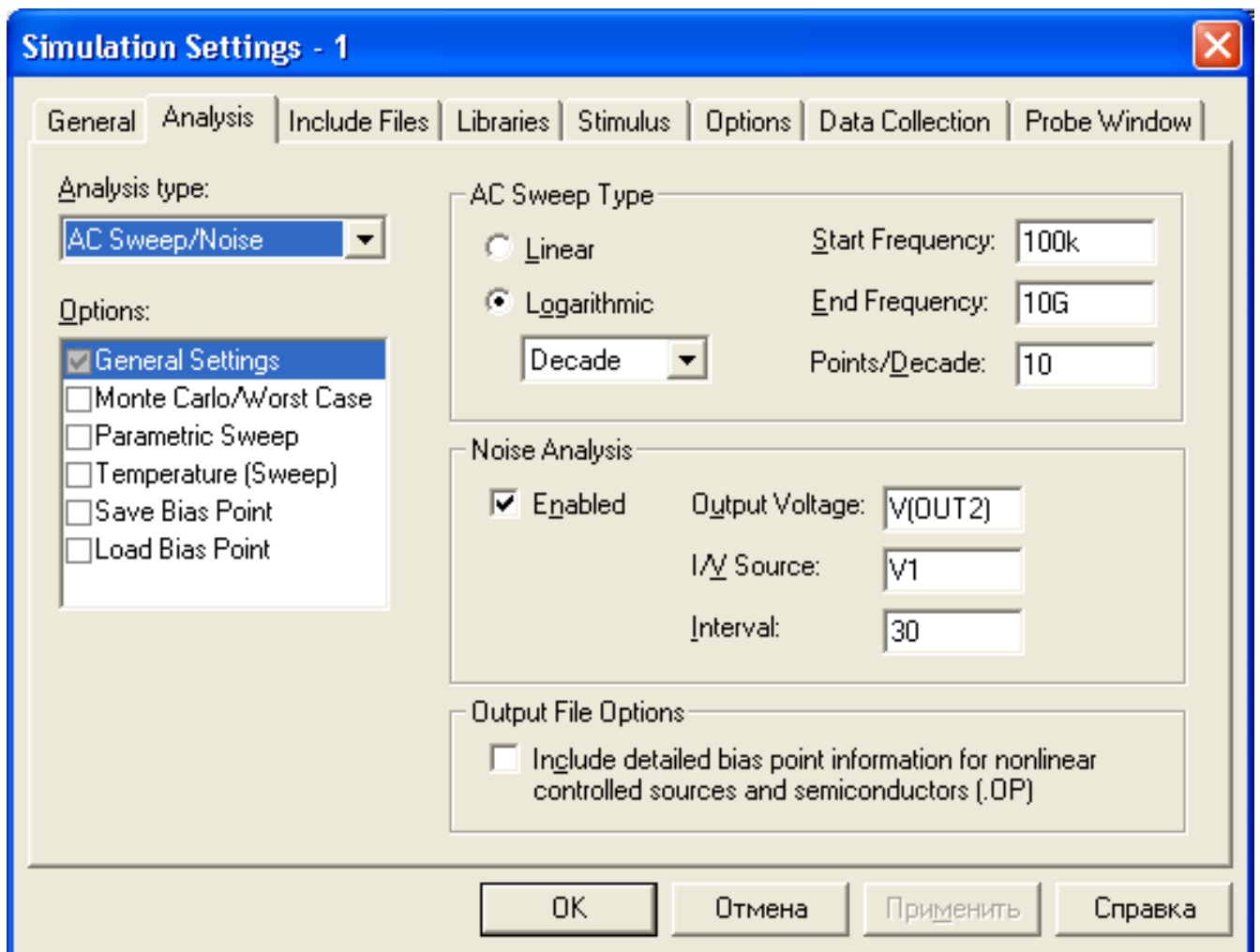


Рисунок 37

Пусть для представленной на рисунке 38 схемы фильтра необходимо получить АЧХ и ФЧХ.

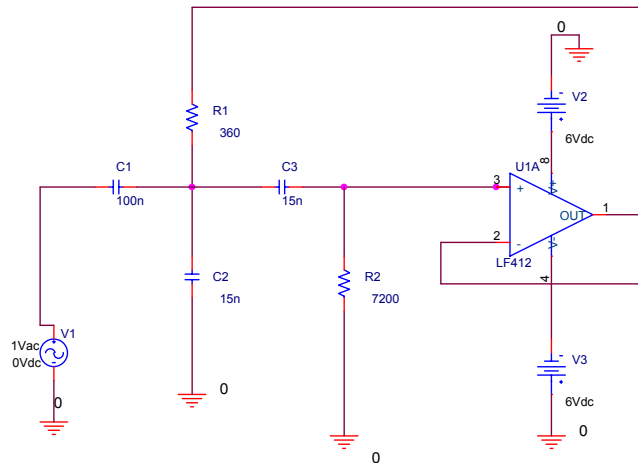


Рисунок 38

Запуск моделирования выполняется по команде **PSpice/Run**. Его ход и результаты отображаются на экране программы PSpice.

В случае отсутствия ошибок на экране пользователя возникает пустая система координат. Построение необходимого графика выполняется командой Add Trace меню Trace. В появившемся далее окне Add Traces необходимо указать вид характеристики, а также устройство, на входе или выходе которого необходимо получить изображение характеристики.

Так как выходной сигнал фильтра получают с вывода OUT операционного усилителя LF412, то в появившемся окне Add Traces (рисунок 39) для построения АЧХ необходимо в поле Simulation Output Variables указать V(U1A:OUT) и нажать кнопку ОК.

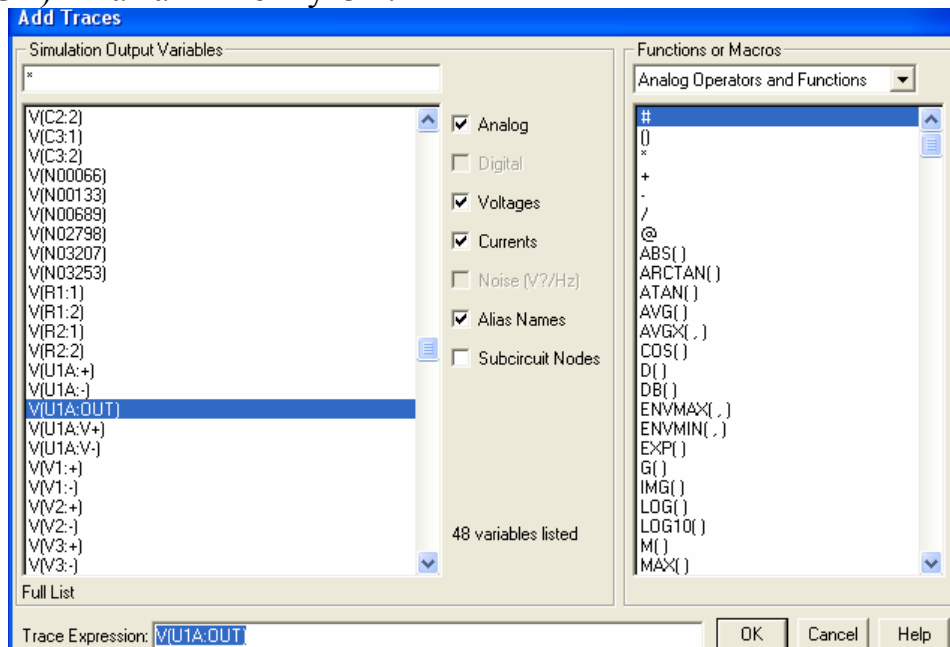


Рисунок 39

В представленной ранее системе координат будет построена АЧХ схемы.

Для удобства рекомендуется изображать в одном окне графики АЧХ и ФЧХ. Добавление еще одной системы координат для ФЧХ (рисунок 40) осуществляется командой Add Plot To Window меню Plot.

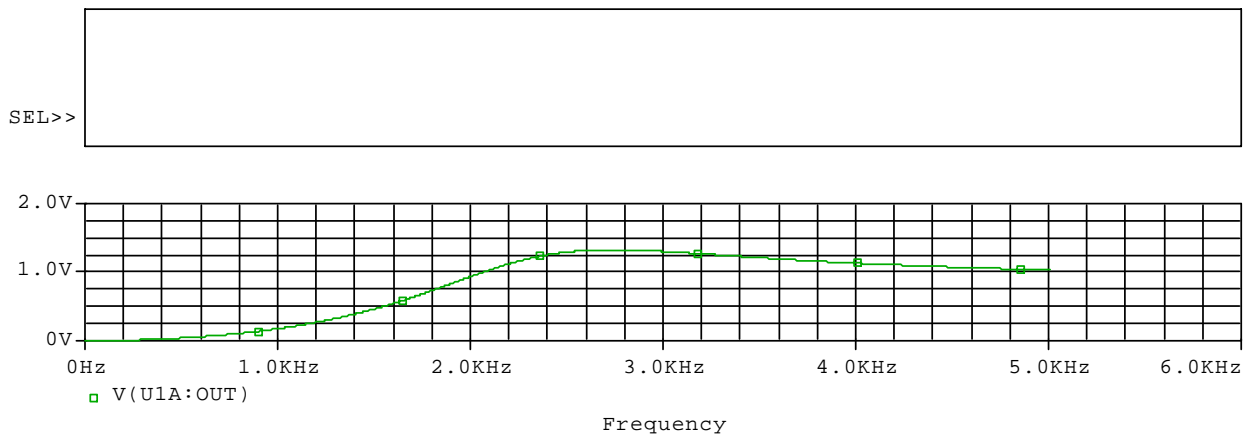


Рисунок 40

Для построения ФЧХ в новой системе координат в появившемся окне Add Traces необходимо в поле Functions or Macros выбрать тип характеристики P() (от англ. Phase – фаза), а в поле Simulation Output Variables указать V(U1A:OUT) и нажать кнопку ОК. Для копирования полученных характеристик (рисунок 41) выполняется команда Copy to Clipboard меню Window.

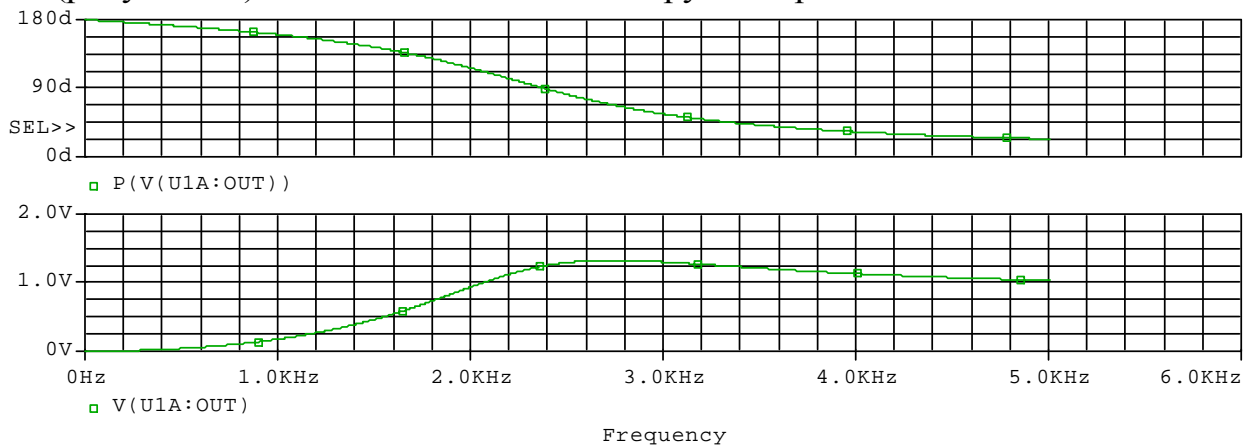


Рисунок 41

2 DC Sweep — вариация параметров при расчете режима по постоянному току (рисунок 42).

Расчет режима по постоянному току производится при вариации одного или нескольких источников постоянного напряжения или тока, температуры, параметров моделей компонентов схемы. Начальное приближение для цепи рассчитывается для каждой перебираемой величины. Это полезно для нахождения передаточной функции усилителя, пороговых значений «0», «1» для логических схем. При вычислении реакции аналоговой цепи на воздействие постоянного тока временной анализ не производится. Это осуществляется путем исключения из схемы конденсаторов, закорачивания всех индуктивностей и использования только постоянных составляющих источников напряжения и тока. Аналогично анализируются цифровые схемы: задержки распространения сигнала полагаются равными нулю и значения всех источников сигналов устанавливаются в соответствии их величинам в нулевой момент времени. Для решений уравнений в цепи используется итеративный алгоритм. Для аналоговых цепей эти уравнения являются непрерывными, а для цифровых логическими.

В разделе Sweep Var. Type задается тип варьируемого параметра:

- Voltage Source — источник напряжения;

- Temperature — температура;
- Current Source — источник тока;
- Model Parameter — параметр модели компонента;
- Global Parameter — глобальный параметр.

В зависимости от выбранного типа параметра заполняются одно или несколько строк:

- Name — имя варьируемого параметра (для параметров типа Voltage Source, Current Source, Global Parameter);
- Model Type — тип модели, например, RES, DIODE, NPN (для Model Parameter);
- Model Name — имя модели, например KT315A (для Model Parameter);
- Param. Name — имя параметра (для Model Parameter, Global Parameter).

В разделе Sweep Type задается тип вариации параметра:

- Linear — линейный масштаб;
- Octave — логарифмический масштаб октавами;
- Decade — логарифмический масштаб декадами;
- Value List — в виде списка параметров.

Пределы изменения параметров задаются на строках:

- Start Value — начальное значение;
- End Value — конечное значение;
- Increment — приращение;
- Pts/ Decade (Octave) — количество точек на одну декаду (октаву);
- Values — список параметров.

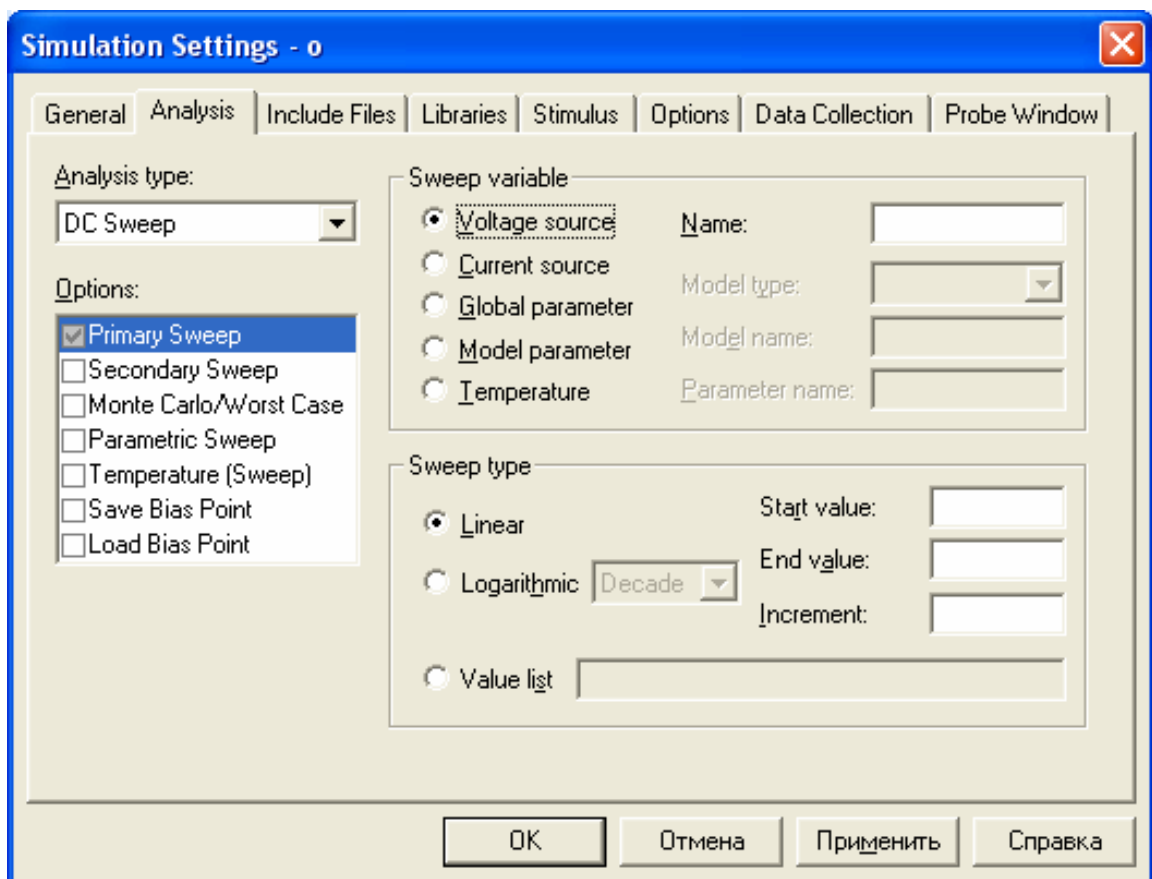


Рисунок 42

3) Time Domain (Transient) – анализ переходных процессов (рисунок 43).

Во время анализа задается величина временного шага, который непрерывно изменяется с требуемой точностью до тех пор, пока величина шага не становится предельно допустимой. Если моделируемые процессы являются медленно изменяющимися, величина временного шага увеличивается, а для быстропеременных процессов – уменьшается.

Максимальная величина временного шага задается опцией Maximum step size. В поле Run to time проставляется время моделирования.

Если пометить галочкой строку [SKIPBP], то отменяется расчет схемы по постоянному току.

Режим вывода информации определяется параметром Start saving data after ... При нулевом значении этого параметра осциллограммы переходных процессов выдаются на экран с момента времени $t = 0$.

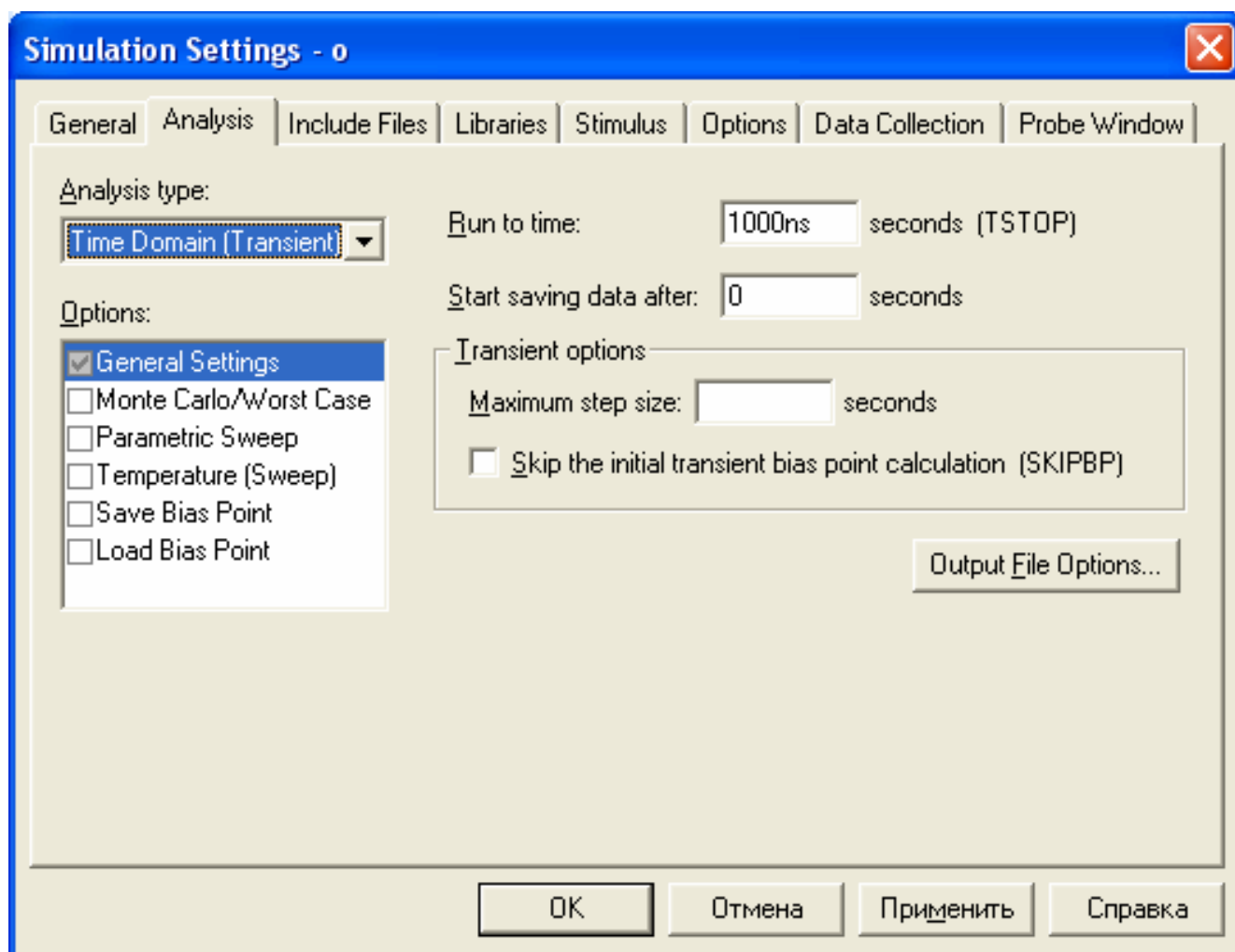


Рисунок 43

Пусть для представленной на рисунке 44 схемы необходимо получить импульсную характеристику.

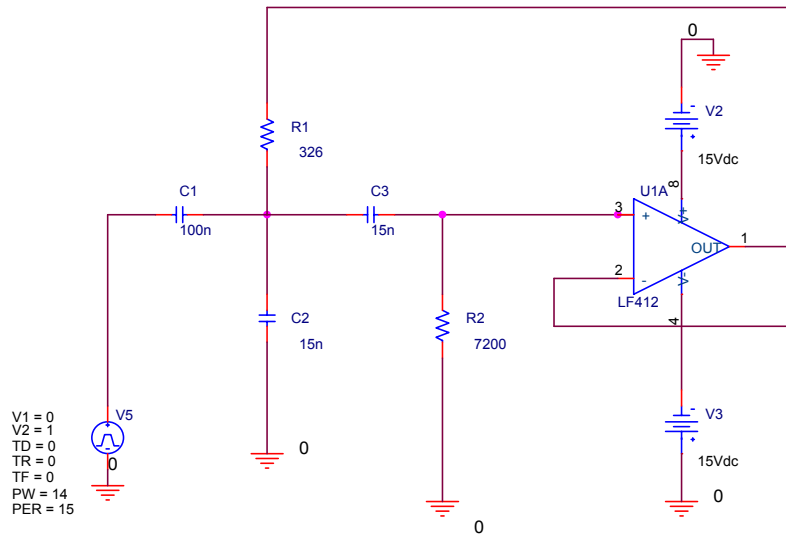


Рисунок 44

Запуск моделирования выполняется по команде **PSpice/Run**. Его ход и результаты отображаются на экране программы PSpice.

В случае отсутствия ошибок на экране пользователя возникает пустая система координат. Построение необходимого графика выполняется командой Add Trace меню Trace. В появившемся далее окне Add Traces необходимо указать вид характеристики, а также устройство, на входе или выходе которого необходимо получить изображение характеристики.

Так как выходной сигнал фильтра получают с вывода OUT операционного усилителя LF412, то в появившемся окне Add Traces для построения импульсной характеристики необходимо в поле Simulation Output Variables указать V(U1A:OUT) и нажать кнопку ОК. Для копирования полученной характеристики (рисунок 45) выполняется команда Copy to Clipboard меню Window.

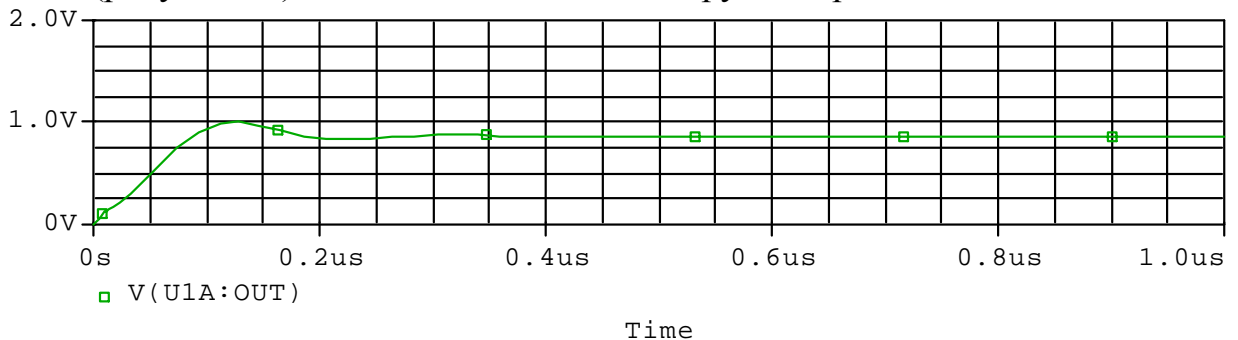


Рисунок 45

4) Bias Point – анализ начального приближения (рисунок 46).

Анализ начального приближения осуществляется для любого вида анализа, вне зависимости от того включено или нет проведение этого анализа. Если анализ выключен, то в выходной файл выдаются только аналоговые напряжения и состояния узлов в цифровых схемах. При включенном анализе в выходном файле содержится:

- список всех напряжений аналоговых узлов,
- список всех состояний цифровых узлов,
- для каждого источника напряжения задаются его ток и мощность,

- список малосигнальных параметров для всех устройств.
- Перед проведением анализа задаются его настройки:
- расчет начального приближения для нелинейных управляемых источников и полупроводников,
 - расчет чувствительности,
 - расчет малосигнальных импульсов

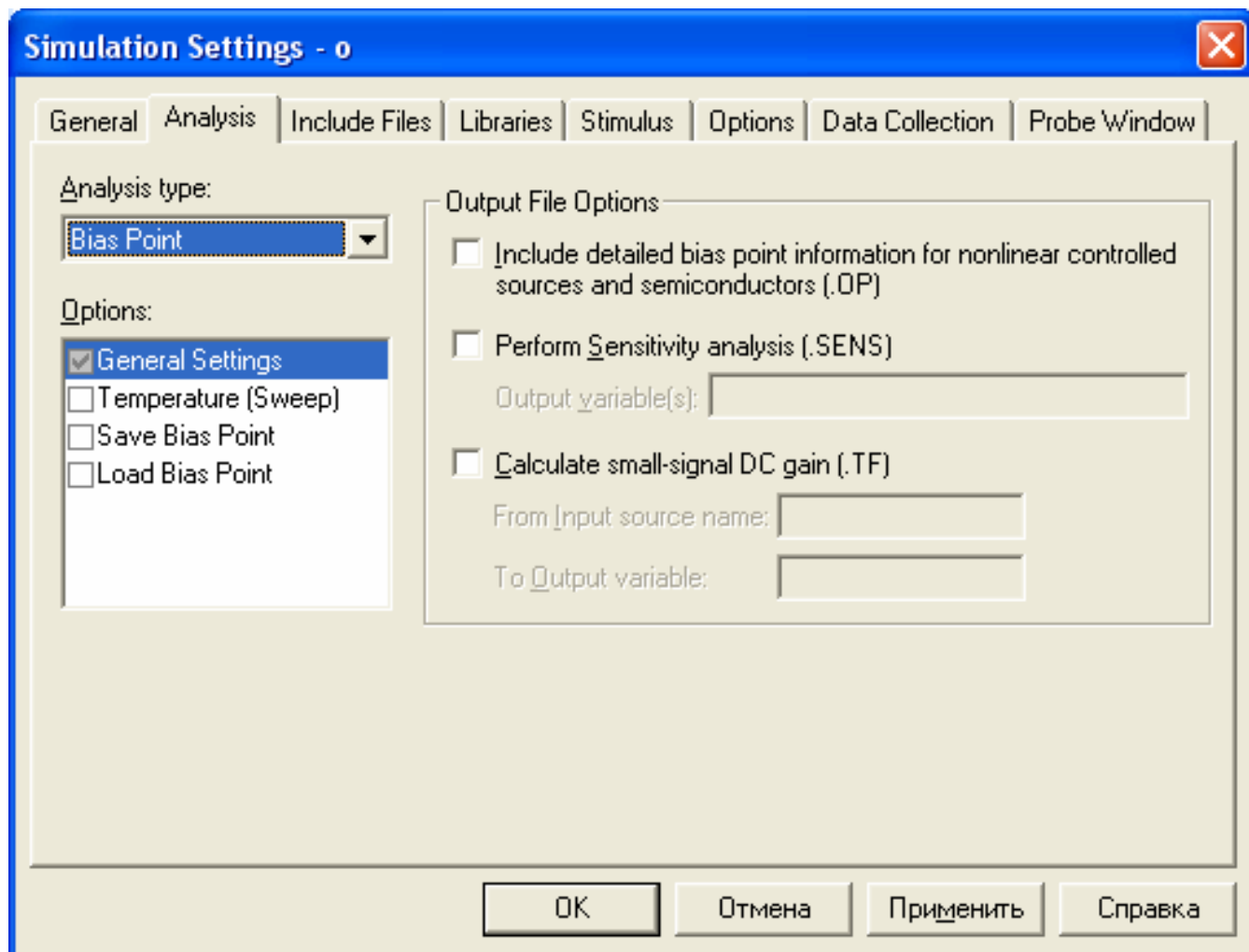


Рисунок 46

Дополнительные виды анализа:

- **Monte Carlo/Worst Case** — статистический анализ по методу Монте-Карло и расчет наихудшего случая.

- **Load Bias Point** — загрузка данных режима по постоянному току. Из файла, созданного в предыдущем сеансе работы с программой PSpice, считываются узловые потенциалы по постоянному току.

- **Save Bias Point** — сохранение данных режима по постоянному току. В файл с указанным именем записываются значения узловых потенциалов схемы для анализа указанного вида.

- **Parametric** — многовариантный анализ.

Варьироваться могут все параметры всех моделей компонентов

- **Temperature** — вариация температуры

Библиографический список

Основная литература:

1. Автоматизация схемотехнического проектирования: Учебное пособие для вузов./В.Н.Ильин, В.Т.Фролкин, А.И. Бутко и др.; Под ред. В.Н.Ильина. - М: Радио и связь,1987.
2. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. - М.: СОЛОН-Р, 2001.
3. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. В 4 выпусках. - М: Радио и связь, 1992
4. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств/З.М. Бененсон, М.Р.Елистратов, Л.К. Ильин и др.; Под ред. З.М. Бененсона. - М.:Радио и связь, 1981.
5. И. Влах, К. Сингхал. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем.: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1998.
6. Автоматизация схемотехнического проектирования / В.Н.Ильин, В.Т. Фролкин, А.И. Бутко и др. Под ред. проф. В.Н.Ильина. Учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов. М.: Сов. Радио,1987.
7. Архангельский А.Я., Савинова Т.А. Справочное пособие по PSPICE и DESIGN CENTER. М.: МИФИ, 1996.
8. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. Уч. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002.
9. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Уч. пособие для вузов/ О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др. Под ред. О.В. Алексеева – М.: Высшая школа, 2000.

Дополнительная литература

1. Калабеков Б.А. Применение ЭВМ в инженерных расчетах в технике связи. - М.:Радио и связь, 1981.
2. Калабеков Б.А., Лapidус В.Ю., Малафеев В.М. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи: Учебное пособие для вузов. - М: Радио и связь, 1990.
3. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987(1989).- 240 с.
4. Дьяконов В.П. Применение персональных ЭВМ и программирование на языке Бейсик.- М.: Радио и связь, 1989. - 288 с.
5. Нерртер В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 220 с.
6. Чуа Л.О, Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. Пер. с англ. - М.: Энергия, 1980.-640 с.
7. Ильин В.Н., Коган В.Л. Разработка и применение программ автоматизации схемотехнического проектирования.- М.: Радио и связь, 1984.- 368 с.
8. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник/Е.В. Авдеев, А.Т. Еремин, И.П. Норенков, М.И. Песков;Под ред. И.П. Норенкова.-М.:Радио и связь, 1986.- 368 с.

9. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1988.- 560 с.
10. Диалоговые системы схемотехнического проектирования/ В.И. Анисимов, Г.Д. Дмитриевич, К.Б. Скобельцын и др.; Под ред. В.И. Анисимова.- М.: Радио и связь, 1988. - 288 с.
11. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1988.- 335 с.
12. Rubner-Petersen T. A Nonlinear Analysis Program for electronic circuits. User manual.-Lyngby: Technical University of Denmark, 1973.-107 p.
13. Micro-CAP and Micro-LOGIC/ Byte.- 1986.- v.11.- No 6.- p.186.
14. Micro-CAP. Andrew V. Thompson. Spectrum Software.1983.
15. Laurenze W. SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits. Memorandum No. ERL-M520.
16. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2 т.: Мир, 1986.
17. Транзисторы: Справочник/О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев.-М.:Радио и связь, 1990, 272 с.
18. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник/А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков и др. Под ред. А.В. Голомедова.-М.:Радио и связь, 1988, 528 с.
19. Цифровые и аналоговые интегральные схемы:Справочник./С.В. Якубовский, Л.И. Ниссельсон, В.И. Кулешова и др.; Под ред. С.В. Якубовского.- М.:Радио и связь, 1990.- 496 с.
20. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 4-е, перераб. и доп. М:-Энергия, 1977.- 672 с.
21. Чоговадзе Г.Г. Персональные компьютеры. М.: Финансы и статистика, 1989.-208 с.
22. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 выпусках. М:Радио и связь, 1992 г.