



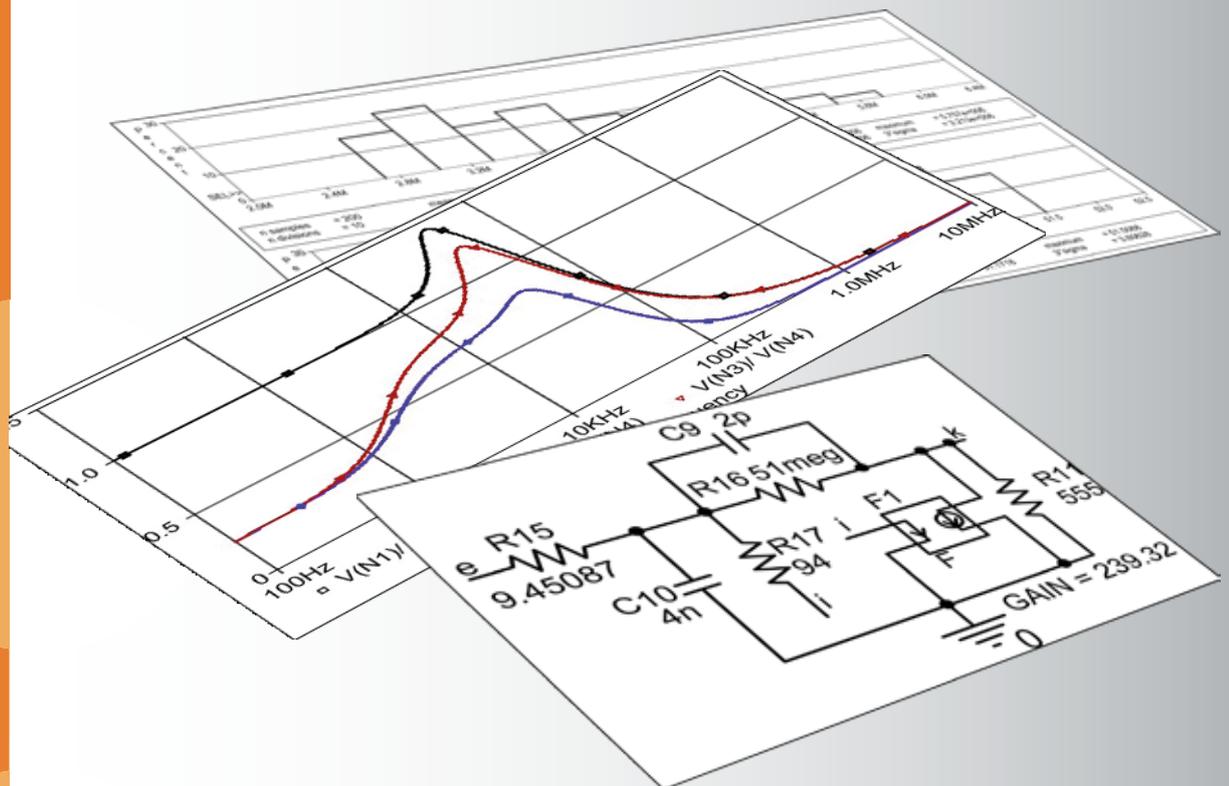
СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

Ф. Г. Зограф

Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС

- Лабораторный практикум



Красноярск
2011

УДК 621.37:004.94:004.42
ББК 32.21-02-5-05.я7
3-78

Рецензент – доцент С. И. Трегубов

Рекомендовано Учебно методическим советом Института инженерной физики и радиоэлектроники СФУ

3-78 Зограф Ф. Г.

Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств: лабораторный практикум [Электронный ресурс] / Ф. Г. Зограф. – Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2011. – 120 с.

ISBN 978-5-7638-2170-3

Изложено описание цикла лабораторных работ по дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств». Приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для подготовки к выполнению, описание и порядок выполнения лабораторных работ. Определены общие требования к оформлению и содержанию отчетов по лабораторным работам, составу и структуре лабораторных занятий. Основной материал практикума ориентирован на освоение приемов аналогового схемотехнического моделирования в среде OrCAD PSpice.

Лабораторный практикум предназначен для студентов направления подготовки 210000 – «Электронная техника, радиотехника и связь». Практикум также может быть использован в подготовке студентов изучающих электротехнику и автоматизированное проектирование электронных устройств.

УДК 621.37:004.94:004.42
ББК 32.21-02-5-05.я7

Учебное издание

Редактор О. Ф. Александровна

Уч.-изд. л. 7,5.

Тиражируется на машиночитаемых носителях

Заказ № 3220

Редакционно-издательский отдел
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660074 г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел./факс (391) 244-82-31
E-mail: rio@sfu-kras.ru

ISBN 978-5-7638-2170-3

© Сибирский федеральный университет, 2011

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Используемое оборудование и программное обеспечение	6
Состав, структура и порядок проведения лабораторных занятий.....	7
Оценивание результатов	9
Ограничения и требования.....	9
Общие требования к оформлению и содержанию отчетов по лабораторным работам.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 Статический, частотный и временной анализ пассивной линейной RLC цепи.....	11
Цель работы.....	11
Основные теоретические положения.....	11
Подготовка к работе.....	13
Лабораторное задание	13
Порядок выполнения работы и рекомендации	14
Ввод и подготовка схемы.....	14
Анализ статического режима. Напряжения узлов схемы, токи и потребляемые мощности элементов.....	15
Анализ статического режима. Малосигнальная передаточная функция, входное и выходное сопротивления	20
Частотный анализ. АЧХ	23
Частотный анализ. ФЧХ.....	29
Частотный анализ. Групповое время запаздывания	30
Частотный анализ. АФЧХ.....	31
Динамический анализ. Переходные характеристики.....	36
Динамический анализ. Импульсные характеристики	38
Обработка экспериментальных данных	40
Содержание отчета	40
Контрольные вопросы	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Исследование моделей полупроводниковых приборов	42
Цель работы.....	42
Основные теоретические положения.....	42
Подготовка к работе. Часть 1	46
Лабораторное задание. Часть 1	47
Порядок выполнения и рекомендации. Часть 1.....	47
Создание условного графического обозначения транзистора средствами Model Editor	47
Подключение библиотек модели и символа компонента к проекту ..	51
Построение выходных ВАХ БТ	52



Построение входных ВАХ БТ	58
Подготовка к работе. Часть 2	62
Лабораторное задание. Часть 2	62
Порядок выполнения и рекомендации. Часть 2.....	62
Ввод и подготовка схемы	62
Анализ по постоянному току	65
Частотный анализ	67
Временной анализ. Переходные характеристики в области больших времен	68
Временной анализ. Переходные характеристики в области малых времен	69
Временной анализ. Отклики на синусоидальное воздействие в установившемся режиме.....	69
Временной анализ. Отклики на синусоидальное воздействие. Анализ Фурье.....	71
Обработка экспериментальных данных	73
Содержание отчета	74
Контрольные вопросы	74
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Исследование шумовых и температурных свойств усилительного каскада на биполярном транзисторе.....	75
Цель работы.....	75
Основные теоретические положения.....	75
Подготовка к работе.....	79
Лабораторное задание	79
Порядок выполнения работы и рекомендации	80
Ввод и подготовка схемы.....	80
Анализ шумов	81
Температурный анализ. Подготовка схемы	84
Температурный анализ. Temperature (Sweep).....	84
Температурный анализ. Parametric Sweep. Анализ эффективности. 86	
Обработка экспериментальных данных	89
Содержание отчета	89
Контрольные вопросы	89
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Параметрическая оптимизация, анализ чувствительности и исследование влияния разброса параметров элементов на характеристики схемы.....	90
Цель работы.....	90
Основные теоретические положения.....	90
Подготовка к работе.....	94



Лабораторное задание	94
Порядок выполнения и рекомендации	95
Подготовка схемы	95
Анализ чувствительности методом приращений в ручном режиме .	98
Задание допусков параметров элементов.....	99
Расчет на наихудший случай	100
Анализ Монте-Карло	101
Параметрическая оптимизация. Создание целевых функций для оптимизации рабочей точки	104
Параметрическая оптимизация в PSpice Advanced Analysis.....	106
Параметрическая оптимизация. Оценка результатов	109
Содержание отчета	110
Контрольные вопросы.....	110
Список литературы.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	119
Примечания	120



ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения лабораторных работ по курсу «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств» является:

- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных занятиях;
- изучение структуры, состава и принципов функционирования систем автоматизированного компьютерного проектирования для разработки и исследования радиотехнических устройств;
- получение и закрепления навыков по проведению математического моделирования и вычислительных экспериментов по заданной программе с использованием программных пакетов САПР;
- формирование умений интерпретировать результаты компьютерного моделирования и принимать решения по оптимизации параметров и характеристик РЭС;
- закрепление навыков работы на ЭВМ.

Используемое оборудование и программное обеспечение

Лабораторные работы проводятся в учебном классе, оснащенном персональными компьютерами или специализированными рабочими станциями, с установленными программами позволяющими проводить схемотехническое моделирование РЭС. Предпочтительно использование программных пакетов применяемых на производстве при проектировании РЭС.

Данное учебно-методическое пособие, прежде всего, ориентировано на использование в качестве программного средства САПР РЭС семейства программ Cadence OrCAD версий 9.1-16.3 работающих на платформе OS Windows. Для освоения лабораторного практикума достаточно демо-версии пакета OrCAD.

Программа схемотехнического моделирования PSpice входящая в состав пакета OrCAD, как и большинство существующих программ-имитаторов в этой области, основана на системе моделирования SPICE. Принципы и приемы SPICE-моделирования используемые в OrCAD справедливы для любых SPICE-подобных и SPICE-основанных систем моделирования входящих в состав программных пакетов САПР РЭС, таких как Altium, Proteus, Multisim и др.

Предполагается, что основные навыки построения схем в редакторе OrCAD Capture студентами уже получены самостоятельно или на водных занятиях.



Состав, структура и порядок проведения лабораторных занятий

Лабораторные занятия проводятся в объеме 18 аудиторных часов в соответствии с графиком учебного процесса и включают выполнение четырех лабораторных работ. Подготовка к лабораторным работам, обработка результатов и оформление отчетов предполагает 12 часов самостоятельной работы. Темы лабораторных работ и объем учебной работы приведены в **табл. 1**.

Таблица 1

Номер ЛР	Название лабораторной работы	Объем учебной работы, час	
		Аудиторные занятия	Самостоятельная работа
1	Статический, частотный и временной анализ пассивной линейной RLC цепи	5	2
2	Исследование моделей полупроводниковых приборов	6	4
3	Исследование шумовых свойств усилительного каскада на биполярном транзисторе	2	2
4	Параметрическая оптимизация, анализ чувствительности и исследование влияния разброса параметров элементов на характеристики схемы	5	4

Каждая лабораторная работа включает ряд этапов: выдача задания, подготовка, допуск, выполнение, обработка, оформление, сдача и защита.

Выдачу задания на лабораторную работу осуществляет преподаватель, во время аудиторных часов отведенных на лабораторные занятия. За каждым студентом закрепляется вариант, в соответствии с которым определяются параметры в конкретных лабораторных работах.

Допускается, индивидуальное изменение заданий, по согласованию с преподавателем и при условии выполнения основных целей указанных в лабораторной работе.

Теоретическая **подготовка** к лабораторной работе производится во внеаудиторное время и включает:

- уяснение цели выполнения работы;
- разбор сущности изучаемого явления и теоретических основ предстоящего эксперимента;
- проработку инструкции к работе;
- усвоение последовательности операций при постановке эксперимента;
- выяснение, какие показания следует фиксировать и какие наблюдаемые параметры подлежат регистрации.

При проработке теоретических вопросов не следует ограничиваться только инструкциями к работам, нужно использовать конспекты лекций,

учебных пособия и другую литературу по предмету и базовым дисциплинам радиотехнического профиля, включая как уже пройденный материал («Математика», «Физика», «Информатика», «Основы теории цепей», «Электроника»), так и осваиваемый параллельно («Схемотехника АЭУ», «Радиотехнические цепи и сигналы»).

Необходимо обращать внимание на четкое усвоение терминов, понятий, законов используемых в ходе лабораторных занятий, без этого практическая работа теряет смысл.

Некоторые практические части подготовки к лабораторным работам, такие как предварительные расчеты, требующие консультации преподавателя, могут выполняться в рамках аудиторных практических занятий или консультаций.

Допуск к выполнению лабораторной работы осуществляется преподавателем по результатам тестирования (или устного опроса). В ходе допуска проверяется готовность студентов к выполнению лабораторной работы, уровень теоретической подготовки, понимание сущности предстоящей работы, наличие подготовленных письменных или электронных материалов (таблиц для записи экспериментальных данных, заготовок для графиков и т. д.).

После получения допуска, студент может приступить к **выполнению** лабораторной работы. Все студенты выполняют работу индивидуально, под общим руководством преподавателя, и в соответствии с лабораторным заданием и порядком выполнения работы.

В процессе выполнения задания, студентом, тщательно фиксируются (вручную или средствами ПО ПК) все значения контролируемых параметров и характеристик, вносимые изменения и производимые действия. По завершению задания преподаватель проверяет полученные студентом результаты и фиксирует окончание выполнения лабораторного задания.

В крайних случаях (из-за болезни и т. п.), поскольку специфика предмета позволяет, то по согласованию с преподавателем допускается выполнение лабораторных заданий в неаудиторное время в компьютерном классе (с разрешения обслуживающего персонала) или в домашних условиях на ПК с демо-версиями используемых программ.

После выполнения лабораторного задания студент приступает к **обработке** полученных данных и **оформлению** отчета. Данные этапы могут выполняться студентом как во время аудиторных занятий (при досрочном завершении лабораторного задания), так и во время самостоятельной работы. При обработке данных и оформлении приветствуется использование персонального компьютера и соответствующих программных средств (математических и офисных) – Word, Excel, Visio, Mathcad, Matlab и т. п.

Подготовленный студентом отчет проверяется преподавателем и при соответствии формальным признакам (правильность оформления и полнота содержания), студент допускается к **защите**, которая проводится преподавателем в форме тестирования или устного опроса по контрольным вопросам.

Оценивание результатов

Результаты выполнения студентом лабораторной работы оцениваются в рамках кредитно-рейтинговой системы в соответствии с Положением об организации учебного процесса ВУЗа с использованием системы зачетных единиц. Примерная относительная трудоемкость этапов выполнения лабораторной работы приведена в [табл. 2](#).

Таблица 2

Относительная трудоемкость этапов выполнения лабораторной работы

Этап выполнения лабораторной работы	получение допуска	выполнение лабораторного задания	оформление отчета	защита
Коэффициент трудоемкости	0,05	0,15	0,1	0,7

При оценивании по традиционной системе (зачет/незачет), выполнение лабораторной работы зачитывается по факту выполнения всех этапов.

Ограничения и требования

Не допускается:

- защита более одной лабораторной работы за занятие;
- защита лабораторных работ во время сессии без оснований, заверенных деканатом.

Лабораторная работа **не принимается к защите** если:

- выполненная работа не соответствует варианту;
- при проверке был зафиксирован факт плагиата (отчет списан);
- неправильно оформлен титульный лист;
- отсутствуют пояснения и интерпретация полученных результатов, отсутствуют выводы, подробные расчеты, исходные формулы и т. п.;
- при оформлении отчета допущены многочисленные, грубые нарушения стандарта предприятия.

Лабораторная работа **не засчитывается** если:

- студент, по требованию преподавателя, не может продемонстрировать выполнение на ЭВМ любой из использованных при выполнении лабораторной работы процедур.

Общие требования к оформлению и содержанию отчетов по лабораторным работам

После выполнения лабораторной работы необходимо подготовить отчет по работе, *отражающий все этапы подготовки и выполнения лабораторной работы* и оформленный в соответствии со стандартом ВУЗа.

Отчет должен содержать:

● титульный лист, оформленный в соответствии со стандартом ВУЗа с указанием:

- названия ВУЗа, института, кафедры и предмета;
- номера и названия лабораторной работы;
- номера группы, варианта, ФИО студента подготовившего отчет;
- должность, звание, ФИО преподавателя проверяющего отчет.
- цели лабораторной работы;
- схемы и параметры анализируемых цепей;
- исходные соотношения, расчеты и графики, полученные при подготовке к выполнению лабораторной работы;
- результаты, полученные при работе на ЭВМ, оформленные в виде таблиц и графиков;
- обсуждение полученных результатов, выводы по работе.

Использованные источники

При подготовке теоретических разделов лабораторного практикума использовались материалы следующих источников: по первой работе – [13, 21], по второй – [20, 23], по третьей – [7], по четвертой – [1, 2, 3, 9, 11].

При написании основного материала лабораторного практикума использовались [3, 5, 6, 10, 12, 16, 18, 22], а также справочная система программного пакета Cadence OrCAD 16.0.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Статический, частотный и временной анализ пассивной линейной RLC цепи

Цель работы

Приобретение навыков построения и анализа аналоговых схем по постоянному току, в частотной и временной областях с помощью ЭВМ (пакет OrCAD).

Основные теоретические положения

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на **активные** и **пассивные**. Активным называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия. К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или (и) алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются **линейными**, в противном случае они относятся к классу **нелинейных**. Строго говоря, все элементы являются нелинейными. Возможность рассмотрения их как линейных, что существенно упрощает математическое описание и анализ процессов, определяется границами изменения характеризующих их переменных и их частот. Коэффициенты, связывающие переменные, их производные и интегралы в этих уравнениях, называются **параметрами** элемента.

Электрическая цепь называется **линейной**, если она состоит из элементов, у которых зависимость между током и напряжением, током и потокосцеплением, зарядом и напряжением линейная, т. е. такая цепь состоит только из линейных элементов. В противном случае электрическая цепь называется **нелинейной**.

Для линейных цепей законы Кирхгофа записываются в виде системы линейных уравнений, в результате решения которой определяется режим работы электрической цепи. Для расчета сложных линейных электрических цепей применяются методы: контурных токов, наложения, эквивалентного генератора и др. В программе PSpice как и большинстве программ автоматизированного моделирования электрических цепей используется метод основанный на **методе узловых потенциалов**).

Различают электрические цепи постоянного и переменного тока, среди последних, наиболее распространены цепи гармонического тока. В них ЭДС и токи представляют собой синусоидальные функции времени одной частоты.



В моделирование электрических цепей выделяют ряд задач, среди которых одни из основных: анализ по постоянному току, анализ временных откликов и анализ частотных свойств цепи.

Программа OrCAD PSpice позволяет проводить все три типа анализа.

Bias Point – анализ цепи по постоянному току в рабочей точке. **Bias Point** – точка смещения. Анализ по постоянному току позволяет получать характеристики схемы: токи, напряжения и рассеиваемые мощности. Все напряжения, вычисляемые PSpice, являются напряжениями между отдельными точками схемы и одной опорной общей точкой, местоположение которой задается пользователем.

AC Sweep – анализ по переменному току. **AC** – alternating current – переменный ток. **Sweep** – вариация, изменение. Свип-сигнал – это колебание постоянной амплитуды с непрерывно меняющейся частотой.

Анализ по переменному току позволяет анализировать частотные отклики схем, производить построение амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик схемы для токов, напряжений, мощностей и т. п.. Анализ производится при наличии в схеме источников имеющих в своих параметрах атрибут **AC** или **ACMAG**, таких как источник переменного тока **IAC** или источника переменного напряжения **VAC**, для которых указываются амплитудное значение переменной составляющей и величина постоянной составляющей (в частном случае может быть принята равной нулю). При анализе задаются минимальное значение частоты, максимальное значение частоты, и для линейного шага по частоте – общее число точек, а для логарифмического – число точек на декаду или октаву.

Time Domain (Transient) – анализ переходных процессов. **Time Domain** – временная область, а **transient** – переходной.

Анализ переходных процессов позволяет получать значения характеристик схемы (токов, напряжений, мощностей и т. д.) при переходном процессе. Анализ переходных процессов всегда начинается с момента времени $t = 0$. Указывается время окончания анализа переходного процесса (**Run to time**) и максимальный шаг интегрирования (**Maximum step size**). Если требуется информация о переходном процессе с момента времени $t > 0$, это время задается (**Start saving data after**), при этом обеспечивается получение графической информации с заданного момента времени, хотя сам анализ осуществляется с момента времени $t = 0$. При анализе указывается параметр, определяющий режим расчета начального приближения по постоянному току (**Skip the initial transient bias point calculation**). По умолчанию он выключен, и анализ по постоянному току автоматически предваряет анализ переходных процессов. Результаты анализа по постоянному току в этом случае являются начальными значениями переменных при анализе переходных процессов. В случае отключения этого параметра за начальные значения принимаются токи в индуктивностях и напряжения на емкостях указанные в свойствах элементов.

Существует возможность наблюдать результаты частотного анализа и анализа переходного процесса не только как функции частоты или времени, но и, заменяя переменную по оси X на любую другую схемную функцию, получать требуемые функциональные зависимости.

Подготовка к работе

Ознакомиться с целями и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе. Дополнительная литература для подготовки см. [4, 8, 17].

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к лабораторной работе.

Получить у преподавателя номер варианта и выбрать соответствующую схему по **Приложению 1**.

Изобразить упрощенную схему для статического анализа (по постоянному току), предполагая, что все элементы схемы идеальные. При этом источники ЭДС и тока – постоянные, а их номиналы:

$$E_1 = N_{\text{Варианта}} \text{ (В)};$$

$$E_2 = \frac{N_{\text{Варианта}}}{2} \text{ (В)};$$

$$Y = N_{\text{Варианта}} \text{ (мА)}.$$

Пользуясь упрощенной схемой рассчитать узловые напряжения и токи в ветвях схемы, включая токи индуктивности и источников ЭДС. Рассчитать малосигнальную передаточную функцию в режиме по постоянному току, входное и выходное сопротивления, входы и выходы выбрать по **табл. 3**.

Лабораторное задание

1. Ввести схему в ЭВМ.

2. **Анализ статического режима.**

- произвести с помощью ЭВМ расчет узловых напряжений, токов в элементах и мощностей для режима по постоянному току;

- рассчитать малосигнальную передаточную функцию в режиме по постоянному току, входное и выходное сопротивления, входы и выходы по **табл. 3**.

3. **Частотный анализ.** Получить с помощью ЭВМ:

- зависимости модуля комплексного коэффициента передачи от частоты (АЧХ);

- зависимости фазового угла комплексного коэффициента передачи от частоты (ФЧХ), для четного варианта – фаза напряжения, для нечетного – фаза тока;



- зависимости группового времени запаздывания;
- амплитудно-фазовые частотные характеристики (годографы).

Источник входного воздействия, тип отклика и выходы определить по табл. 3 в соответствии с вариантом.

Таблица 3

Вид анализа	Анализ статического режима		Частотный Анализ Динамический анализ	
	Четный	Нечетный	Четный	Нечетный
Вариант				
Источник входного воздействия	Источник напряжения EI	Источник тока Y	Источник напряжения EI	Источник тока Y
Тип отклика и выходы	Напряжение на источнике тока Y	Ток источника напряжения EI	Напряжения в узлах схемы	Токи реактивных элементов

4. **Динамический анализ.** Получить с помощью ЭВМ временные характеристики цепи:

- переходные;
- импульсные (путем взятия производной по времени от переходной характеристики, средствами PSpice).

В качестве входного воздействия, для четного варианта использовать передний фронт единичного импульса напряжения, для нечетного – передний фронт единичного импульса тока. Отклики в соответствии с табл. 3.

Порядок выполнения работы и рекомендации

Ввод и подготовка схемы

1. Загрузить графический редактор схем – программный модуль OrCAD Capture (CIS).

2. Создать проект (**Analog or Mixed A/D**) и средствами Capture ввести схему, соответствующую своему варианту, в ЭВМ.

Источники напряжения и тока должны быть постоянными (**VDC** и **IDC**), с номиналами равными полученным при подготовке к работе.

3. Обозначить узлы схемы. Для этого необходимо присвоить псевдонимы цепей (**Net Alias**), которые определяются по команде **Place>Net Alias...**, инициируемой также нажатием клавиши **N** или щелчком соответствующего значка на панели инструментов (рис. 1). В открывшемся диалоговом окне в поле **Name** ввести обозначение узла схемы и щелкнуть **OK**, после чего за курсором мыши закрепляется прямоугольник одну из сторон которого необходимо совместить с участком цепи (справа или сверху от проводника) и щелкнуть левой кнопкой мыши, закрепив, таким образом, псевдоним за цепью.

Псевдонимов у цепи может быть несколько, в редакторе свойств (*Property Editor*) можно в строке *Name* выбирать в выпадающем списке любое имя из используемых псевдонимов цепи, однако задать имя можно только по команде *Place>Net Alias*.

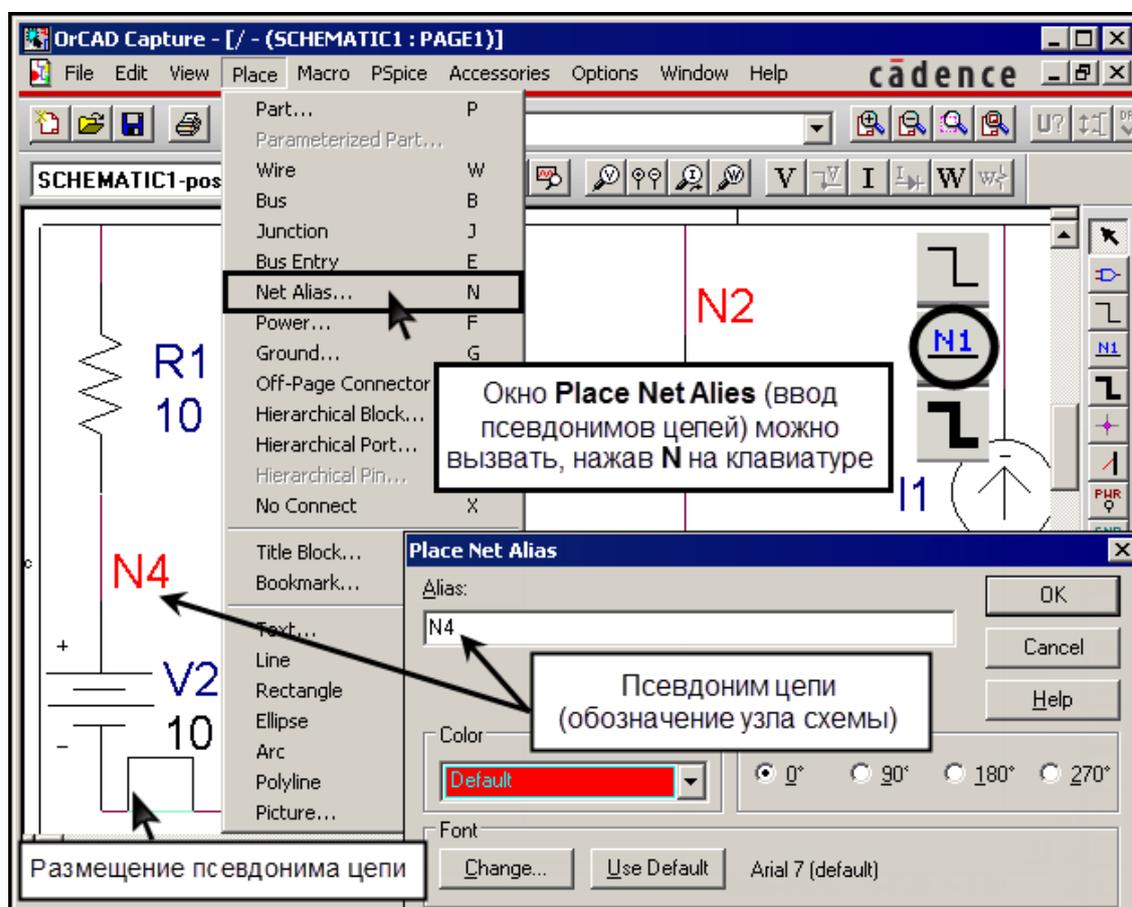


Рис. 1. Присвоение псевдонимов цепей

Для обозначения цепей схемы в OrCAD Capture применяется система сложных меток типа N00032, не удобная для пользователя. Узлу, выбранному в качестве опорного (общего) присваивается псевдоним 0.

В принципе, в OrCAD, не обязательно соединять цепи с помощью проводов, достаточно присваивать цепям одинаковые псевдонимы.

Анализ статического режима. Напряжения узлов схемы, токи и потребляемые мощности элементов

4. Создать профиль моделирования. Команда **PSpice>New Simulation Profile** (**Alt+S+N**) или щелчок соответствующего значка на панели инструментов (рис. 2). В открывшемся диалоговом окне в поле **Name** ввести имя нового профиля и щелкнуть **Create**. После этого автоматически откроется диалоговое окно настройки профиля моделирования **Simulation Settings** на закладке **Analysis** – выбор типа, и настройка анализа.

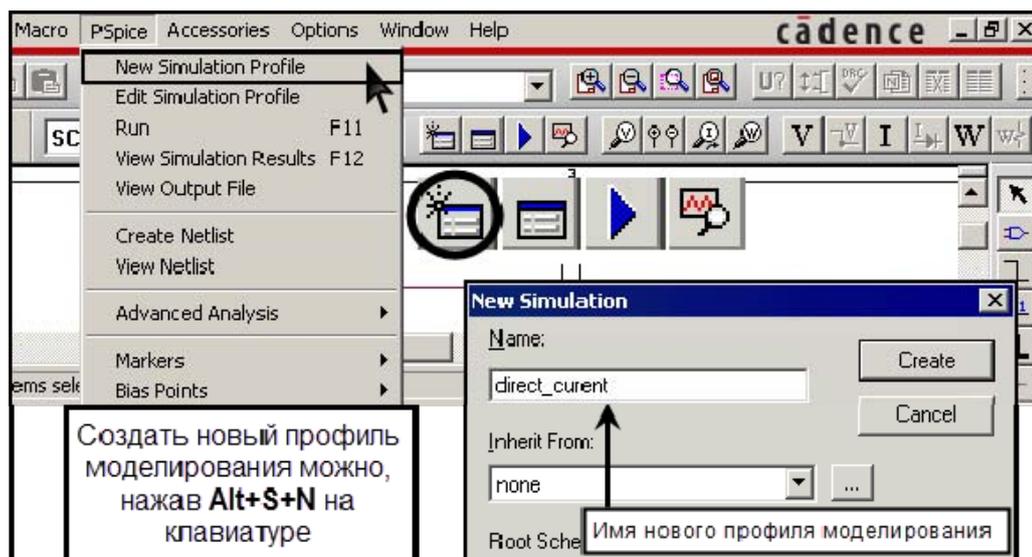


Рис. 2. Создание нового профиля моделирования

Файлы профилей моделирования – это тестовые файлы с расширением *.sim, по умолчанию располагаются в директории проекта – \<имя проекта>-PSpiceFiles\<имя схемы>\.

При создании нового проекта обычно профиль создается автоматически и носит имя проекта. Тип анализа в профиле, созданном одновременно с проектом – **Bias Point** – анализ по постоянному току. Во вновь создаваемом профиле, по умолчанию выбран тип анализа – **Time Domain** – анализ схемы во временной области. За одним проектом может быть закреплено несколько профилей, которые можно менять в соответствующем выпадающем меню (рис. 3), или в дереве проекта.

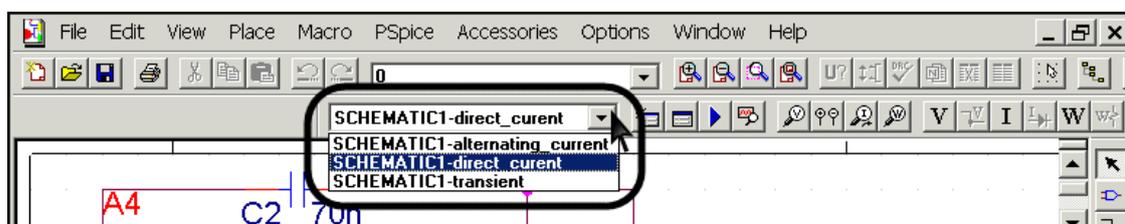


Рис. 3. Выпадающее меню выбора профиля моделирования

Диалоговое окно настройки профиля моделирования (**Simulation Settings**) можно вызвать командой **PSpice>Edit Simulation Profile**, сочетанием клавиш клавиатуры **Alt+S+E** или щелкнув по соответствующему значку на панели инструментов (рис. 4). Для моделирования, удобно в одном проекте иметь несколько профилей настроенных на разные типы анализа.

Сочетания клавиш, начинающиеся с **Alt**, представляют собой способ доступа к командам меню с клавиатуры, символьные сочетания, следующие за **Alt** – это, как правило, первые буквы соответствующих команд меню, за пунктом меню **PSpice** закреплен символ **S**. Далее, в связи с простотой формирования комбинаций, подобные сочетания клавиш вводиться не будут.

Окно настройки профиля моделирования можно вызвать двойным щелчком по выбранному профилю в дереве проекта (панка PSpice Resources>Simulation Profiles).

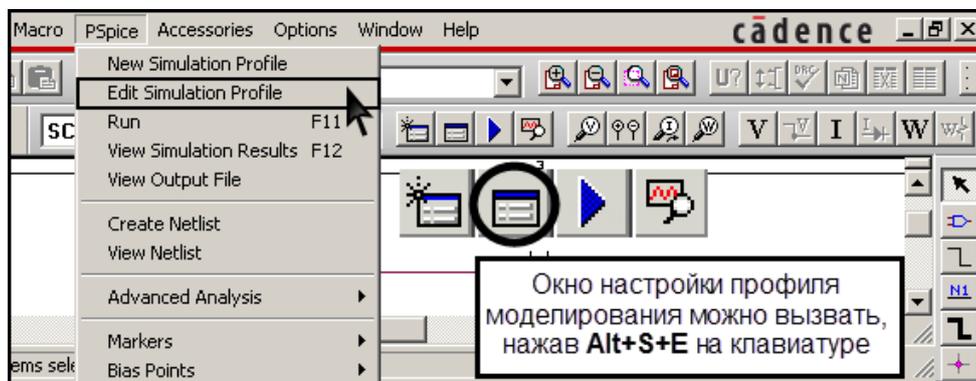


Рис. 4. Вызов окна настройки моделирования

5. Выбрать тип анализа **Bias Point** (рис. 5).

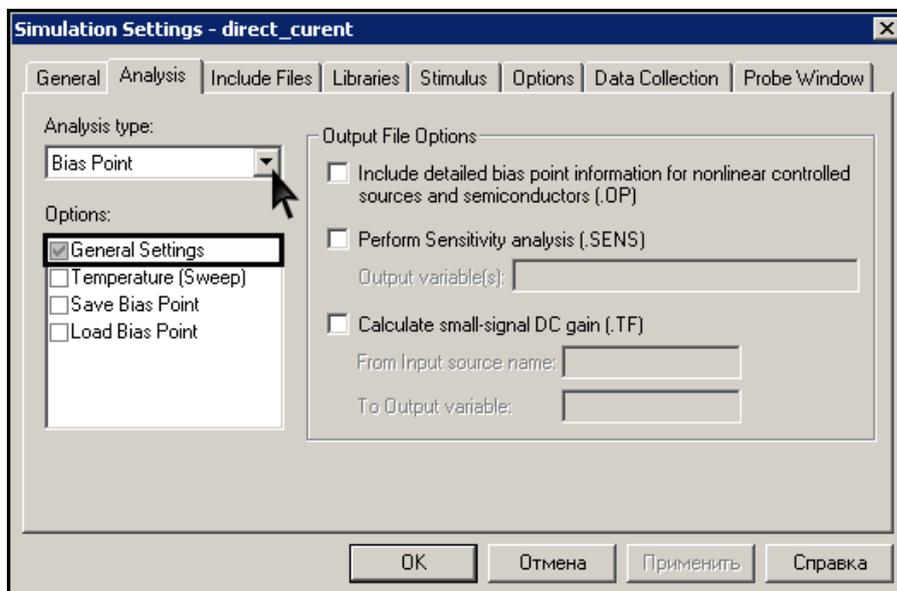


Рис. 5. Окно настройки моделирования. Выбор типа анализа

6. Запустить симуляцию. Команда PSpice>Run, F11 на клавиатуре, или щелчок соответствующего значка на панели инструментов (рис. 6).

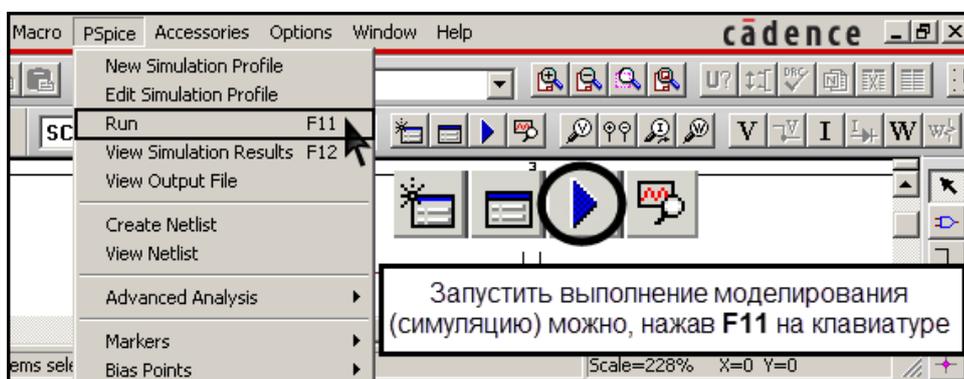


Рис. 6. Запуск моделирования

Моделирование выполняется в модуле PSpice A/D. После запуска симуляции, если в схеме не было допущено формальных ошибок, типа двойных позиционных обозначений компонентов, компонентов с не подсоединенными выводами и т.п., будет создан файл с расширением *.net (файл соединений) и откроется окно программы PSpice A/D.

Файл соединений (**Netlist file**) – это текстовый файл, содержащий позиционные обозначения компонентов, псевдонимы узлов к которым подключены компоненты, а также параметры компонентов или их имена для поиска в библиотеке моделей. Файл соединений располагается в директории проекта – \<имя проекта>-PSpiceFiles\<имя схемы>\.

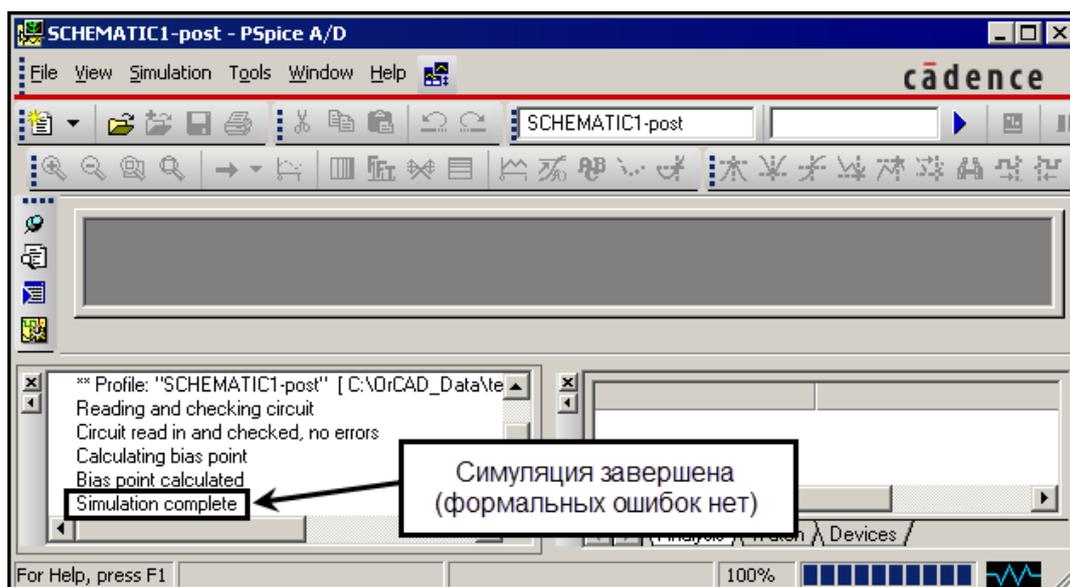


Рис. 7. Окно программы PSpice A/D. Симуляция завершена

В окне PSpice A/D, основная на данном этапе, информация содержится в подокне **Output Window** (окно выхода) (рис. 7).

Удостовериться в том, что симуляция была завершена, и свернуть окно программы PSpice A/D.

7. Открыть файл соединений (**Netlist file**). В OrCAD Capture команда **PSpice>View Netlist**. При этом важно, чтобы в файловых ассоциациях операционной системы, расширению *.net был сопоставлен какой-нибудь текстовый редактор. Сохранить содержимое файла **Netlist** в заготовку отчета.

8. Включить в OrCAD Capture отображение на схеме результатов анализа по постоянному току – показ рассчитанных значений потенциалов в узлах, токов и потребляемой компонентами мощности. Управление отображением осуществляется через главное меню – **PSpice>Bias Point>...** и с помощью пиктограмм панели инструментов (рис. 8).

Ненужные индикации потенциалов, токов и мощностей можно удалить, отметив эти данные с помощью мыши и затем нажав клавишу **Delete**. Удаленные данные всегда можно вернуть на экран, отметив нужный сегмент проводника или компонент и затем щелкнув по кнопке с пиктограммой ,  или .

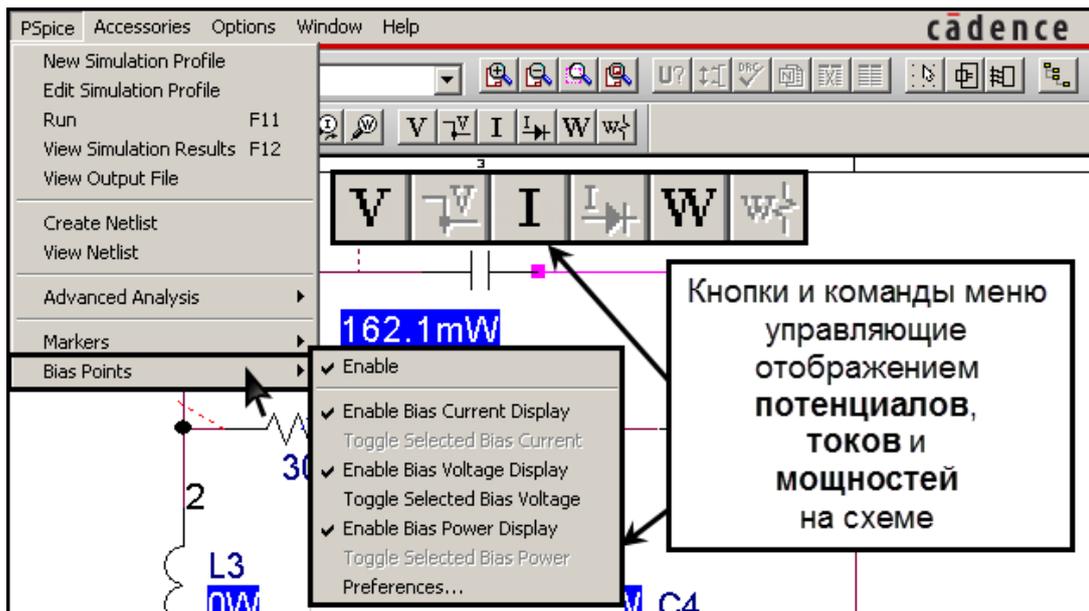


Рис. 8. Управление отображением режима по постоянному току

Передвинуть с помощью мыши отобразившиеся значения токов и напряжений так, что бы схема имела читаемый вид (рис. 9).

9. Зафиксировать полученный результат с помощью скриншота (Screenshot), и сохранить в заготовке отчета.

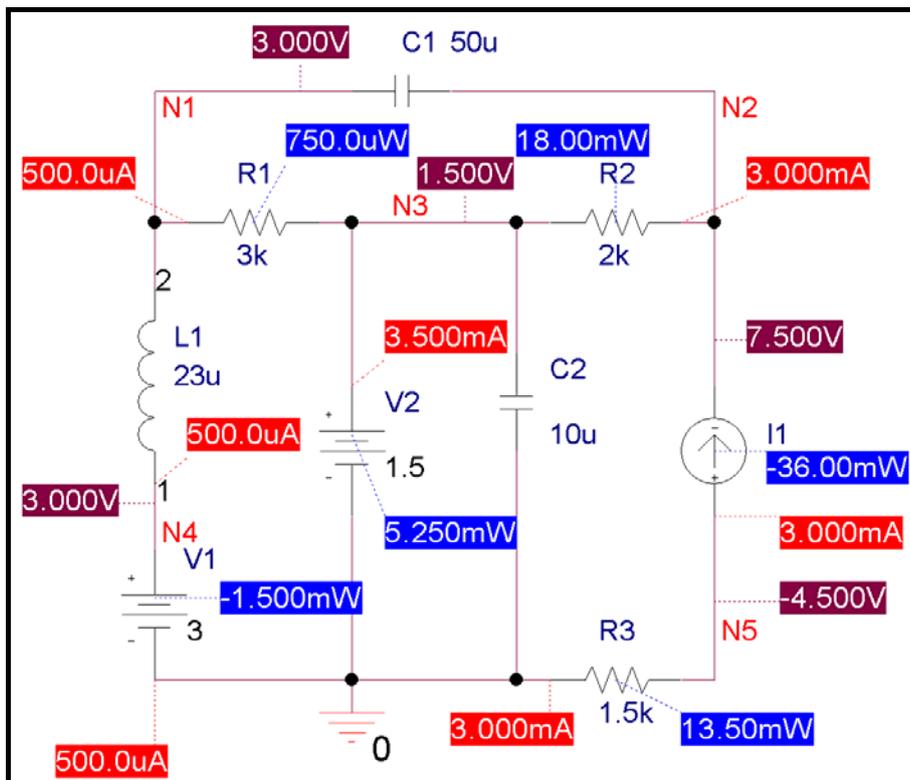


Рис. 9. Отображение токов через элементы и напряжений в узлах

Если нажать сочетание *Alt+PrScr*, то в буфер сохранится только активное окно.

Анализ статического режима. Малосигнальная передаточная функция, входное и выходное сопротивления

10. Открыть окно настройки профиля моделирования (**Simulation Settings**)¹ и в разделе **Output File Options** установить флажок **Calculate small-signal DC gain (.TF)**. В поле **From input source name** ввести имя входного источника (имя первого источника напряжения или источника тока, для четного и нечетного варианта соответственно). В поле **To Output variable** ввести обозначение выходного параметра (напряжение на источнике тока или ток первого источника напряжения, для четного и нечетного варианта соответственно). Пример показан на **рис. 10**.

11. Запустить симуляцию.²

12. Открыть схемный файл (**Circuit file**). В программе PSpice A/D выполнить команду **File>Open**, найти в директории проекта по адресу \<имя проекта>-PSpiceFiles\ <имя схемы>\ <имя профиля>\ и открыть файл имеющий расширение *.cir. Имя файла совпадает с именем профиля моделирования.

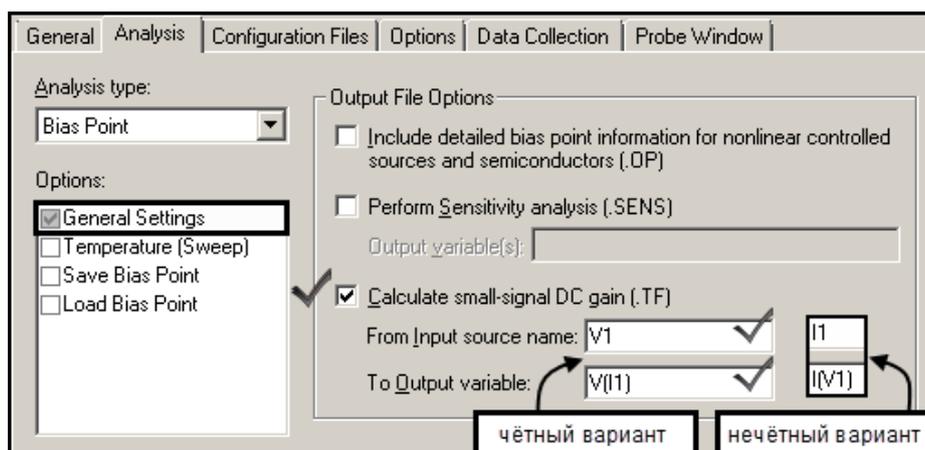


Рис. 10. Окно настройки моделирования. Настройка параметров анализа для расчета малосигнальной передаточной функции в режиме по постоянному току

Схемный файл создается в OrCAD Capture после запуска симуляции, при условии, что в схеме не было допущено формальных ошибок, и содержит команды, описывающие как нужно выполнять моделирование (директивы моделирования) сформированные на основе файла *.sim (файла профиля моделирования). Схемный файл также содержит ссылки на файл списка соединений (**Netlist file**) и другие файлы которые могут содержать модели, сигналы и любую другую определяемую пользователем информацию, используемую в моделировании.

Перед непосредственным выполнением процесса моделирования программа PSpice A/D прочитывает все связанные с проектом файлы, указанные в файле *.cir. На этом этапе могут быть выявлены формальные ошибки в задании директив моделирования, в описаниях моделей и т. п.

13. Сохранить текст из схемного файла в заготовке отчета, предварительно удалив из него пустые строки. Пример текста схемного файла показан на **рис. 11**.

В строке 1 – имя и расположение файла с настройками моделирования.

*В строках с 7 по 10 указаны библиотеки, используемые в данном проекте. Директива **.LIB** (library) подключает библиотеку моделей. Библиотека **nom.lib** содержит директивы подключения всех используемых стандартных библиотек.*

В строках с 13 по 15 содержатся директивы анализа.

*Директива **.TF** задает расчет малосигнальной передаточной функции (Transfer Function) в режиме анализа по постоянному току, входного и выходного сопротивления.*

*Директива **.PROBE** подключает графический постпроцессор Probe, в котором строятся и анализируются графики (в анализе **Bias Point**, Probe не используется).*

*Директива **.INC** (include) включает во входной файл любой другой файл, в данном случае файл Netlist – **SCHEMATIC1.net** – собственно анализируемая схема.*

```
1  ** Profile: "SCHEMATIC1-post" [ C:\OrCAD_Data\test-pspicefiles
**  \schematic1\post.sim]

2  ** Creating circuit file "post.cir"
3  ** WARNING: THIS AUTOMATICALLY GENERATED FILE MAY BE OVERWRITTEN BY
SUBSEQUENT SIMULATIONS

4  *Libraries:
5  * Profile Libraries :
6  * Local Libraries :
7  * From [PSPICE NETLIST] section of C:\OrCAD\OrCAD_16.0\tools\
** PSpice\PSpice.ini file:
8  .lib "nom.lib"

9  *Analysis directives:
10 .TF V(I_I1) V_V1
11 .PROBE V(alias(*)) I(alias(*)) W(alias(*)) D(alias(*))
NOISE(alias(*))
12 .INC "..\SCHEMATIC1.net"
13
14 .END
```

Рис. 11. Схемный файл (Circuit file)

*Директива **.END** – конец схемного файла.*

*Проведение анализа **Bias Point** не требует специальной директивы и по умолчанию проводится всегда.*

Строки, начинающиеся с символа «» – это комментарии используемые, в том числе как заголовки разделов. Строки, начинающиеся с «.» содержат директивы моделирования.*

Программа PSpice A/D является автономным модулем выполняющим моделирование проектов. Входными данными для PSpice A/D являются файл *.cir и указанные в нем связанные файлы, в том числе файлы *.net – представляющий собой описание схемы и *.sim – содержащий ряд директив, в том числе директивы анализа.

Все связанные файлы проекта, используемые в моделировании – это текстовые файлы которые могут быть включены в схемный файл не только как ссылки, но и в явном виде (как текст). Пользователь может вносить изменения в схему, формировать собственные задания на моделирование, подключать библиотеки и т.п. пользуясь любым текстовым редактором. Например, директивы моделирования можно включать в файл соединений *.net.

Следует иметь в виду, что файл соединений *.net перезаписывается каждый раз, когда запускается симуляция из OrCAD Capture. Файл настроек моделирования *.sim и схемный файл *.cir обновляются запуском симуляции как OrCAD Capture, так и из PSpice A/D.

14. Открыть выходной файл (**Output file**). В программе PSpice A/D выполнить команду **View>Output File** или щелкнуть соответствующий значок панели инструментов (рис. 12).

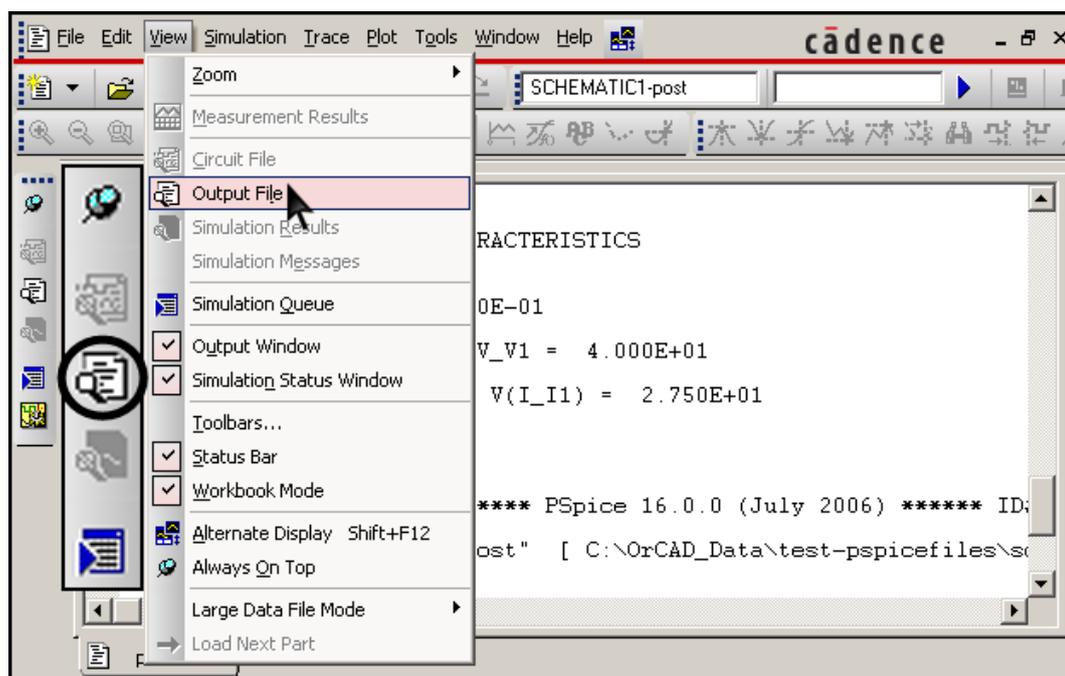


Рис. 12. Просмотр выходного файла

Открыть выходной файл можно также способом, аналогичным описанному в п. 12. Выходной файл имеет расширение *.out и имя, совпадающее с именем профиля моделирования.

Часть результатов моделирования, а также сообщения об ошибках моделирования доступны только в текстовом виде в выходном файле, в частности результаты расчетов по директиве .TF.

15. Сохранить текст из выходного файла в заготовке отчета, предварительно удалив из него пустые строки. Выделить в тексте результаты расчета малосигнальной передаточной функции в режиме анализа по постоянному току, входного и выходного сопротивлений ([рис. 13](#)).

```
**** SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS
V(I_I1)/V_V1 = -2.500E-01
INPUT RESISTANCE AT V_V1 = 4.000E+01
OUTPUT RESISTANCE AT V(I_I1) = 2.750E+01
JOB CONCLUDED

**** 12/02/10 00:34:15 ***** PSpice 16.0.0 (July 2006) ***** ID# 0 *
** Profile: "SCHEMATIC1-post" [ C:\OrCAD_Data\test-
* pspicefiles\schematic1\post.sim ]
**** JOB STATISTICS SUMMARY
Total job time (using Solver 1) = .02
```

результаты расчета малосигнальной передаточной функции в режиме анализа по постоянному току, входного и выходного сопротивлений

Рис. 13. Фрагмент выходного файла (Output file)

*Более подробно текстовый интерфейс программы PSpice A/D, работа с файлами *.cir и *.out, директивы моделирования описаны в [11, 17, 18].*

Частотный анализ. АЧХ

16. Преобразовать схему в соответствии с [п. 3](#) лабораторного задания. Вместо источника входного воздействия поставить источник **VAC** или **IAC** (в соответствии с вариантом), амплитуду переменной составляющей задать произвольно, но не равной нулю. Остальные источники исключить из схемы. *Источник тока имеет бесконечное внутреннее сопротивление (разрыв цепи), а источник напряжения нулевое (перемычка).*

Поскольку цепь линейная, а снять требуется АЧХ и ФЧХ амплитуда входного воздействия роли не играет (в пределах величин допустимых в PSpice, для напряжений и токов – $\pm 10^{10}$ вольт или ампер).

VAC и IAC – источники гармонического сигнала для частотного анализа, могут использоваться для анализа по постоянному току.

17. Создать новый профиль моделирования.³

18. Выбрать тип анализа **AC Sweep** – анализ схемы в частотной области. Первоначальные параметры анализа задать, как показано на [рис. 14](#).

*Выбор шага по частоте: **Linear** – линейный, **Logarithmic** – логарифмический. Для линейного шага указывается общее число точек на шкалу (**Total Points**), для логарифмического число точек на декаду или октаву (**Points/Decade(Octave)**). **Start Frequency** – начальная частота анализа, не может быть равна 0. **End Frequency** – конечная частота анализа.*

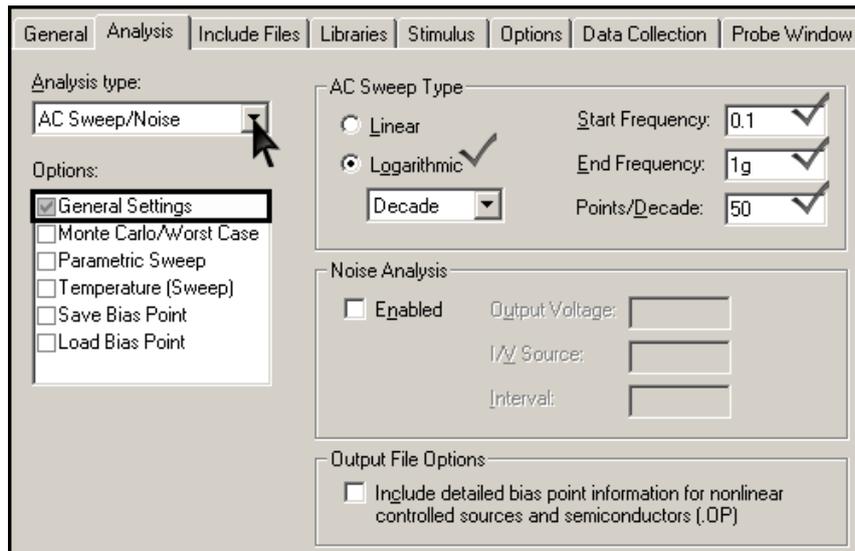


Рис. 14. Окно настройки моделирования. Настройка анализа AC Sweep

19. Запустить симуляцию.²

20. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Анализ в частотной области задается по директиве .AC.

↓ 21. Построить графики АЧХ.

АЧХ представляет собой зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты, может быть определена как отношение амплитуд входного и выходного сигнала.

→ 21.а. Открыть окно **Add Traces**. В PSpice A/D команда **Trace>Add Trace...**, клавиша **Insert** или кнопка на панели инструментов (рис. 15).

В версии OrCAD 16 добавить график можно также через контекстное меню, вызываемое щелчком правой кнопки мыши на пустую область построения.

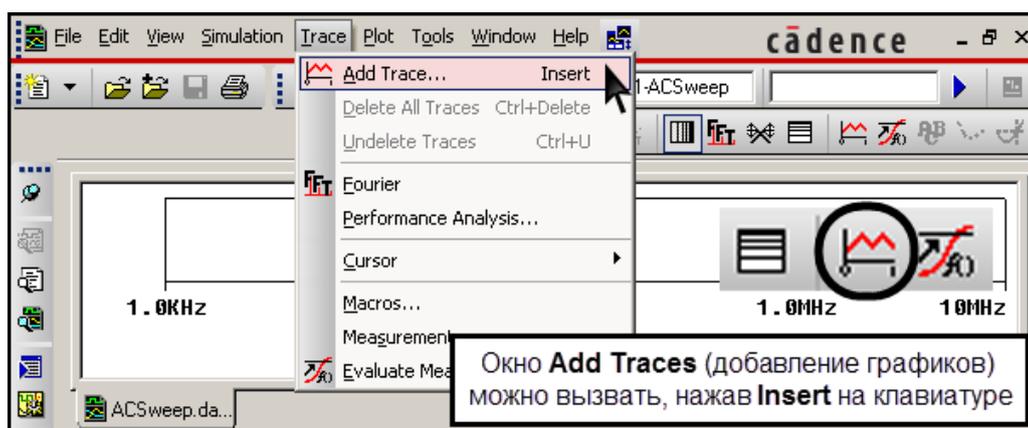


Рис. 15. Вызов окна Add Traces

Непосредственно функции построения графиков и постобработки результатов моделирования выполняются графическим постпроцессором Probe встроенным в PSpice A/D.

→ 21.б. В окне **Add Traces** (добавить график) с помощью клавиатуры или мыши ввести в строку **Trace Expression** выражения для АЧХ всех выходов (рис. 16), как отношения выходных, входных напряжений (четный вариант) или токов (нечетный вариант).

В левой части окна **Add Traces** перечислены все токи и потенциалы узлов вашей схемы. В правой части – список математических функций и связующих, которые программа *Probe* может применить к отдельным графикам.

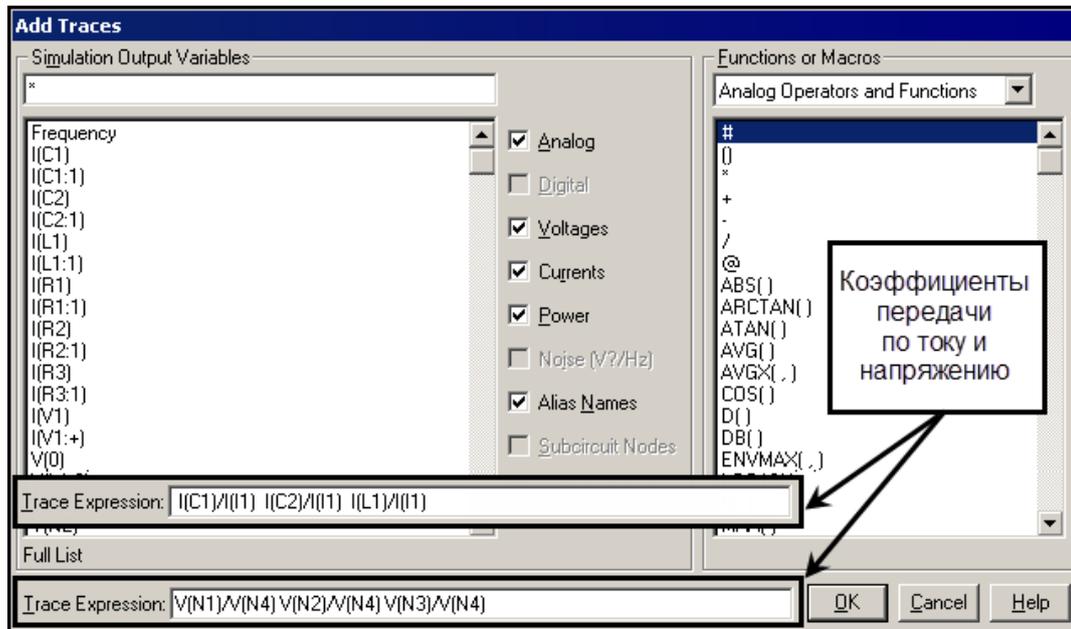


Рис. 16. Ввод выражений графиков в окне Add Traces

В результате анализа **AC Sweep** рассчитываются узловые напряжения и токи ветвей, являющиеся комплексными величинами. В режиме **AC Sweep** программа *Probe* поддерживает вычисления с комплексными числами. Ввод в строку **Trace Expression** окна **Add Traces** выражений для комплексных величин без использования каких-либо математических функций и операторов *Probe*, выводит модуль результата. Если введено выражение для действительной величины, например фаза комплексного коэффициента передачи, то результат может быть и отрицательным. Если же выражение комплексное, например комплексный коэффициент передачи по напряжению $V(N1)/V(N4)$ – определенный как отношение потенциалов узлов $N1$ и $N4$, то выводится его модуль, который всегда неотрицательный.

Для обращения к действительной и мнимой части рассчитанных величин используются функции **R** и **IMG** соответственно.

В программе *Probe* также используется функция **ABS** (absolute value) – абсолютное значение и аналогичная ей **M** (magnitude) – модуль, соответственно выражения: $V(N1)/V(N4)$, $M(V(N1)/V(N4))$, $ABS(V(N1)/V(N4))$ и $SQRT(PWR(R(V(N1)/V(N4)),2)+PWR(IMG(V(N1)/V(N4)),2))$ – совершенно эквивалентны. Функция **SQRT** – квадратный корень, а **PWR** – возведение в степень, в приведенном примере в квадрат.

→ 21.в. Проанализировать вид полученных АЧХ, открыть окно настройки профиля моделирования (**Simulation Settings**) и изменить, если требуется, граничные частоты анализа, тип шага по частоте, число точек таким образом, чтобы графики приобрели наиболее информативный вид.

Вызвать окно **Simulation Settings** и изменить директивы моделирования можно прямо из программы PSpice A/D, щелкнув соответствующий значок панели инструментов (рис. 17) или командой **Simulation>Edit Profile...**

→ 21.г. В окне **Simulation Settings**, на закладке **Probe Windows** поставить флажок **Last plot** в группе **Show** (рис. 18) – вывод графиков для последних введенных выражений.

→ 21.д. Если директива моделирования была изменена, запустить симуляцию еще раз.

Запустить симуляцию можно прямо из программы PSpice A/D, нажав соответствующую кнопку на панели инструментов (рис. 17) или командой **Simulation>Run**.

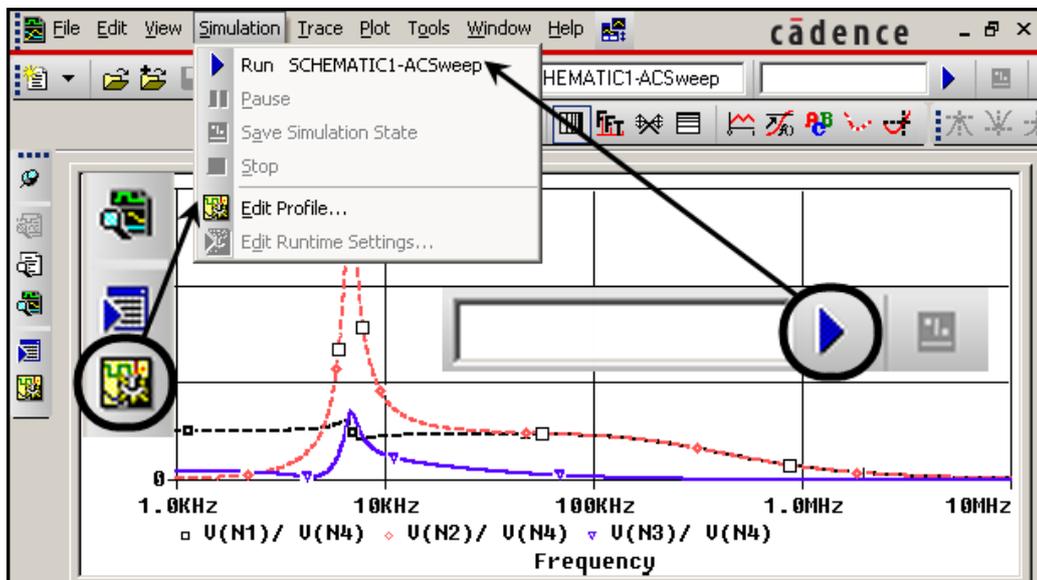


Рис. 17. Вызов окна Simulation Settings (команда Edit Profile) и запуск симуляции (команда Run) из программы PSpice A/D



Рис. 18. Окно Simulation Settings.

Закладка Probe Window – настройка отображения результатов моделирования

После каждой симуляции обнуляется информация о выражениях, введенных в строку *Trace Expression*, опция *Show Last plot* позволяет не вводить выражения заново.

Настройка внешнего вида области построения и графиков

→ 21.е. При необходимости изменить масштаб отображения по осям (линейный или логарифмический) (рис. 19).

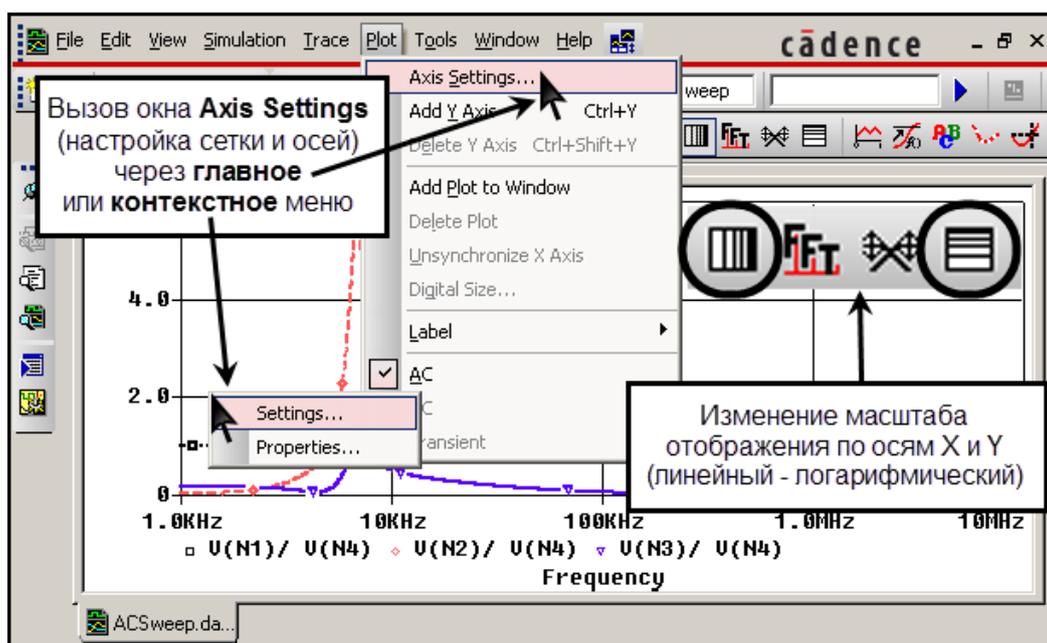


Рис. 19. Изменения масштаба отображения по осям.
Вызов окна Axis Settings

→ 21.ж. Убрать промежуточные линии сетки.

Открыть окно настройки параметров сетки и осей (**Axis Settings**). Команда **Plot>Axis Settings...**, либо двойной щелчок левой кнопки мыши в области значений одной из осей, либо выбрать пункт контекстного меню доступного по щелчку правой кнопки мыши по линии сетки (пункт **Settings...**) (рис. 19).

В окне **Axis Settings** на закладках **X Grid** и **Y Grid** в разделе **Minor Grids** установите флажок **None** (рис. 20).

→ 21.з. Настроить отображение графиков.

Вызвать окно свойств графика (**Trace Properties**). Щелкнуть правой кнопкой мыши линию графика или значок в строке с легендами графиков, под осью X (рис. 21). В появившемся контекстном меню выбрать пункт **Properties...**

В окне **Trace Properties** изменить параметры отображения графика: увеличить толщину линий графиков, изменить цвет и тип линий.

Повторить действия для всех графиков.

Аналогичным образом настраиваются параметры отображения линий рамки и сетки.

Толщина линий влияет на качество печати и восприятия. Следует выбирать цвета линий, которые при черно-белой печати обеспечивают приемлемую четкость и контраст на белом фоне.

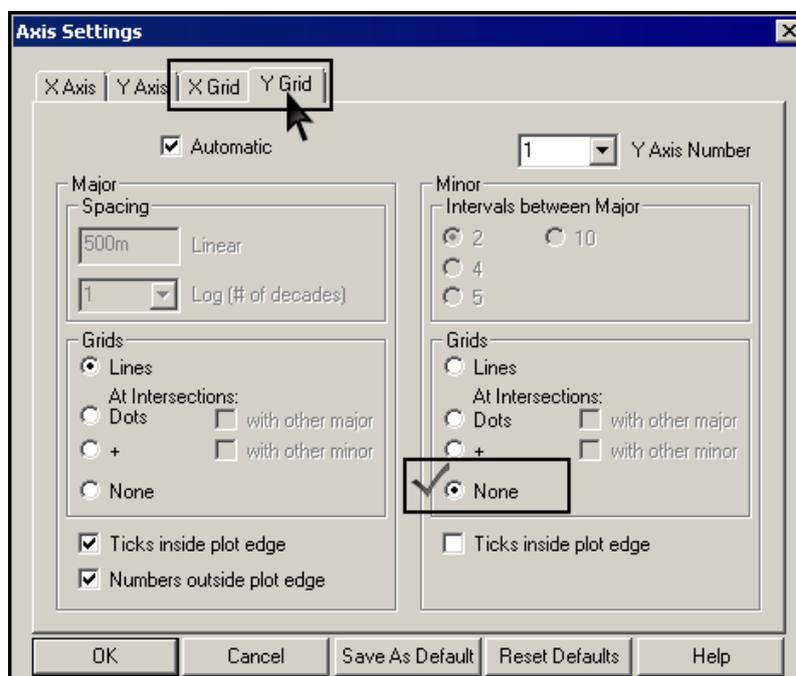


Рис. 20. Окно Axis Settings. Настройка отображения промежуточных линий сетки

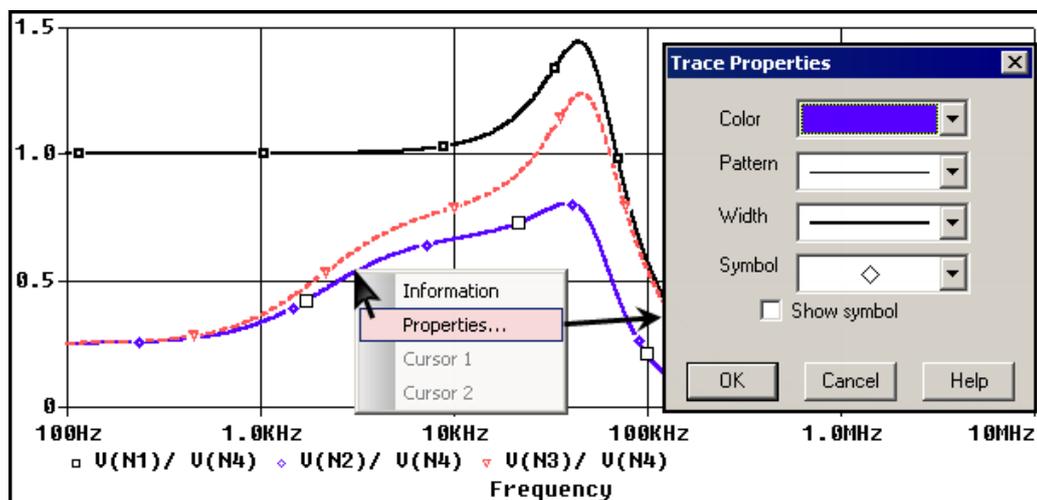


Рис. 21. Настройка вида графиков

→ 21.и. Сохранить графики АЧХ. Команда **Window>Copy to Clipboard** (сохранить в буфер обмена), в открывшемся окне в разделе **Foreground** поставить флажок **change white to black** (поменять белый с черным), щелкнуть **ОК** (рис. 22). Рисунок из буфера обмена вставить в заготовку отчета (**Ctrl+V** или **Shift+Ins**).

В буфер копируется область построения, включая оси, сетку, графики, подписи к осям, легенда и текстовые пометки (рис. 23). Размер изображения в буфере, зависит от фактического размера области построения в момент копирования.

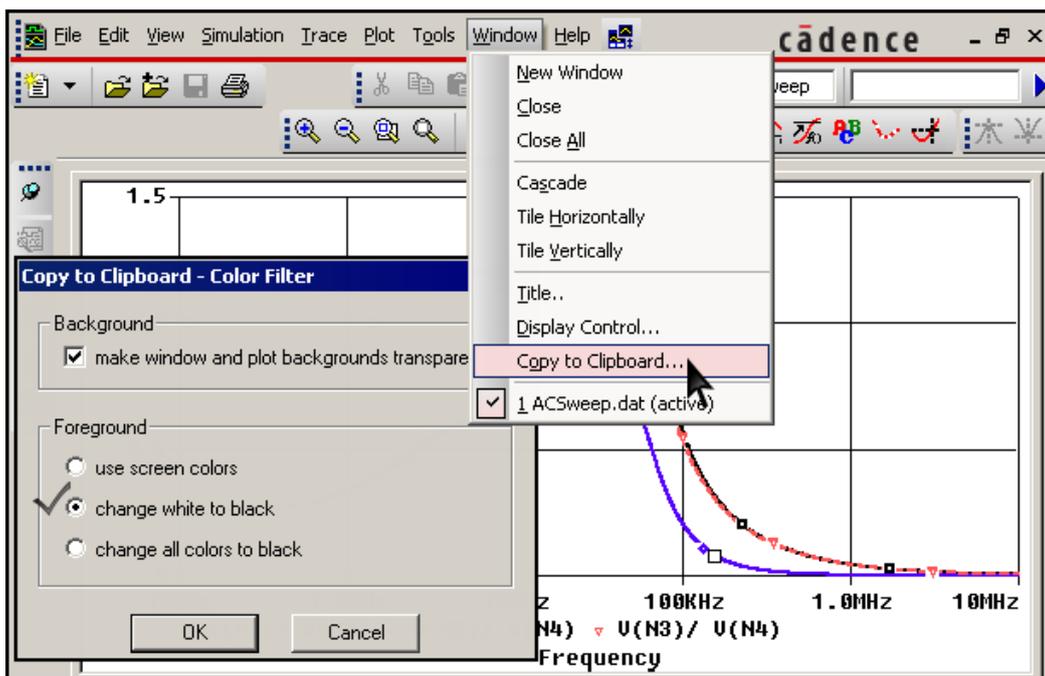


Рис. 22. Сохранение графиков в буфер обмена

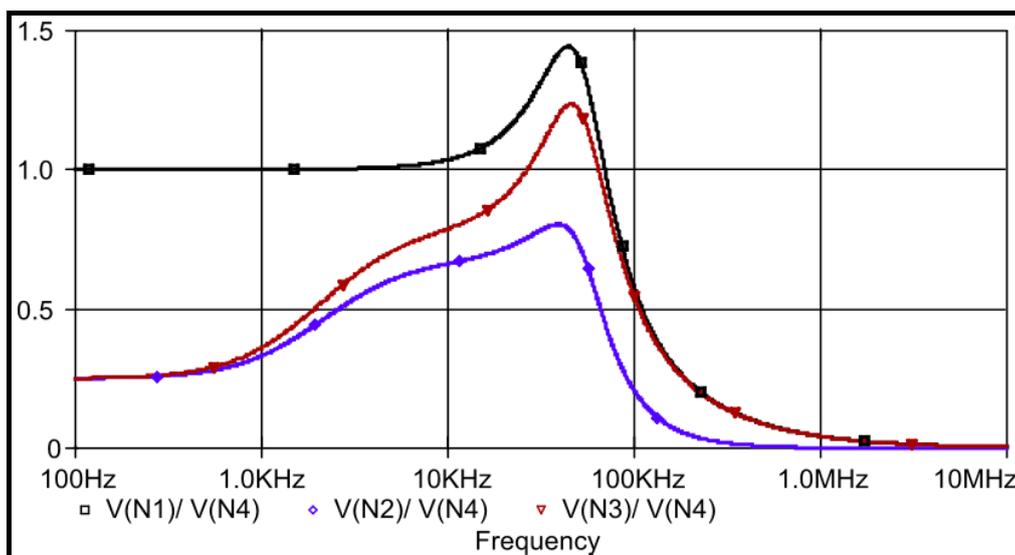


Рис. 23. Графики, скопированные из буфера обмена

Рисунок в буфере обмена имеет векторный формат, его можно вставить и отредактировать в любом векторном редакторе – MS Visio, Illustrator, Corel Draw, Inkscape и т. п.

Частотный анализ. ФЧХ

- ↓ 22. Построить графики ФЧХ.
- 22.а. Последовательно отредактировать выражения для графиков. Дважды щелкнуть в строке легенды выбранное выражение и в строке **Trace Expression** открывшегося окна **Modify Trace** изменить формулу, как показано в примере (рис. 24).

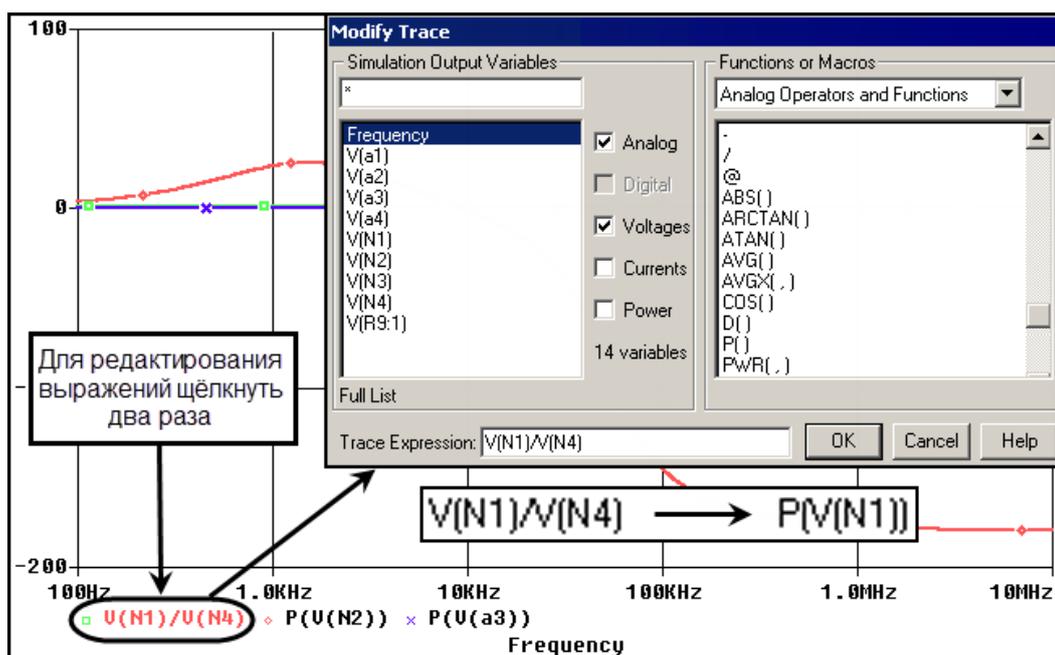


Рис. 24. Редактирование выражений графиков

В окне **Modify Trace** в отличие от аналогичного окна **Add Traces** разрешено только редактирование ранее введенного выражения. В окне **Add Traces** можно вводить несколько выражений.

Для нечетного варианта выражения фазы частотного отклика могут выглядеть как: $P(I(C1))$, $P(I(C2))$, $P(I(L1))$.

ФЧХ представляет собой зависимость разности фаз двух гармонических колебаний от частоты, в данном случае фазовый сдвиг между выходным и входным сигналом. ФЧХ может быть определена как аргумент комплексного коэффициента передачи, ФЧХ также определяют как арктангенс отношения мнимой и действительной части комплексного коэффициента передачи. Следует помнить, что аргумент комплексной функции принимает значения от $-\pi$ до π , а арктангенс от $-\pi/2$ до $\pi/2$, в отличие от абсолютного фазового сдвига, который может принимать значения больше π .

Фаза частотного отклика в программе **Probe** находится с помощью функции $P(\text{имя переменной})$, P – от английского *phase* – фаза. Функция P возвращает абсолютное значение фазы (сдвиг относительно 0) в градусах (*degree*). Поскольку фаза входного сигнала не была изменена и по умолчанию равна 0, то для нахождения ФЧХ можно построить фазы выходных величин, а не коэффициентов передачи.

→ 22.б. Сохранить в заготовке отчета графики ФЧХ.⁵

Частотный анализ. Групповое время запаздывания

Характеристика ГВЗ показывает время прохождения сигналов разных частот через схему, характеризует время задержки максимума передаваемой энергии и находится как производная от фазо-частотной характеристики.

Групповое время запаздывания в программе Probe находится с помощью функции G (имя переменной), G – от английского *group delay*. Функция G вычисляет производную от ФЧХ в радианах по угловой частоте по формуле $-d\varphi(\omega)/d\omega$, и имеет размерность времени.

↓ 23. Построить графики ГВЗ.

→ 23.а. Последовательно отредактировать выражения для графиков. Дважды щелкнуть в строке легенды выбранное выражение и в строке **Trace Expression** открывшегося окна **Modify Trace** изменить формулу, заменив P на G (рис. 25).



Рис. 25. Ввод выражений для группового времени запаздывания в строку Trace Expression окна Add Traces

→ 23.б. Сохранить в заготовке отчета графики ГВЗ.⁵

Частотный анализ. АФЧХ

Амплитудно-фазовая частотная характеристика – зависимость коэффициента передачи и фазового сдвига от частоты, построенная в полярной системе координат – представляет собой годограф комплексного коэффициента передачи, называемый также диаграммой или годографом Найквиста. Годограф – это параметрическая кривая параметром, которой является частота, строится в виде кривой описываемой концом вектора комплексного коэффициента передачи (для АФЧХ) при изменении частоты от 0 до ∞ , причем каждой точке кривой соответствует определенная частота.

При построении АФЧХ на комплексной плоскости, по оси X обычно откладывается вещественная, а по оси Y мнимая часть комплексного коэффициента передачи.

В PSpice A/D, после анализа **AC Sweep**, постпроцессором Probe по умолчанию строятся графики, где по оси X отложена частота, а по оси Y переменная, определяемая через окно **Add Traces** или маркерами на схеме.

Для построения АФЧХ требуется переопределить переменную по оси X , и задать переменную оси Y .

24. В PSpice A/D открыть новое окно. Команда **Window>New Window** (рис. 26). На панели окон PSpice появиться новая закладка, переключаться между окнами можно щелкая мышью на соответствующие закладки или с помощью меню **Window**.

С помощью новых окон можно выводить и анализировать большое число различных графиков и данных, не удаляя, и не переопределяя уже суще-

ствующие, т.е. работать с большим объемом информации, для которого одного окна недостаточно.

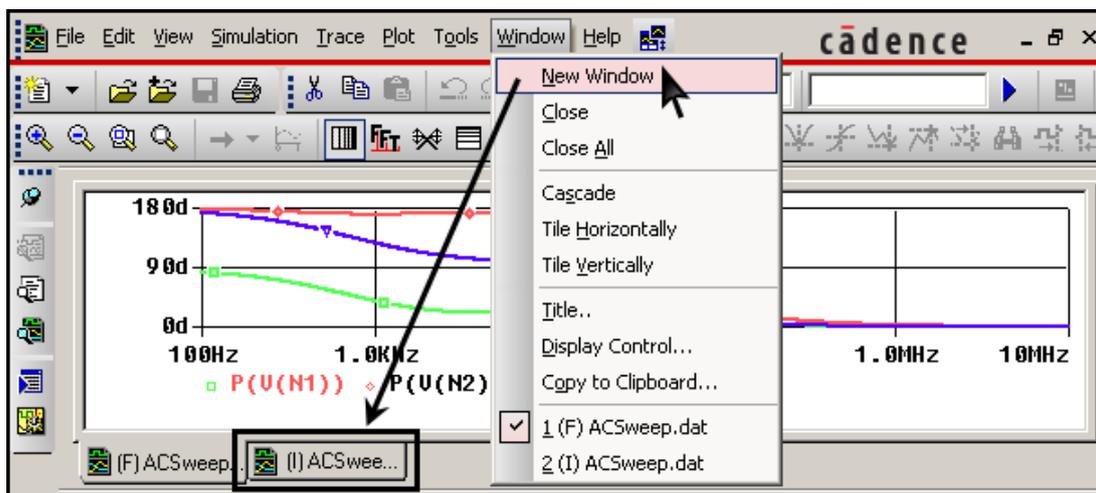


Рис. 26. Добавление нового окна в PSpice A/D

25. Добавить в текущем окне еще несколько (по числу выходов) областей построения. Команда **Plot>Add Plot To Window** или соответствующий пункт контекстного меню вызываемого щелчком правой кнопки мыши по области построения (рис. 27).

В одном окне PSpice A/D может быть несколько систем координат содержащие построения, привязанные к одной оси X или имеющие независимые (собственные) оси.

26. Назначить каждой области построения собственную ось X. Выбрать любую область построения, щелкнув в пространство области, затем выполнить команду **Plot>Un synchronize X Axis** (рис. 27).

Чтобы убедиться в выборе нужной области построения, обратите на значок выбора – **SEL>>** (рис. 27).

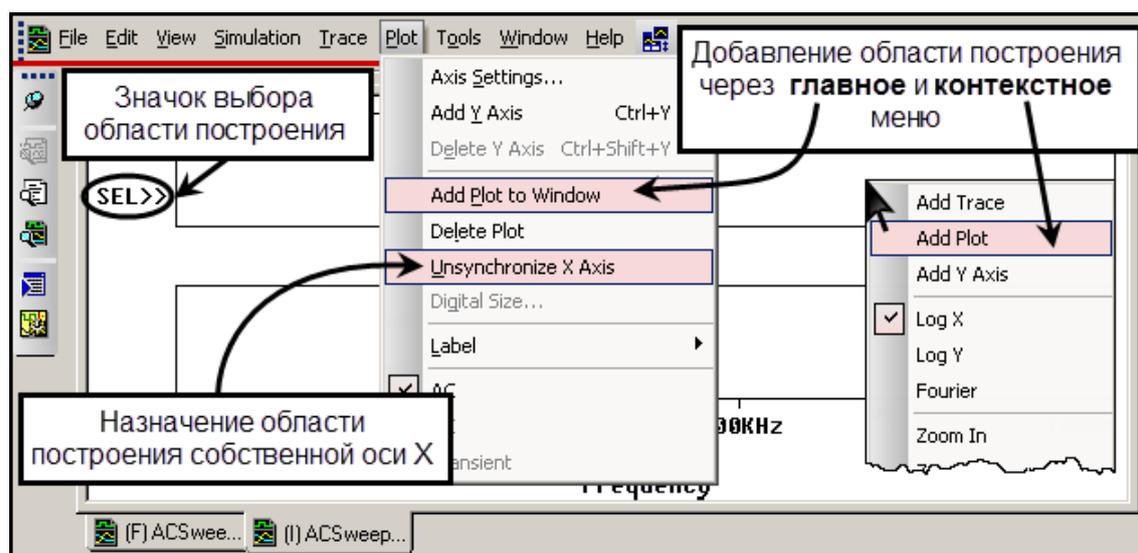


Рис. 27. Добавление области построения.
 Назначение области построения собственной оси X

- ↓ 27. Построить АФЧХ.
- 27.а. Изменить переменную, откладываемую по оси X.
- ↑ 27.а.1. Открыть окно настройки параметров сетки и осей (**Axis Settings**)⁶ для одной из областей построения. В окне **Axis Settings** на закладке **X Axis** нажать на кнопку **Axis Variable...** (рис. 28).
- ↑ 27.а.2. В открывшемся окне **X Axis Variable** в строке **Trace Expression** изменить переменную **Frequency** на вещественную часть одного из комплексных коэффициентов передачи (для напряжений или токов, в соответствии с вариантом), пример показан на рис. 29.

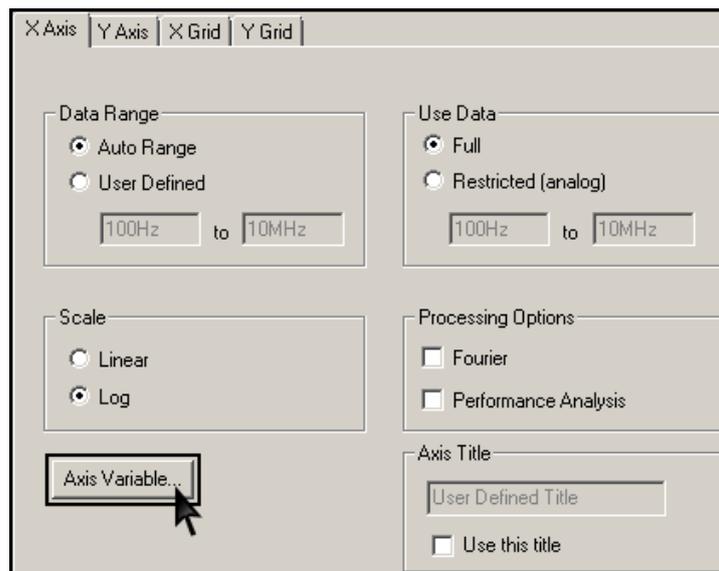


Рис. 28. Вызов окна X Axis Variable. Изменение переменной откладываемой по оси X

Вещественная часть комплексной переменной в программе **Probe** находится с помощью функции $R(\text{имя переменной})$, – от английского *real* – действительный, реальный. Функция R возвращает значение действительной части комплексной переменной в соответствующих единицах измерения (вольты, амперы и т. п.).

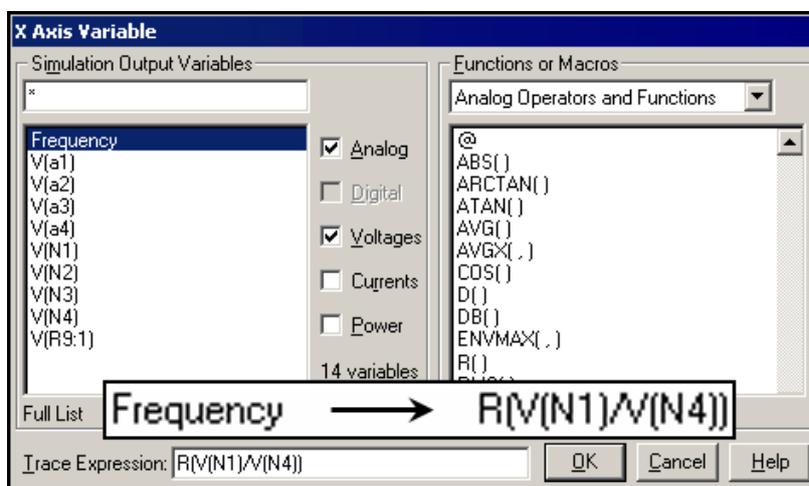


Рис. 29. Окно X Axis Variable. Изменение переменной откладываемой по оси X

Окно *X Axis Variable* аналогично *Add Traces*, но, как и *Modify Trace*, поддерживает ввод или изменение только одного выражения, т.е. каждая область построения может иметь только одну ось X.

↑ 27.а.3. Повторить пп. 27.а.1 и 27.а.2 для каждой области построения, изменяя переменные осей X на действительные части комплексных коэффициентов передачи.

В итоге должно получиться окно *PSpice A/D*, в котором имеется несколько областей построения, в каждой из которых по оси X отложена действительная часть комплексного коэффициента передачи (рис. 30).

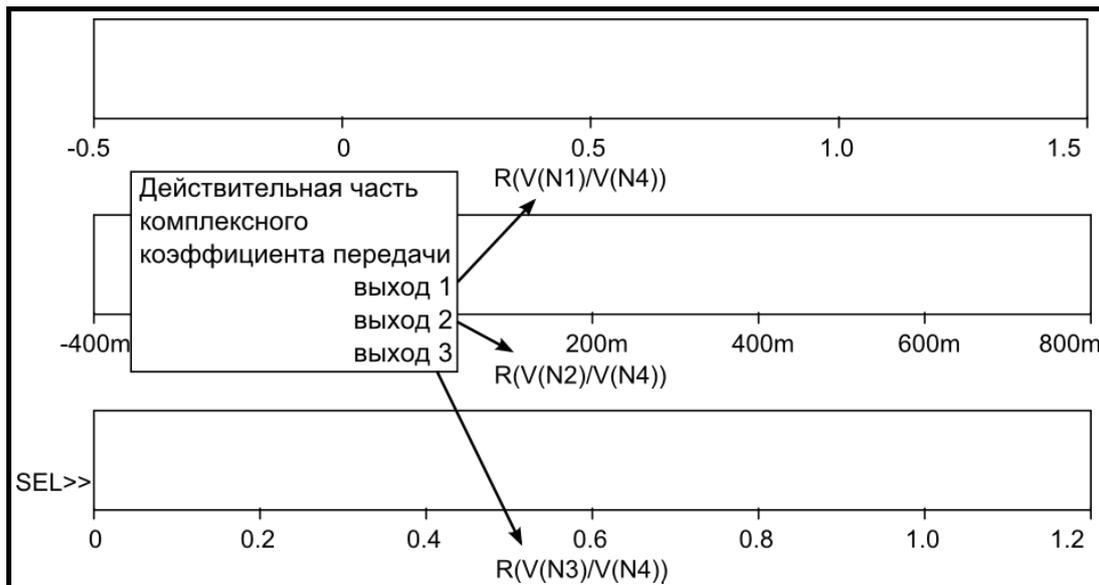


Рис. 30. Области построения в PSpice A/D с независимыми осями X

→ 27.б. Добавить переменную для оси Y.

↑ 27.б.1. Выбрать любую область построения, щелкнув в пространство области, затем открыть окно **Add Traces**.⁷

↑ 27.б.2. В окне **Add Traces** в строку **Trace Expression** ввести выражение для мнимой части соответствующего комплексного коэффициента передачи (для напряжений или токов, в соответствии с вариантом) (рис. 31).

Мнимая часть комплексной переменной в программе **Probe** находится с помощью функции **IMG**(имя переменной), – от английского *imaginary* – мнимый.

↑ 27.б.3. Повторить пп. 27.б.1 и 27.б.2 для каждой области построения.



Рис. 31. Ввод выражений для мнимой части комплексного коэффициента передачи в строку **Trace Expression** окна **Add Traces**

В итоге должно получиться окно *PSpice A/D*, в котором построены АФЧХ, каждый график в отдельной области построения (рис. 32).

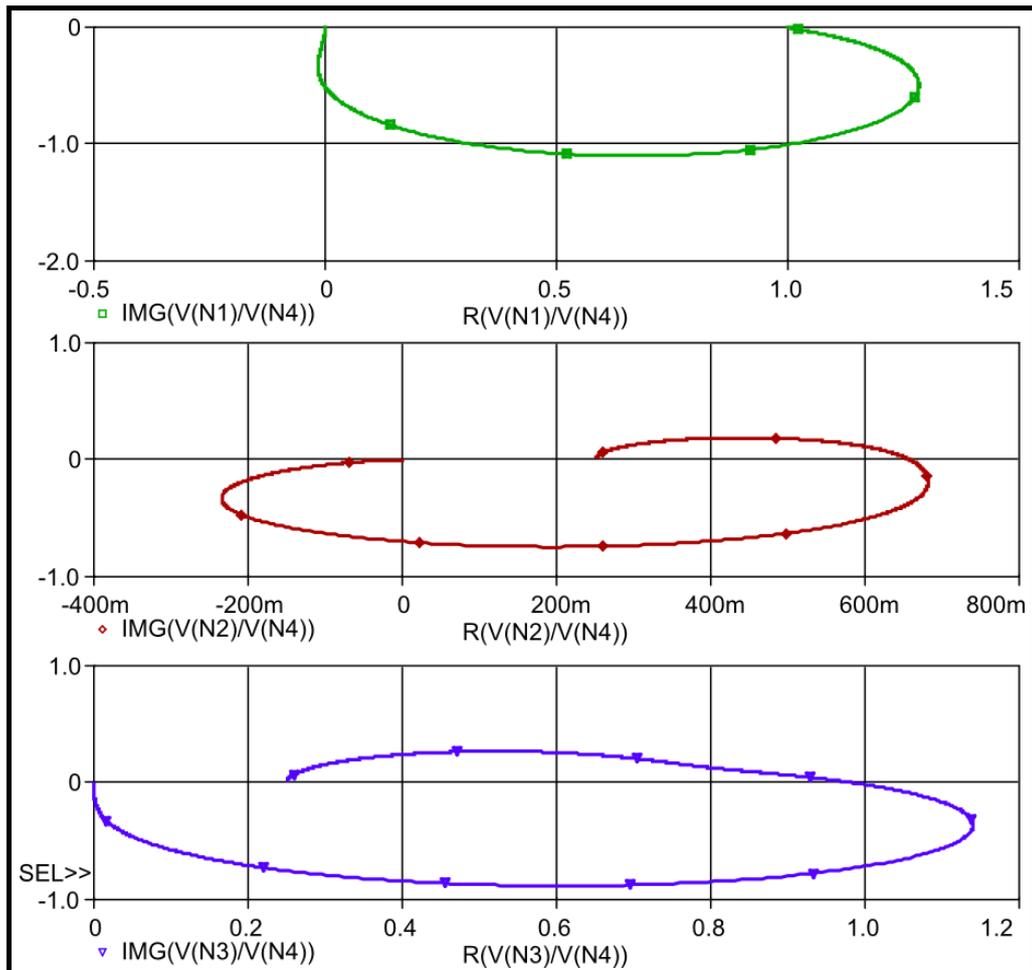


Рис. 32. Графики АФЧХ

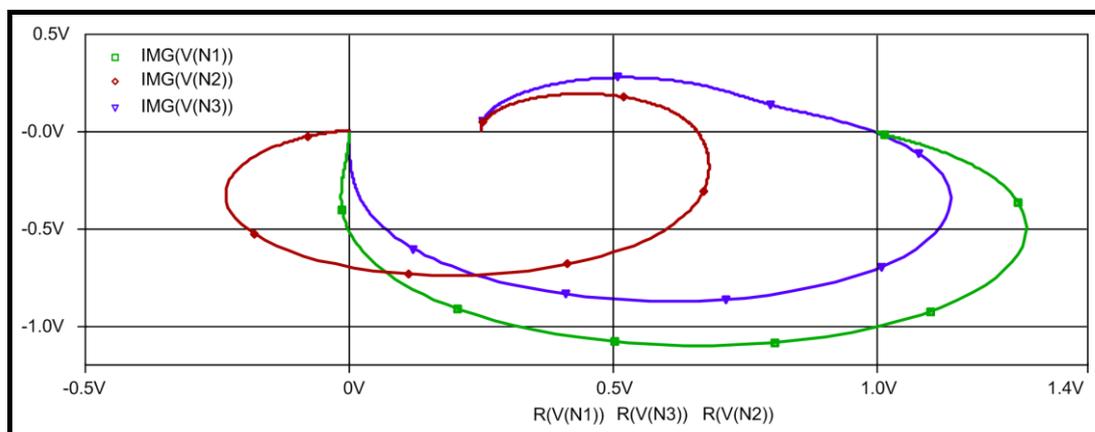


Рис. 33. Графики АФЧХ совмещенные в одну координатную сетку с помощью редактора Inkscape

К сожалению, в PSpice A/D нет возможности построить годограф для различных выходов в одной области построения, поскольку в каждой области построения возможна только одна ось X. Однако скопированный рисунок из буфера обмена можно вставить в векторный редактор разгруппировать и легко совместить, как показано на [рис. 33](#).

→ 27.в. Сохранить в заготовке отчета графики АФЧХ.⁵

Динамический анализ. Переходные характеристики

28. Преобразовать схему в соответствии с п. 4 лабораторного задания. Вместо источника входного воздействия поставить источник **VPULSE** или **IPULSE** (в соответствии с вариантом), параметры источника задать, как показано в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров источника PULSE

Параметр	Значение	Примечание
V1 (I1)	0	Амплитуда подошвы импульса
V2 (I2)	1	Амплитуда вершины импульса
TD	0	Задержка (Time Delay)
TR	1n	Время нарастания переднего фронта (Time Rise)
TF	1n	Время спада заднего фронта (Time Fall)
PW	2	Длительность вершины импульса (Pulse Width)
PER	3	Период повторения (Period)

VPULSE, **IPULSE** – импульсные источники, позволяют задавать воздействие в виде периодической последовательности импульсов трапецеидальной, пилообразной, треугольной и прямоугольной формы, применяются в динамическом анализе, при задании соответствующих параметров могут использоваться в частотном анализе и анализе по постоянному току.

Переходная характеристика – это отклик цепи на функцию включения (ступенчатое воздействие). Следует знать, что PSpice оперирует конечными значениями переменных, и нет возможности задать идеальную функцию включения, у которой амплитуда нарастает мгновенно, с бесконечной скоростью.

Смоделировать функцию включения, можно подавая на вход прямоугольный импульс единичной амплитуды, с длительностью переднего фронта много меньшей длительности переходных процессов в схеме, а длительностью импульса больше длительности переходных процессов, т. е. задний фронт нужно отодвинуть в область времен установившегося режима.

Период повторения импульсов для источников **PULSE** не может быть меньше суммы $TR+PW+TF$. Если длительности TR и TF задать равными нулю, то PSpice автоматически присвоит им значения равные 1% от общего времени анализа.

29. Создать новый профиль моделирования.³

30. Выбрать тип анализа **Time Domain** – анализ схемы во временной области. Первоначальные параметры анализа задать, как показано на рис. 34.

Run to time – общее время анализа, **Start saving data after** – время после которого начинается фиксация данных, **Maximum step size** – максимальный шаг интегрирования.

Целесообразно ограничить максимальный шаг величиной приблизительно в 1000 раз меньшей общего времени анализа. По умолчанию величина этого параметра составляет 2% от времени анализа, т. е. на весь график будет рассчитываться не менее 50 точек, этого часто недостаточно для отображения графически точных и красивых результатов.

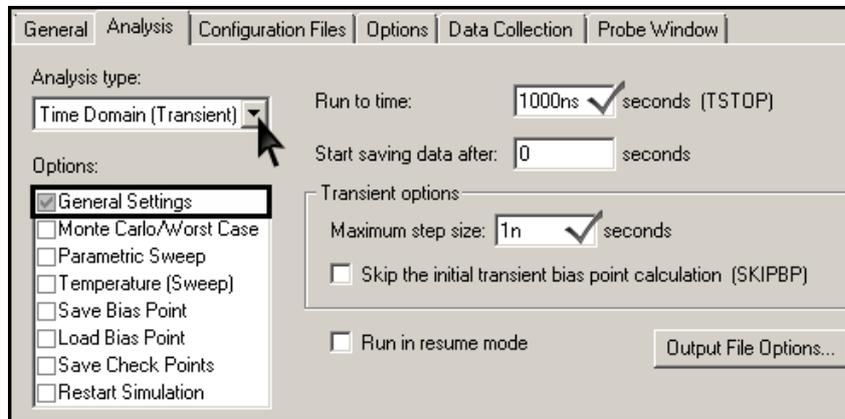


Рис. 34. Окно настройки моделирования. Настройка Time Domain

31. На закладке **Probe Window** окна **Simulation Settings** поставить флажок **Last plot**.

Поскольку профиль моделирования новый, то и настройки **Probe** надо устанавливать заново.

Можно пользоваться одним профилем моделирования, но целесообразно создать несколько профилей для различных видов анализа, при этом для облегчения ориентирования желательно задавать значащие имена профилей, например: *AC_Sweep*, *Time_1* и т. п.

32. Запустить симуляцию.²

33. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

↓ 34. Построить графики переходных характеристик.

→ 34.а. Открыть окно **Add Traces**.⁷

→ 34.б. В окне **Add Traces** ввести в строку **Trace Expression** выражения для входного сигнала и откликов на всех выходах (рис. 35), ток для нечетных, а напряжение для четных вариантов.



Рис. 35. Ввод выражений графиков переходных характеристик в строку Trace Expression окна Add Traces

→ 34.в. Проанализировать вид полученных переходных характеристик, при необходимости, открыть настройки профиля моделирования (**Simulation Settings**)⁸ и изменить общее время анализа и максимальное значение шага. Если настройки моделирования были изменены, запустить симуляцию еще раз.⁹

Время анализа задать таким образом, что бы графики переходных характеристик были видны полностью, вплоть до установившегося значения. В примере (рис. 36) время моделирование составило 200 мкс.

При изменении времени моделирования следует следить за величиной максимального шага. Для схемы из 5 узлов и 9 ветвей, при разнице между временем моделирования и шагом в 10^6 раз, файл результатов анализа может превысить 100 Мбайт.

→ 34.г. Увеличить толщину графиков, при необходимости цвет, тип линии.

→ 34.д. Сохранить графики переходных характеристик в заготовке отчета.⁵

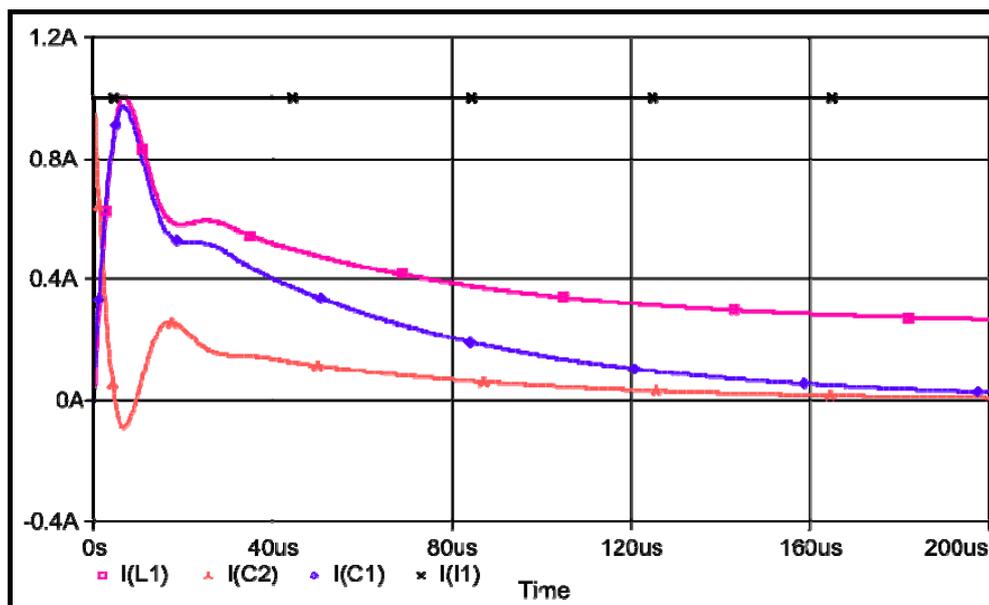


Рис. 36. Входной сигнал и переходные характеристики для токов

Если временные отклики имеют времена переходных процессов, отличающиеся на несколько порядков, построить и сохранить графики отдельно, с различными временами моделирования.

Динамический анализ. Импульсные характеристики

Импульсная характеристика – это отклик цепи на дельта-функцию – импульс бесконечно малой длительности и бесконечно большой амплитуды, с площадью равной единице.

Зная, что импульсная и переходная характеристики связаны соотношением – $g(t) = h'(t)$, где $g(t)$ – импульсная, а $h(t)$ – переходная характеристика, можно с помощью средств постпроцессора Probe взять производную от полученных переходных характеристик.

В переходной характеристике в начальный момент времени (момент включения) могут присутствовать скачки напряжения или тока (в соответствии с законами коммутации ток в емкости и напряжение на индуктивности могут изменяться скачком). В этом случае амплитуда

импульсной характеристики может достигать очень больших значений, при идеальном входном воздействии – бесконечных.

Производная сигнала в программе Probe находится с помощью функции D (имя переменной), D – от английского derivative – производная.

Другой способ получения импульсных характеристик заключается в подаче на вход одиночного импульса единичной площади, с большой амплитудой и маленькой длительностью. В моделях дельта-импульс представляют импульсом с конечной амплитудой, длительностью в один шаг симуляции, с площадью равной 1. В PSpice шаг переменный, поэтому целесообразно выбирать длительность импульса много меньше времени переходного процесса.

↓ 35. Построить графики импульсных характеристик.

→ 35.а. Удалить график входного сигнала. Для этого в строке легенды щелкнуть выражение для графика мышью и нажать клавишу **Delete**.

→ 35.б. Последовательно отредактировать в строке легенды выражения для всех графиков, пример: $V(N1) \rightarrow D(V(N1))$ – четный вариант, $I(L1) \rightarrow D(I(L1))$ – нечетный вариант.

В полученном результате из-за большой скорости нарастания переднего фронта входного импульса, производная в первый момент времени велика (для источника напряжения – 1 ГВ/с, при длительности переднего фронта 1 нс и амплитуде 1 В), и на фоне этого значения менее амплитудные изменения не видны. Следует отмасштабировать оси таким образом, чтобы исключить из области построения начальный момент времени (момент включения), и стали заметны менее амплитудные и более информативные изменения импульсных характеристик.

→ 35.в. Изменить диапазон отображаемых по оси X значений. Открыть окно настройки параметров сетки и осей⁶ (**Axis Settings**). На закладке **X Axis** в разделе **Data Range** поставить флажок **User Defined** (определяется пользователем) и отредактировать начальное значение оси X введя 2 нс (**рис. 37**).

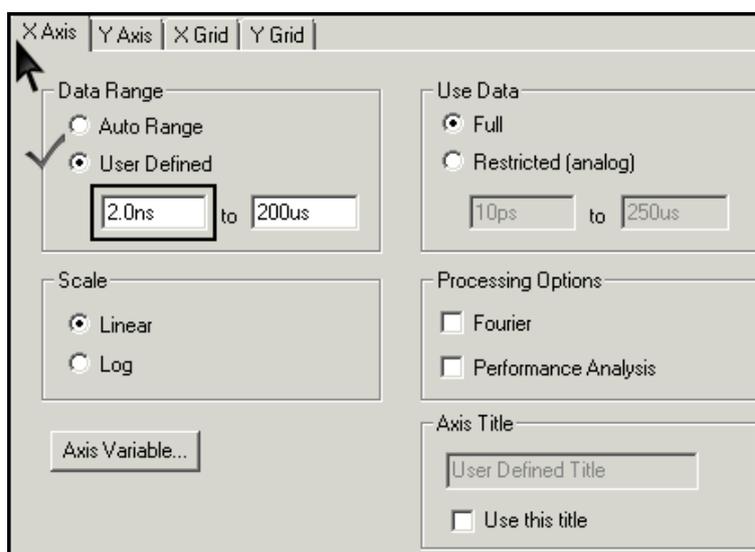


Рис. 37. Масштабирование оси X через опции окна Axis Settings

Масштабные суффиксы в программе Probe немного отличаются от используемых в PSpice и Capture. Суффикс Мега – 10^6 , записывается как **M**, за суффиксом милли – 10^{-3} , закреплено **m**. Программа PSpice не различает большие и маленькие буквы.

Для получения удовлетворительного результата, можно также методом последовательного приближения отмасштабировать ось Y до адекватного отображения графиков импульсных характеристик.

→ 35.г. Сохранить графики импульсных характеристик в заготовке отчета.⁵

Обработка экспериментальных данных

Результаты компьютерного анализа схемы по постоянному току и неавтоматизированного расчета выполненного при подготовке к работе свести в одну таблицу, пример: см. **табл. 5**.

Определить по графикам времена переходных процессов для всех выходов. Проанализировать на взаимное соответствие частотные и временные характеристики. Сравнить результаты расчетов по постоянному току.

Содержание отчета

Цель работы, исходная схема, результаты подготовки к работе (включая упрощенную схему, исходные соотношения, вывод формул), результаты анализа по постоянному току (скриншот и таблица (см. **табл. 5**)), скриншоты всех используемых в работе схем выполненных в OrCAD Capture, графики всех полученных характеристик, выходной и схемный файл, файл соединений, директивы анализа с параметрами, выводы по работе.

Таблица 5

Результаты автоматизированного и ручного расчета схемы по постоянному току

Параметр	Анализ PSpice	Ручной расчет
I_{R1} , мА		
I_{R2} , мА		
I_{C1} , мА		
I_{C2} , мА		
I_{L1} , мА		
I_{E1} , мА		
I_{E2} , мА		
I_{Y1} , мА		
U_{A1} , В		
...		
$R_{вх}$, Ом		
$R_{вых}$, Ом		

Контрольные вопросы

1. Что называется линейными элементами электрической цепи?
2. Что называется линейной электрической цепью?
2. Что такое идеальные источники тока и напряжения, их ВАХ?
3. В чем заключаются отличия реальных и идеальных источников энергии в цепи? Привести примеры реальных источников тока и напряжения.
4. Каковы основные задачи частотного анализа?
5. Каковы основные задачи переходного анализа?
6. Каковы основные задачи статического анализа?
8. Какие параметры задаются при настройке частотного анализа (PSpice)? Название частотного анализа в PSpice.
9. Какие параметры задаются при настройке динамического анализа (PSpice)? Название динамического анализа в PSpice.
10. Параметры источников VPULSE и IPULSE (PSpice).
11. Параметры источников VAC и IAC (PSpice).
12. Что такое переходная и импульсная характеристики цепи, их взаимосвязь?
13. Разъяснить с помощью схемы происхождение полученных величин тока и напряжения для всех видов анализа.
14. Задачи, какого уровня проектирования решались в лабораторной работе?
15. Какие проектные процедуры выполнялись в лабораторной работе?
16. По характеру отображаемых свойств, какое описание РЭС использовалось в лабораторной работе?
17. К какому виду обеспечения САПР относиться пакет OrCAD?
18. Определение РЭС в соответствии с ГОСТ Р 52003-2003.
19. Директивы частотного и динамического анализа в PSpice.
20. Дайте определение амплитудно- и фазо-частотной характеристикам.
21. С помощью каких функций, в PSpice находится ГПЗ, ФЧХ?
22. Директива расчета малосигнальной передаточной функции.
23. Расширения схемного, выходного файлов и файла соединений, их содержание?
24. Как в PSpice построить АФЧХ?
25. Как в PSpice построить переходную и импульсную характеристики?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Исследование моделей полупроводниковых приборов

В качестве исследуемых моделей предлагается использовать spice-модели биполярных транзисторов общего применения фирм: NXP Semiconductors, ON Semiconductor и Diodes Incorporated.

Выполнение лабораторной работы рассчитано на два занятия и состоит из двух частей: первая – формирование библиотеки с математической моделью транзистора *.lib на основе текстового файла spice-модели от производителя, получения ее вольтамперных характеристик и определения по ним и паспортным данным, параметров эквивалентной линейной схемы замещения транзистора; вторая – получение и сравнение характеристик схемы усилительного каскада построенного на основе линейной модели транзистора, со схемой, построенной на основе spice-модели.

Цель работы

Изучение методики создания моделей полупроводниковых приборов с помощью Model Editor.

Исследование spice-модели биполярного транзистора средствами OrCAD на примере усилительного каскада.

Изучение линейной П-образной модели биполярного транзистора.

Основные теоретические положения

Биполярным транзистором (БТ) называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор, имеющий в своей структуре два взаимодействующих р-n-перехода и три внешних вывода, и предназначенный, в частности, для усиления электрических сигналов. Усилительные свойства обусловлены явлениями инжекции и экстракции не основных носителей заряда. Термин “биполярный” подчеркивает тот факт, что принцип работы прибора основан на взаимодействии с электрическим полем частиц, имеющих как положительный, так и отрицательный заряд, – дырок и электронов.

В зависимости от того, в каких состояниях находятся переходы транзистора, различают режимы его работы. Поскольку в транзисторе имеется два перехода (эмиттерный и коллекторный), и каждый из них может находиться в двух состояниях (открытом и закрытом), различают четыре режима работы транзистора. Основным режимом является **активный** режим, при котором эмиттерный переход находится в открытом состоянии, а коллекторный – в закрытом. Транзисторы, работающие в активном режиме, используются в усилительных схемах. Помимо активного, выделяют **инверсный** режим, при котором эмиттерный переход закрыт, а коллекторный – открыт, режим **на-**

сыщения, при котором оба перехода открыты, и режим **отсечки**, при котором оба перехода закрыты.

Наряду с транзисторами n-p-n структуры, существуют транзисторы с симметричной ей p-n-p-структурой, в которых используется поток дырок. Стрелка на выводе эмиттера показывает направление эмиттерного тока в активном режиме. Принцип работы n-p-n- и p-n-p-транзисторов одинаков, а полярности напряжений между их электродами и направления токов в цепях электродов противоположны.

В большинстве электрических схем транзистор используется в качестве четырехполюсника, то есть устройства, имеющего два входных и два выходных вывода. Поскольку транзистор имеет только три вывода, для его использования в качестве четырехполюсника необходимо один из выводов транзистора сделать общим для входной и выходной цепей. Соответственно различают три схемы включения транзистора: схемы с общей базой (**ОБ**), общим эмиттером (**ОЭ**) и общим коллектором (**ОК**).

Среди многочисленных вариантов усилительных каскадов на БТ самое широкое применение находит **усилительный каскад с ОЭ**, имеющий максимальный коэффициент передачи по мощности K_p . пример простого усилительного каскада с ОЭ приведен на [рис. П.2](#).

Характеристиками транзисторов пользуются для определения режимов работы транзисторных каскадов по любой схеме включения, а также для графического анализа этих каскадов при больших сигналах. При аналитическом методе расчета транзисторных каскадов пользуются линейными эквивалентными схемами транзисторов, которые отражают структурную связь малосигнальных параметров транзистора в режиме переменного тока.

Эквивалентные схемы транзистора подразделяют на две большие группы: эквивалентные схемы, построенные с учетом физических свойств транзистора, его структуры и геометрии (модели транзистора), и эквивалентные схемы, отражающие свойства транзистора как активного линейного четырехполюсника (формальные эквивалентные схемы). Первые характеризуются физическими (внутренними) параметрами транзистора, вторые – параметрами транзистора как четырехполюсника (характеристическими параметрами).

Эквивалентная схема, содержащая физические параметры транзистора, может быть составлена для любой схемы его включения: ОБ, ОЭ, ОК. На [рис. 38](#), а показана упрощенная, так называемая линейная П-образная эквивалентная схема транзистора (модель Джаколетто).

В программе **PSpice** используется схема замещения БТ в виде адаптивной модели **Гуммеля-Пуна**, которая включает более 50 различных параметров. Если пользователь не располагает такими данными, то эта модель автоматически упрощается до более простой модели **Эберса-Молла**, если опустить некоторые параметры. В анализе **AC Sweep** используются линеаризованная схема замещения, построенная на основе П-образной модели.

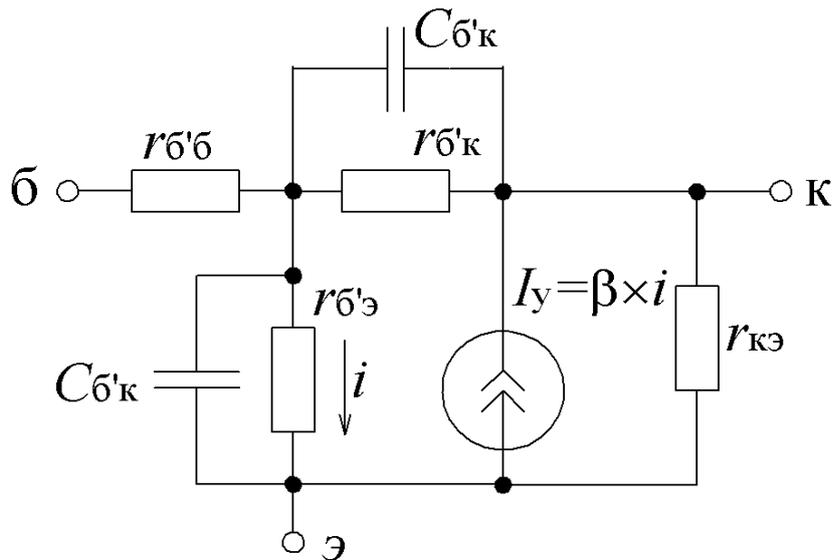


Рис. 38. Эквивалентная П-образная схема замещения БТ (модель Джиаколетто)

Графически проиллюстрировать работу каскада с ОЭ можно, используя входные и выходные статические характеристики БТ, путем построения его динамических характеристик (ДХ). Вследствие слабой зависимости входной проводимости транзистора от величины нагрузки, входные статические и динамические характеристики практически совпадают.

Статические характеристики транзистора могут задаваться соответствующими аналитическим выражениями, а могут быть представлены графически. Несколько характеристик одного типа, полученные при различных значениях параметра, образуют семейство характеристик. Семейства входных и выходных характеристик транзистора считаются основными и приводятся в справочниках, с их помощью легко могут быть получены два других семейства характеристик. В различных схемах включения транзистора в качестве входных и выходных токов и напряжений выступают токи, протекающие в цепях различных электродов, и напряжения, приложенные между различными электродами. Поэтому конкретный вид статических характеристик зависит от схемы включения транзистора.

В схеме с ОЭ входным током является ток базы I_b , а выходным – ток коллектора, соответственно, входным напряжением является напряжение $U_{бэ}$, а выходным – напряжение.

Для съема статических характеристик БТ в PSpice используется **DC Sweep** анализ – многовариантный анализ по постоянному току. **DC** – direct current – постоянный ток.

DC Sweep анализ позволяет получать характеристики схемы (токи, напряжения, мощности) при изменении параметров источников напряжения, источников тока, глобальных параметров схемы, параметров модели и температуры элемента. При анализе задаются интервалы изменения перечислен-

ных параметров, характер и шаг их изменения. Возможно также табличное задание изменения перечисленных параметров. Существует возможность одновременного изменения двух параметров.

Выходные ДХ – это прямые линии, которые в координатах I_{κ} , $U_{\kappa\text{э}}$ соответствуют уравнениям, выражающим зависимости между постоянными и переменными значениями токов и напряжений на нагрузках каскада по постоянному и переменному току. Пример построения ДХ показан на **рис. 39**.

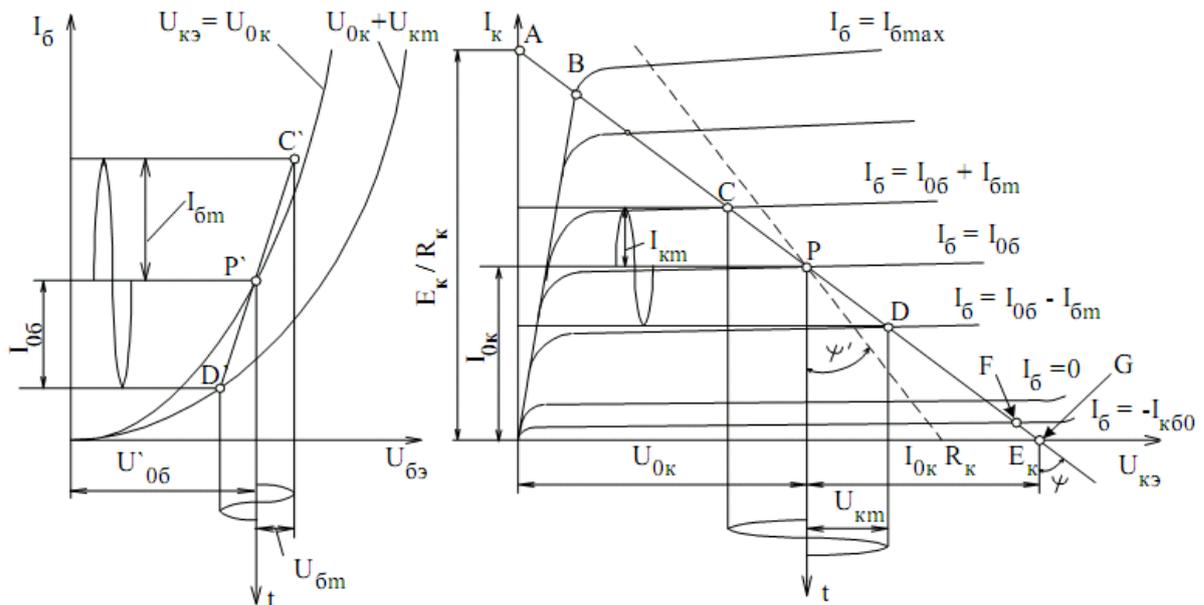


Рис. 39. Динамические характеристики каскада с ОЭ

Точку пересечения нагрузочной прямой со статической характеристикой при заданном токе $I_{\text{б2}} = I_{0\text{б}}$, определяемом источником смещения E_{κ} , называют рабочей точкой, а ее начальное положение на нагрузочной прямой (при отсутствии входного переменного сигнала) – точкой покоя. Точка покоя определяет ток покоя выходной цепи $I_{0\kappa}$ и напряжение покоя $U_{0\kappa}$.

Положение точки покоя определяется назначением схемы, в которой используется транзистор, значением и формой входного сигнала и т. д. Если, например, входной сигнал симметричен (на **рис. 39** показан такой сигнал синусоидальной формы с амплитудой входного напряжения $U_{\text{бм}}$ и амплитудой входного тока $I_{\text{бм}}$), то точку покоя P выбирают примерно на середине нагрузочной линии. При этом в коллекторной цепи проходит ток с амплитудой $I_{\text{км}}$, а на коллекторе будет напряжение с амплитудой $U_{\text{км}}$.

Отметим, что в режиме покоя напряжение $U_{0\text{б}}$ составляет десятки и сотни мВ (обычно 0,5...0,8 В). При подаче на вход положительной полуволны синусоидального сигнала будет возрастать ток базы, а, следовательно, и ток коллектора. В результате напряжение на R_{κ} возрастет, а напряжение на коллекторе уменьшится, т. е. произойдет формирование отрицательной полу-

волны выходного напряжения. Таким образом, каскад с ОЭ осуществляет инверсию фазы входного сигнала на 180° .

Если координаты рабочей точки для малосигнальных усилительных каскадов выбирают на линейных участках входной и выходной вольтамперной характеристики (ВАХ) БТ, то усилитель работает в так называемом **режиме (классе) усиления А**.

Для режима усиления А важным является величина нелинейных искажений. **Нелинейные искажения** – это изменения формы колебания, обусловленные нелинейностью характеристик транзистора. Простейшая количественная оценка нелинейных искажений производится с помощью *коэффициента гармоник*:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots} / U_1,$$

где U_1 , U_2 , U_3 и т. д. – действующие значения напряжений отдельных гармоник выходного напряжения. Вместо действующих значений, можно использовать амплитудные. Для оценки амплитуд отдельных гармоник спектра выходного сигнала, в программе OrCAD можно воспользоваться преобразованием Фурье, доступного в режиме анализа **Time Domain**.

Другим важным параметром усилителя является **коэффициент полезного действия (КПД)** усилителя, характеризующий экономичность расходования энергии источника питания. Чем выше КПД усилителя, тем меньше мощность потерь в нем, которая превращается в тепло.

КПД каскада (КПД выходной цепи) определяется как:

$$\eta = P_{\text{вых}} / P_0 = 0,5 I_{\text{км}} U_{\text{км}} / P_0,$$

где, P_0 – мощность затрачиваемая источником питания, $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность.

Подготовка к работе. Часть 1

Ознакомиться с целями и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе. Дополнительная литература для подготовки см. [13, 14].

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к лабораторной работе.

Получить у преподавателя номер варианта, в соответствии с вариантом выбрать модель транзистора, схему и параметры схемы для анализа (**Приложение 2**). Получить у преподавателя файл spice-модели и паспортные данные (datasheet) выбранного транзистора. Документация и spice-модели транзисторов также доступны на сайтах производителей.



Лабораторное задание. Часть 1

1. Пользуясь данными spice-модели транзистора от производителя создать с помощью PSpice Model Editor файл библиотеки графических символов (*.olb).

2. Получить семейство выходных ВАХ созданной модели транзистора для схемы с ОЭ, построить гиперболу максимальной рассеиваемой мощности. В соответствии с заданием (**Приложение 2**) построить нагрузочную характеристику, определить параметры рабочей точки (I_K , I_{60} , $U_{кэ}$, $I_{к0}$, $U_{кэ0}$), параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$.

3. Получить семейство входных ВАХ созданной модели транзистора для схемы с ОЭ, определить параметр рабочей точки ($U_{бэ0}$), параметры $h_{11э}$ и $h_{12э}$.

Порядок выполнения и рекомендации. Часть 1

Создание условного графического обозначения транзистора средствами Model Editor

1. Загрузить редактор моделей – программный модуль OrCAD PSpice Model Editor.

Программа OrCAD PSpice Model Editor (редактор моделей) служит для создания и редактирования spice-моделей электронных компонентов, имеет средства, позволяющие создавать новые библиотеки моделей, добавлять модели в уже существующие библиотеки. Model Editor имеет средства для привязки spice-моделей к готовым условным графическим обозначениям (УГО) компонентов, средства импорта моделей из других форматов.

2. Открыть файл библиотеки spice-модели транзистора и сохранить в папку проекта. Команда **File>Open**, затем **File>Save As...**. Средствами Windows создать папку, в которой будет размещаться проект, и сохранить в нее файл spice-модели (расширение файла – *.lib).

↓ 3. Создать и сохранить библиотеку графического символа транзистора в папке проекта (расширение файла – *.olb).

→ 3.а. Запустить **Model Import Wizard** (мастер импорта моделей). В Model Editor команда **File>Model Import Wizard [Capture]...** (**рис. 40**).

Spice-модель транзистора, как и любая другая spice-модель – это текст с определенными правилами синтаксиса – может быть представлена в виде совокупности параметров (директива .MODEL в начале описания модели), либо в виде списка соединений подсхемы связанных компонентов со встроенными моделями (директива .SUBCKT – макромодель).

Модель БТ определенная директивой .MODEL – это набор параметров адаптивной модели Гуммеля-Пуна. Параметры не заданные в тексте модели, будут приняты равными значениями по умолчанию.

Модель, определенная директивой *.SUBCKT* может включать в себя подсхемы из моделей, не имеющих действительной физической реализации в компоненте, но позволяющих получить более точные результаты моделирования. Например, модель БТ может быть дополнена виртуальным диодом между базой и коллектором улучшающим результаты моделирования при обратном смещении на коллекторном переходе.

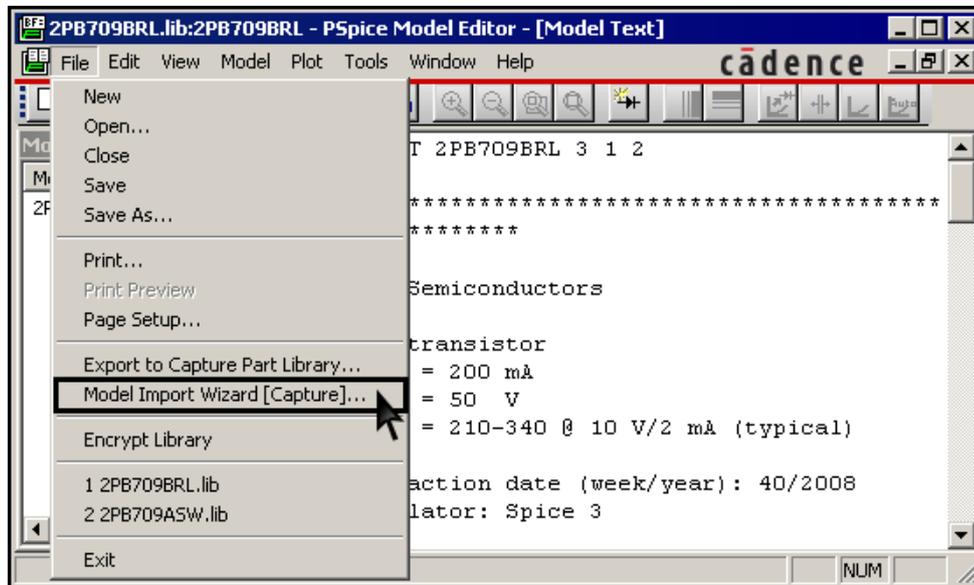


Рис. 40. Запуск мастера импорта моделей в Model Editor

→ 3.б. В окне мастера импорта **Specify Library** указать пути к библиотекам *.lib и *.olb, а также название библиотеки символов, в которой будет сохраняться УГО транзистора (рис. 41). Нажать кнопку **Далее**.

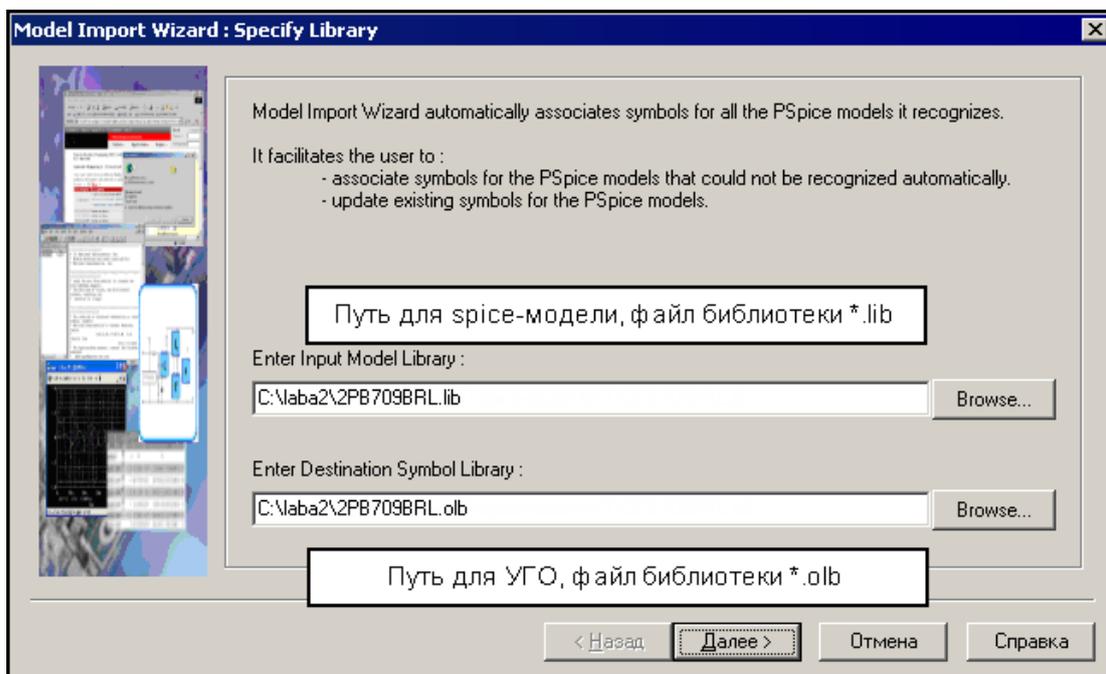


Рис. 41. Мастер импорта моделей. Задание путей для библиотек

→ 3.в. В окне мастера импорта **Associate/Replace Symbol** нажать **Associate Symbol** (присоединить символ) (рис. 42). Для моделей определенных через директиву `.MODEL`, как правило, сопоставление корпуса происходит автоматически, в этом случае перейти к п. 3.ж.

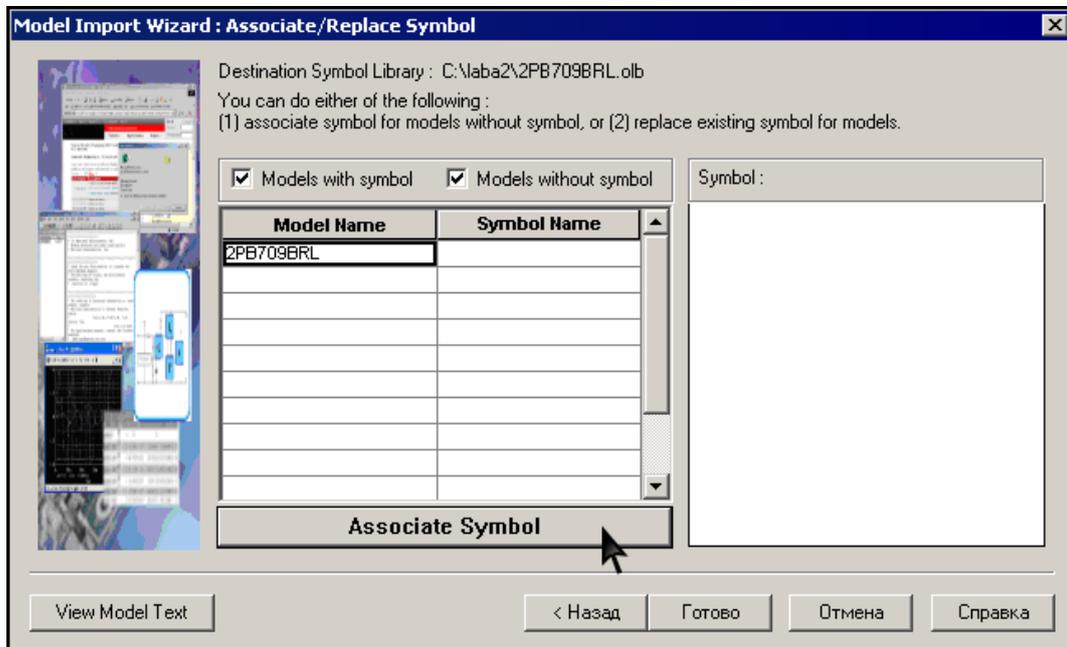


Рис. 42. Мастер импорта моделей. Присоединение символа УГО

→ 3.г. В окне мастера импорта **Select Matching** указать путь для библиотеки содержащей УГО транзистора (рис. 43). Использовать библиотеку **modeled.etc** по адресу: `\OrCAD\tools\capture\library\pspice\`.

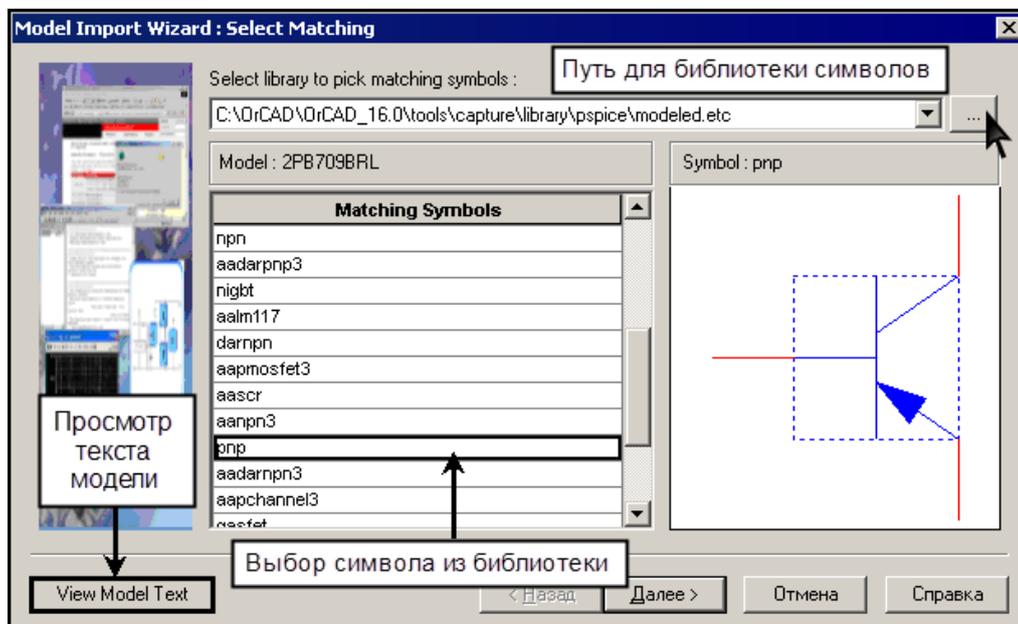


Рис. 43. Мастер импорта моделей. Выбор библиотеки символов и сопоставление УГО

*Библиотека **modeled.etc** содержит базовый набор символов для транзисторов. Можно также использовать любую библиотеку содержащую УГО БТ.*

→ 3.д. В разделе **Matching Symbols** выбрать УГО БТ с необходимым типом проводимости (р-п-р или n-р-n) (рис. 43). Для определения типа проводимости нажать кнопку **View Model Text** (просмотр текста модели) и найти в открывшемся окне требуемую информацию (рис. 44). После выбора УГО нажать кнопку **Далее**.

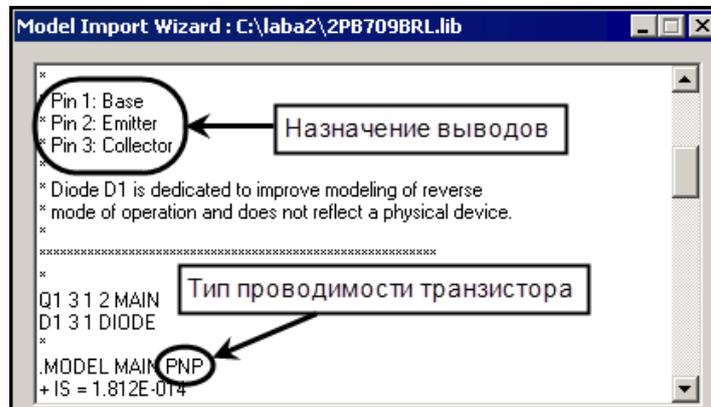


Рис. 44. Мастер импорта моделей. Окно просмотра текста модели

→ 3.е. В окне мастера **Define Pin Mapping** сопоставить номера выводов назначению и нажать **Save Symbol** (рис. 45). Для определения назначения выводов просмотреть текст модели (рис. 43) и найти в открывшемся окне требуемую информацию (рис. 44).

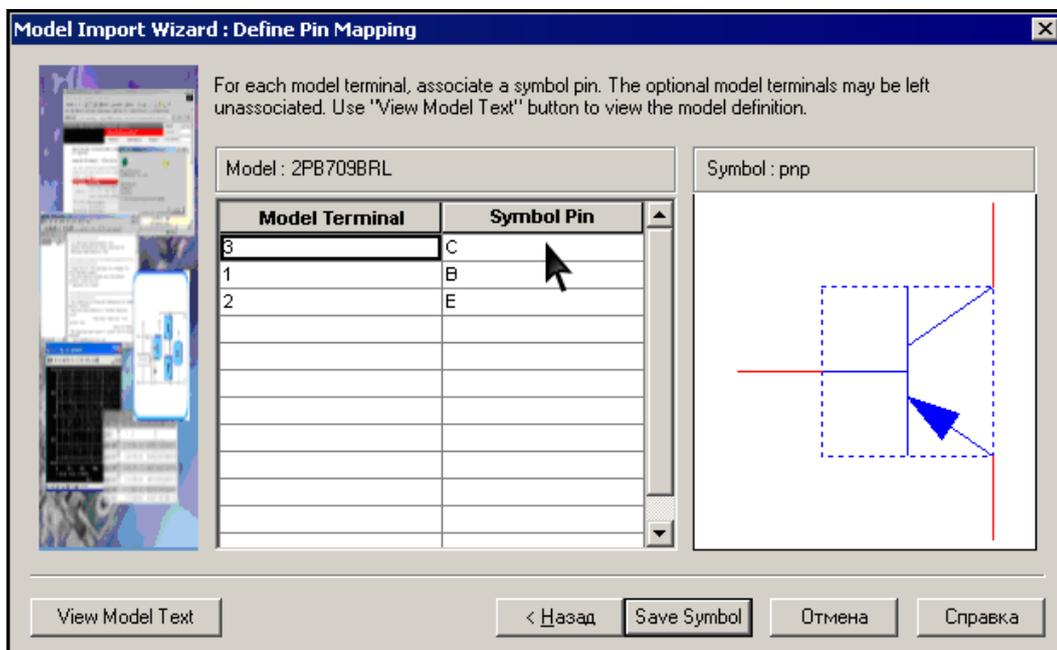


Рис. 45. Мастер импорта моделей. Окно определения выводов УГО

Форма описания включения БТ: $Q<имя> <узел коллектора> <узел базы> <узел эмиттера> <имя модели>$. Если в тексте модели комментариями не определено назначение выводов, воспользоваться приведенной выше формой описания (рис. 46)

```
8 CBCG 33 11 6.2E-14
9 CBEG 22 11 4.5E-14
11 +
12 Q1 33 11 22 PMBT4401
13 *
14 .MODEL PMBT4401 NPN
15 + IS=29.13E-15
```

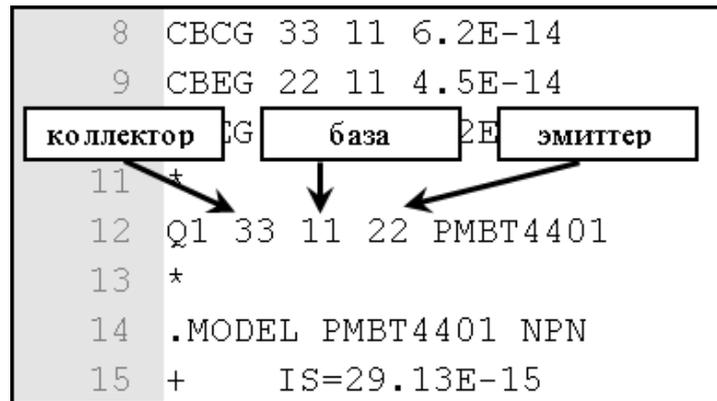


Рис. 46. Фрагмент текста модели БТ. Назначение выводов

→ 3.ж. Нажать кнопку **Готово**. Просмотреть открывшийся журнал событий (**Log File**), удостовериться в отсутствии ошибок, нажать **ОК** и закрыть Model Editor.

Подключение библиотек модели и символа компонента к проекту

4. Загрузить графический редактор схем – программный модуль OrCAD Capture (CIS).

5. Создать проект (**Analog or Mixed A/D**).

↓ 6. Подключить к проекту библиотеки *.lib и *.olb своего транзистора.

→ 6.а. Открыть окно настройки моделирования **Simulation Settings**¹.

→ 6.б. На закладке **Configuration Files** выбрать категорию **Libraries** и в строке **Filename** указать путь к файлу библиотеки модели компонента (рис. 47).

→ 6.в. Добавить библиотеку в проект. Щелкнуть **Add to Design** (рис. 47).

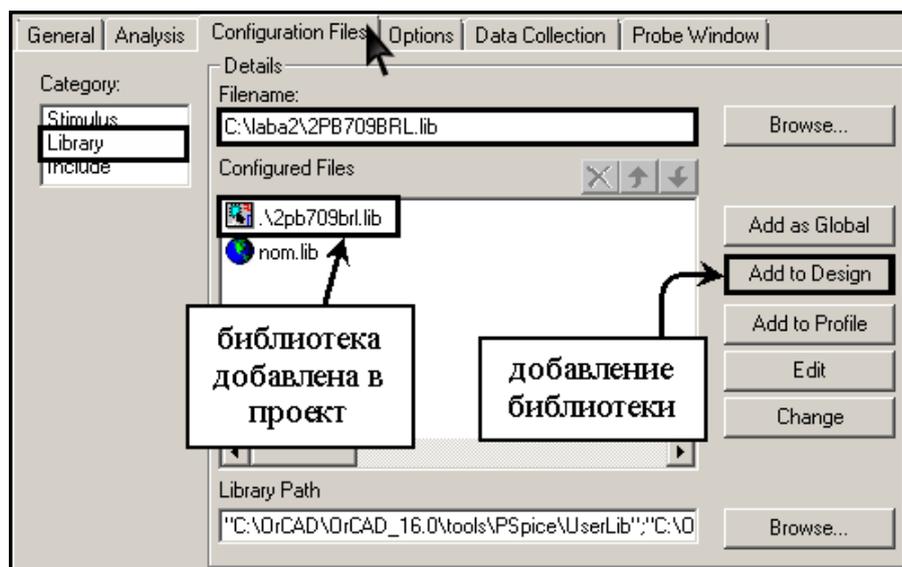


Рис. 47. Подключение библиотеки модели компонента *.lib

*В версии OrCAD 9.2 категории **Stimulus**, **Library** и **Include** оформлены как отдельные закладки окна **Simulation Settings**.*

Add as Global – делает библиотеку доступной во всех проектах.

Add to Design – добавляет библиотеку только к текущему проекту.

Add to Profile – делает библиотеку доступной только для этого конкретного профиля моделирования.

При использовании категории **Library** добавление описания модели во входной файл происходит по директиве **.LIB**.

При изменении местоположения библиотеки, например, при переносе проекта на другой компьютер, следует заново указать путь к библиотеке.

Если PSpice не найдет библиотеки в выходном файле появится сообщения вида: «**ERROR - Model <имя модели> used by Q_Q1 is undefined**».

Библиотеку модели можно добавить и с помощью категории **Include**, в этом случае текст файла библиотеки будет добавлен во входной файл по директиве **.INC**.

→ б.г. Открыть окно добавления компонентов (**Place Part**). Щелкнуть **Add Library** (рис. 48) и в открывшемся окне указать путь к файлу *.olb.

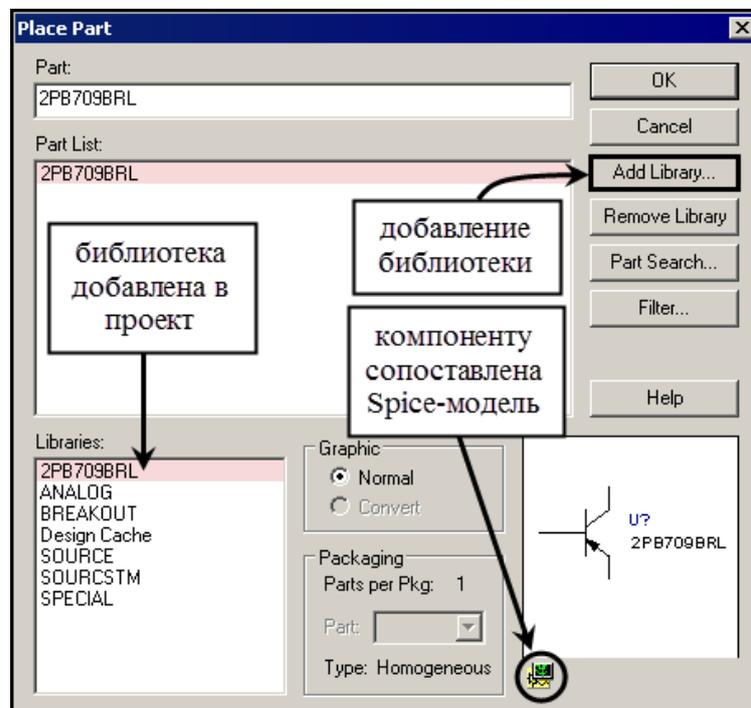


Рис. 48. Добавление библиотеки символа компонента *.olb

Значок в правой нижней части окна **Place Part** показывает наличие spice-модели для данного компонента.

Построение выходных ВАХ БТ

↓ 7. Снять семейство выходных характеристик биполярного транзистора для схемы с ОЭ.

→ 7.а. Собрать схему для съема выходных характеристик (рис. 49).

Полярность источников зависит от полярности транзистора.

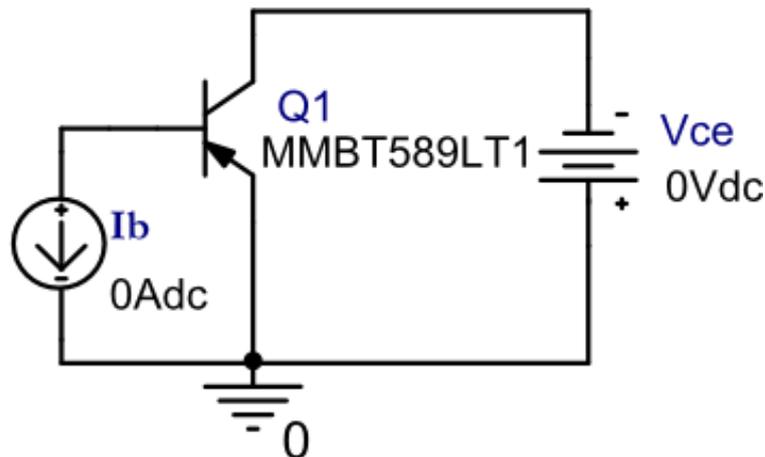


Рис. 49. Схема для съема выходных характеристик БТ с ОЭ

- 7.б. Обозначить источник базового тока – I_b , а источник напряжения коллектор-эмиттер – V_{ce} . Схему сохранить в заготовке отчета.
- 7.в. Создать новый профиль моделирования.³
- 7.г. Выбрать тип анализа **DC Sweep**.
- 7.д. В **Options** выбрать **Primary Sweep** и задать параметры основной переменной.

В качестве основной переменной (**Primary Sweep**) выбираем напряжение источника V_{ce} , начальное значение (**Start Value**) можно задать равным нулю. Конечное значение (**End Value**) задать равным $U_{кэ\max}$ – максимально допустимому напряжению коллектор-эмиттер для данного транзистора (справочный параметр, указан в datasheet на транзистор в разделе Maximum Ratings, параметр – Collector-Emitter Voltage), шаг (**Increment**) – 10 мВ. Пример показан на **рис. 50**.

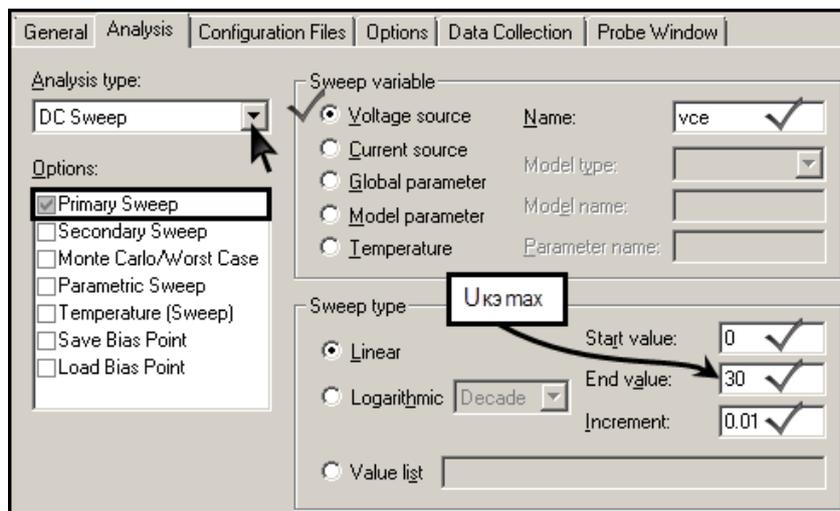


Рис. 50. Настройка параметров Primary Sweep. Выходные характеристики

В ходе анализа **DC Sweep** производится серия анализов цепи по постоянному току, при изменении параметров источников напряжения, источников тока, глобальных параметров (например, номиналов компонентов), параметров моделей или температуры.

→ 7.е. В **Options** выбрать **Parametric Sweep** и задать параметры второстепенной переменной.

В качестве второстепенной или параметрической переменной (**Parametric Sweep**) выбираем ток источника **I_b**, начальное значение (**Start Value**) задать равным нулю. Конечное значение (**End Value**) задать равным 1 мА, шаг (**Increment**) – 100 мкА. Пример показан на **рис. 51**.

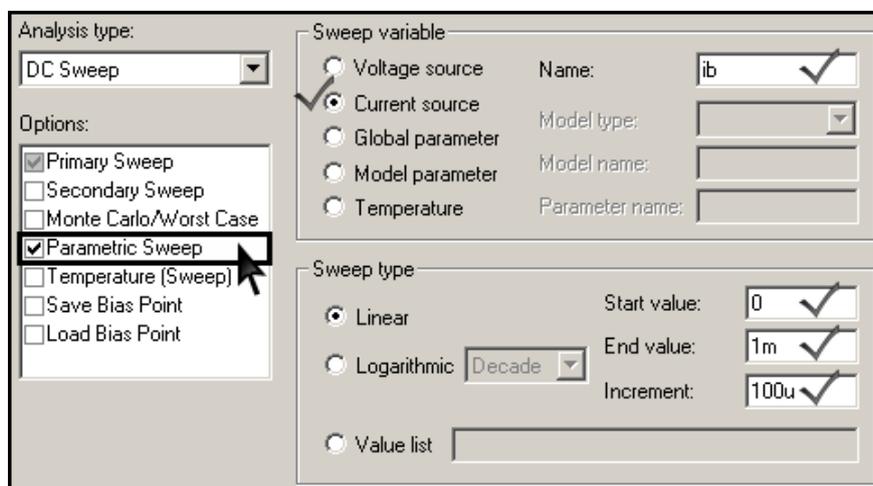


Рис. 51. Настройка параметров Parametric Sweep. Выходные характеристики

*Исследуя статические характеристики при вариации какого-либо параметра можно, для задания параметрической переменной также пользоваться опцией **Secondary Sweep**, отличие заключается в том, что все семейство характеристик будет построено одной линией, т. е. невозможно будет определить какому току базы соответствует какая-либо характеристика.*

→ 7.ж. На закладке **Probe Window** включить опцию **Last plot**.

→ 7.з. Запустить симуляцию.²

→ 7.и. Построить графики выходных характеристик транзистора. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражение **IC(Q1)** – ток коллектора транзистора.

Если полученный ток отрицательный, для удобства дальнейшей работы, изменить знак перед выражением.

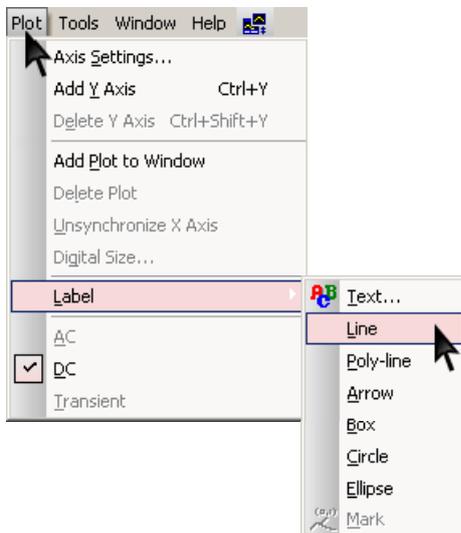
→ 7.к. Отмасштабировать оси, так чтобы граничные отображаемые значения соответствовали $U_{кэ\max}$ и $I_{к\max}$ (справочные параметры указанные в datasheet на транзистор).

→ 7.л. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

8. Построить гиперболу максимальной рассеиваемой мощности. Открыть окно **Add Traces**⁷ и в строку **Trace Expression** ввести выражение **Pmax/V_Vce**, вместо **Pmax** подставить максимальную мощность рассеивания транзистора указанную в datasheet на транзистор.

9. Построить нагрузочную линию. Команда **Plot>Label>Line** (рис. 52).

Нагрузочную линию провести от точки $V_{Vce} = 80\%U_{кэ\max}$ на оси X (V_{Vce}), по касательной к гиперболе мощности до пересечения с осью Y .



Чтобы провести линию с помощью инструмента **Line**, нужно мышью указать начальную и конечную точки линии.

Для удаления линии с области построения надо выделить линию щелчком кнопки мыши и нажать клавишу **Delete**.

10. Изменяя параметры второстепенной переменной (источник **Ib**), масштабируя графики и при необходимости корректируя нагрузочную линию привести построение к примерному виду – рис. 53 – показан пример выходных характеристик, нагрузочной линии и гиперболы мощности.

Рис. 52. Построение линии

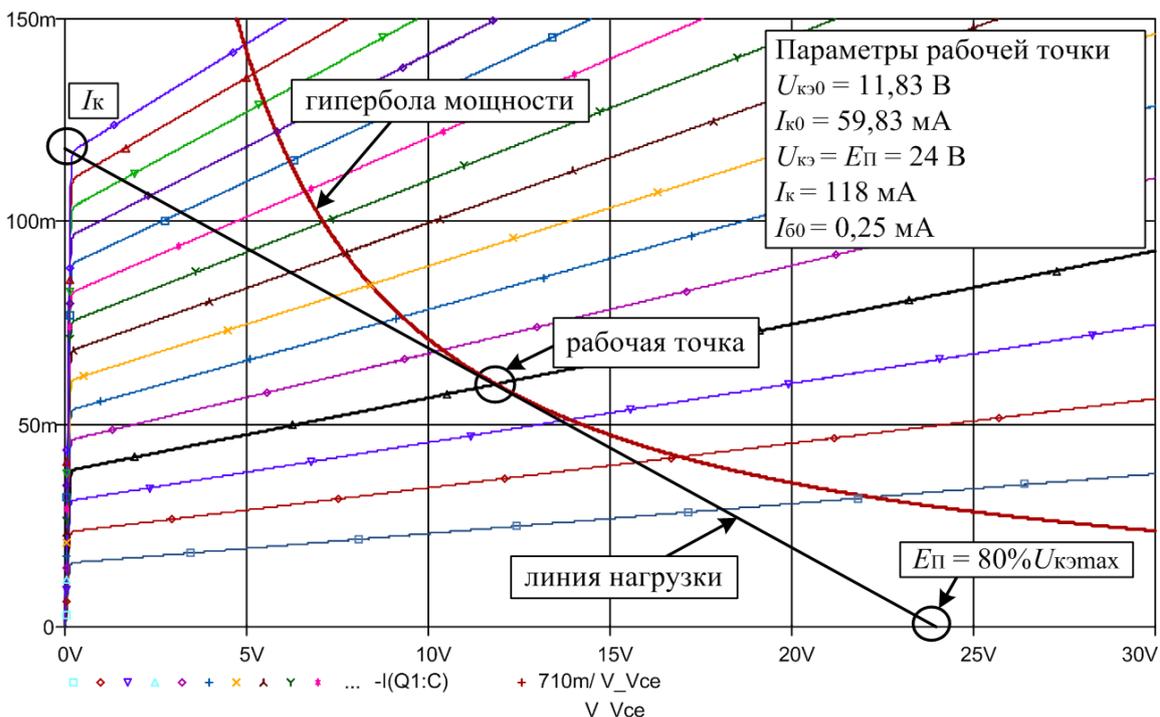


Рис. 53. Семейство выходных характеристик транзистора

↓ 11. Выбрать рабочую точку и зафиксировать с помощью режима трассировки ее параметры I_k , I_{60} , $U_{кэ}$, $I_{к0}$, $U_{кэ0}$.

Рабочая точка выбирается в соответствии с лабораторным заданием. В режиме работы каскада А, рабочую точку выбирают на середине нагрузочной линии.

→ 11.а. Включить режим трассировки. Команда **Trace>Cursor>Display** или щелчок соответствующего значка панели инструментов (рис. 54).

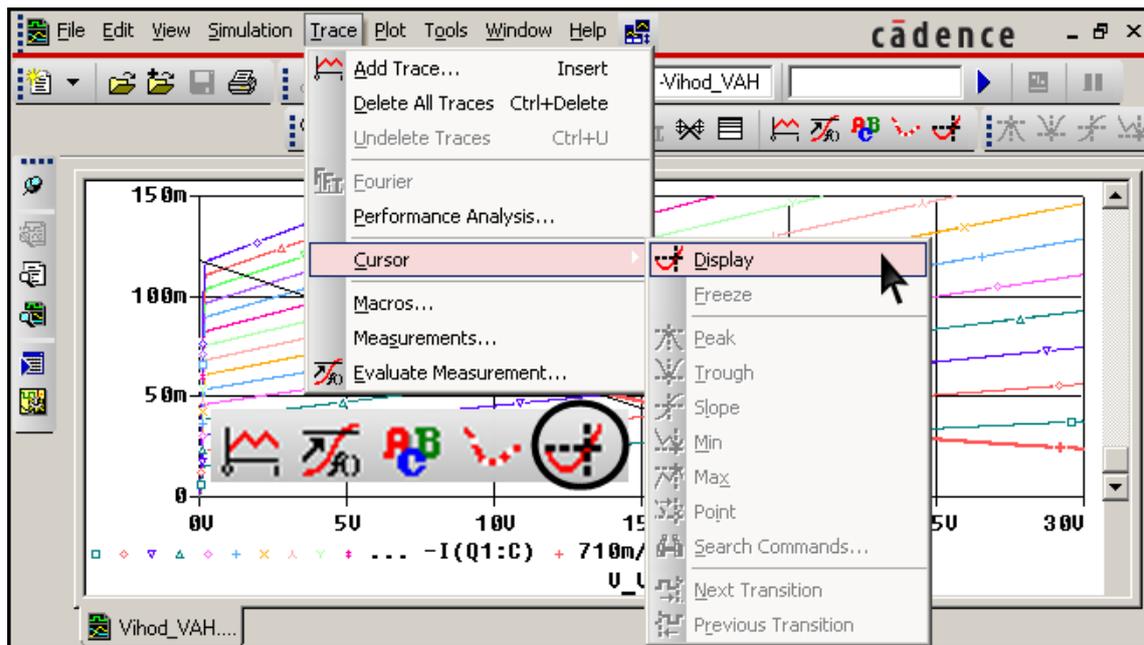


Рис. 54. Включение режима трассировки

После вызова курсора появляется новое окно (**Probe Cursor**) с текущими координатами положения двух курсоров обозначенных *A1* и *A2* (рис. 55). В строке легенды графиков показывается, к какой именно диаграмме относятся операции с курсором.

→ 11.б. Выбрать трассируемый график и поместить на него курсор.

Для выбора или смены трассируемого графика нужно щелкнуть мышкой по соответствующему символу графика в строке легенды (рис. 55), при этом щелчок левой кнопкой мыши закрепляет за графиком курсор *A1*, а щелчок правой – курсор *A2*. Переместить курсор с графика на график можно также используя сочетания клавиши **Ctrl+←** или **Ctrl+→** (курсор *A1*) и **Ctrl+Shift+←** или **Ctrl+Shift+→** (курсор *A2*).

→ 11.в. Навести курсор на рабочую точку, и поставить метку с координатами (параметры рабочей точки – $U_{кэ0}$ и $I_{к0}$), команда **Plot>Label>Mark** или щелчок соответствующей пиктограммы панели инструментов (рис. 55). Метка будет поставлена курсору, который был перемещен последним.

Зафиксировать в заготовке отчета значения $U_{кэ0}$ и $I_{к0}$.

Курсор *A1* перемещается по трассируемому графику с помощью левой кнопки мыши или клавиш **←** и **→**, а курсор *A2* – правой, или сочетаний клавиш **Shift+←** и **Shift+→**.

Для повышения точности можно воспользоваться масштабированием, увеличив интересующую область графика с помощью инструментов **Zoom Area** или **Zoom In**, вернуть график в исходный масштаб можно используя инструменты **Zoom Fit**, **Zoom Out** или заново отмасштабировав оси.

После простановки метки, выключить трассировку и передвинуть метку мышкой на свободное пространство области построения.

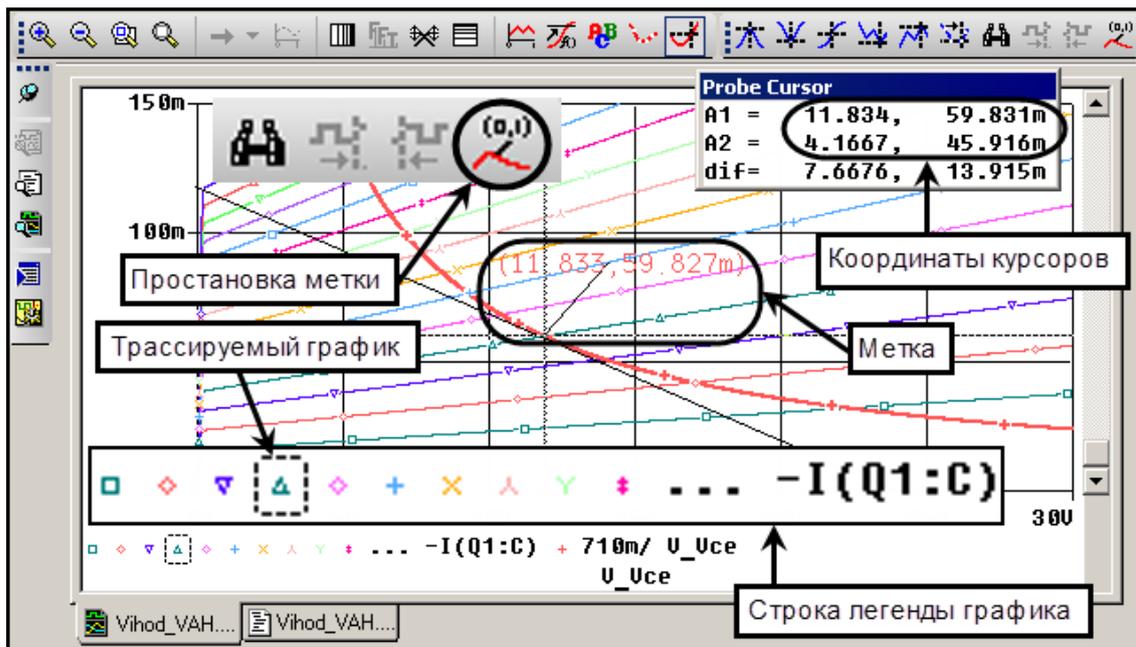


Рис. 55. Трассировка и простановка метки с координатами

Сохранить в заготовке отчета рисунок семейства выходных характеристик с гиперболой мощности, нагрузочной линией и обозначенной рабочей точкой.⁵

→ 11.г. С помощью курсоров и показаний окна **Probe Cursor** определить координаты точек пересечения линии нагрузки с осями – параметры I_K и $U_{кз}$. Зафиксировать в заготовке отчета значения I_K и $U_{кз}$.

→ 11.д. Определить и зафиксировать в заготовке отчета параметр I_{60} . Щелкнуть правой кнопкой мыши на выходную характеристику соответствующую выбранной рабочей точки, щелкнуть пункт **Information** (рис. 56).

Аналогичную информацию можно получить двойным щелчком по значку графика в строке легенды.

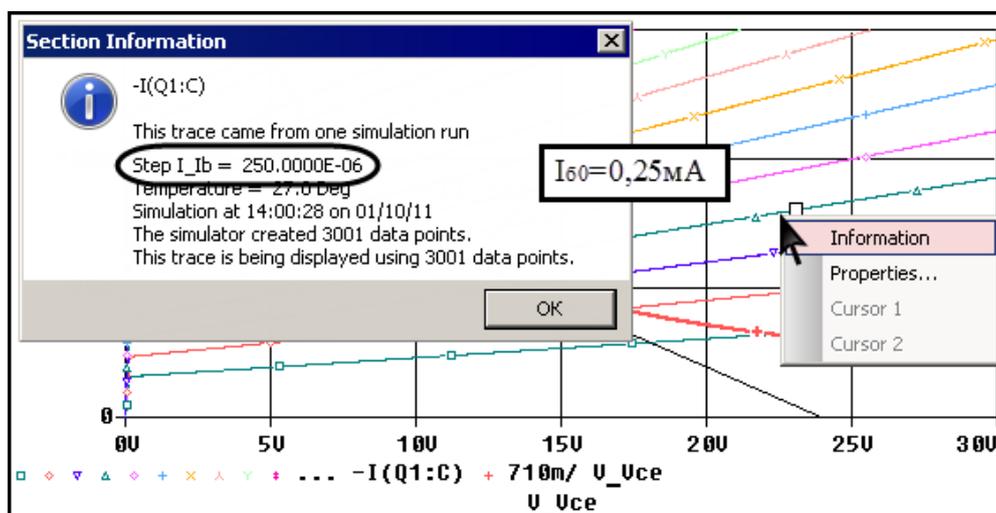


Рис. 56. Определение значения параметрической переменной

→ 12. С помощью курсоров и показаний окна **Probe Cursor** определить и зафиксировать в заготовке отчета необходимые данные для нахождения h -параметров транзистора ($h_{21э}$ и $h_{22э}$).

Пример работы по определению приращений для нахождения выходных h -параметров транзистора показан на **рис. 57**.

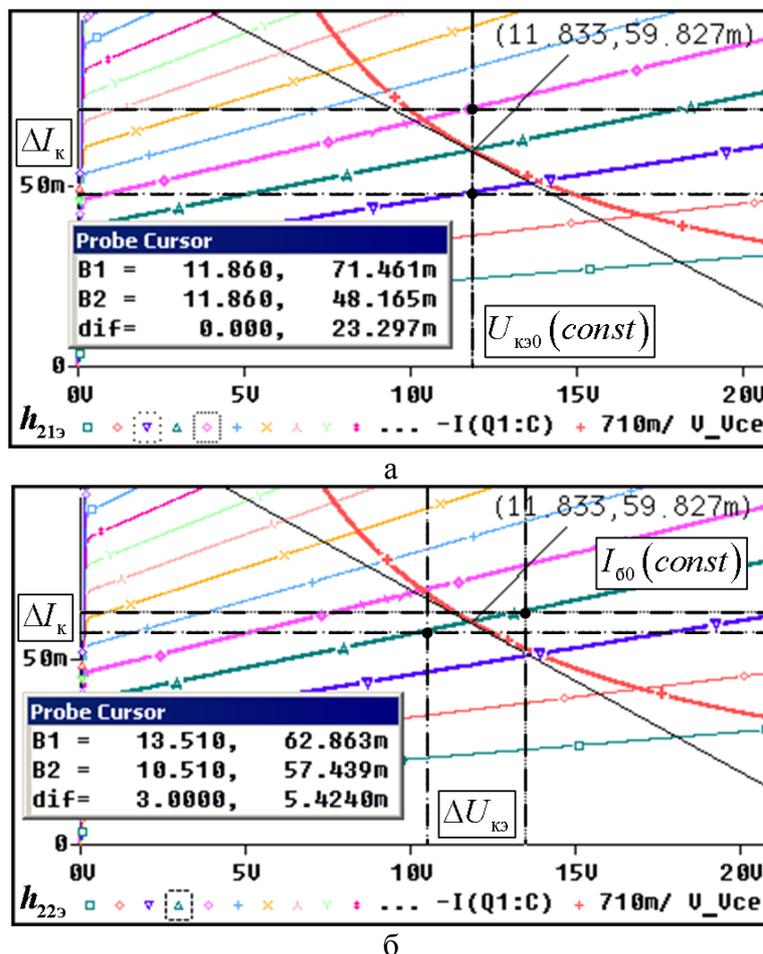


Рис. 57. Определение приращений для нахождения выходных h -параметров
 (а – $h_{21э}$, б – $h_{22э}$)

В нижней строке окна **Probe Cursor** содержится разница между координатами курсоров по осям X и Y .

Построение входных ВАХ БТ

↓ 13. Снять семейство входных характеристик биполярного транзистора для схемы с ОЭ.

→ 13.а. Создать новый проект (**Analog or Mixed A/D**), подключить библиотеку spice-модели транзистора.

→ 13.б. Собрать схему для съема входных характеристик (**рис. 58**).
 Полярность источников зависит от полярности транзистора.

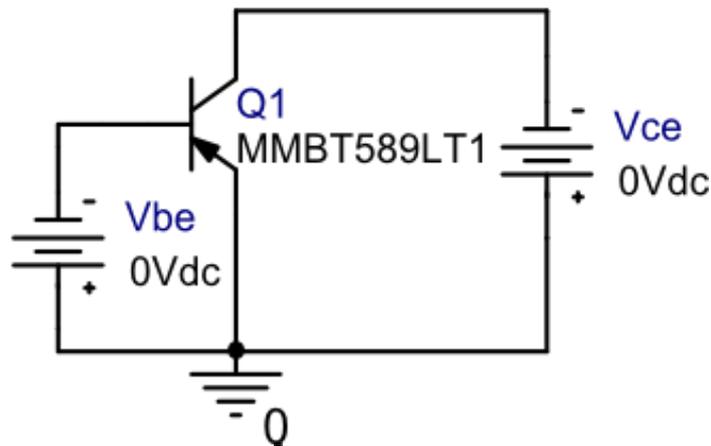


Рис. 58. Схема для съема входных характеристик транзистора (OrCAD)

- 13.в. Обозначить источник напряжения база-коллектор – V_{be} , а источник напряжения коллектор-эмиттер – V_{ce} . Сохранить схему для съема входных характеристик в заготовке отчета.
- 13.г. Создать новый профиль моделирования.³
- 13.д. Выбрать тип анализа **DC Sweep**.
- 13.е. В **Options** выбрать **Primary Sweep** и задать параметры основной переменной.

В качестве основной переменной (**Primary Sweep**) выбираем напряжение источника V_{be} , начальное значение (**Start Value**) можно задать равным 0,5 В. Конечное значение (**End Value**) задать равным 0,8 В, шаг (**Increment**) – 1 мВ. Пример показан на [рис. 59](#).

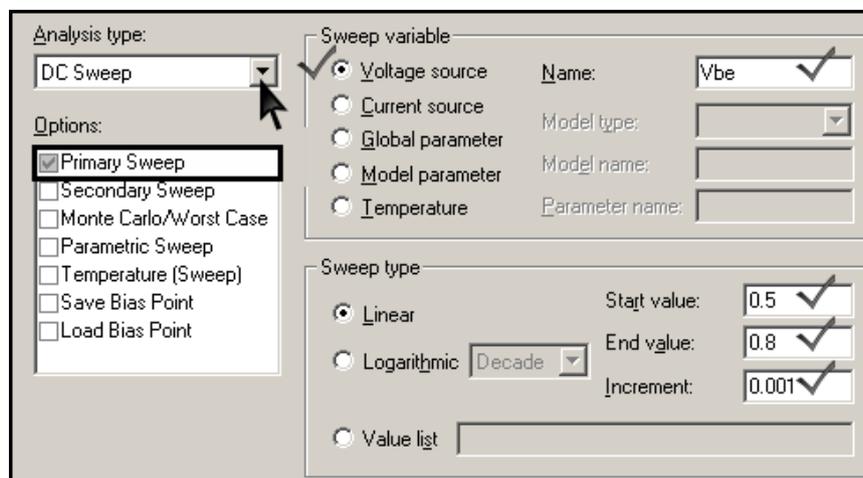


Рис. 59. Настройка параметров Primary Sweep. Входные характеристики

- 13.ж. В **Options** выбрать **Parametric Sweep** и задать параметры второстепенной переменной.

В качестве второстепенной или параметрической переменной (**Parametric Sweep**) выбираем напряжение V_{ce} , начальное значение (**Start Value**) задать на 10 % меньше $U_{кэ0}$. Конечное значение (**End Value**) задать на 10 % больше $U_{кэ0}$, шаг – 10 % от $U_{кэ0}$. Пример показан на [рис. 60](#).

В итоге должно получиться три ветви входных ВАХ, центральная из которых будет соответствовать выбранной рабочей точке. Крайние ветви, нужны для нахождения h -параметров.

→ 13.з. Включить опцию **Last plot**.

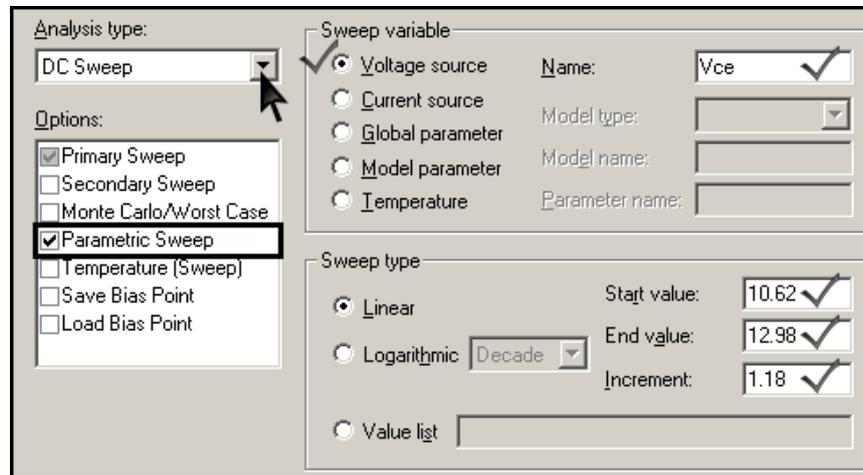


Рис. 60. Настройка параметров Parametric Sweep. Входные характеристики ($U_{кэ0} = 11,8 \text{ В}$)

→ 13.и. Запустить симуляцию.²

→ 13.к. Построить графики выходных характеристик транзистора. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражение $I_B(Q1)$ – ток базы транзистора.

Для удобства дальнейшей работы, при необходимости изменить знак перед выражением.

→ 13.л. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

↓ 14. Определить и зафиксировать в заготовке отчета напряжение $U_{бэ0}$.

Изменяя параметры второстепенной переменной (источник **Vbe**) и масштабируя графики привести построение к такому виду, чтобы область построения включала окрестность рабочей точки (точки соответствующей току $I_{б0}$ найденному в п. 11.д.) примерный вид графиков показан на рис. 61.

→ 14.а. Включить режим трассировки.¹⁰

→ 14.б. Навести курсор на рабочую точку, и поставить метку¹¹ (параметры рабочей точки – $U_{бэ0}$ и $I_{б0}$). Зафиксировать в заготовке отчета параметр $U_{бэ0}$.

После простановки метки, выключить трассировку и передвинуть метку мышкой на свободное пространство области построения.

Сохранить в заготовке отчета рисунок семейства входных характеристик с обозначенной рабочей точкой.⁵

15. С помощью курсоров и показаний окна **Probe Cursor** определить и зафиксировать в заготовке отчета необходимые данные для нахождения h -параметров транзистора ($h_{11э}$ и $h_{12э}$). Пример на рис. 62.

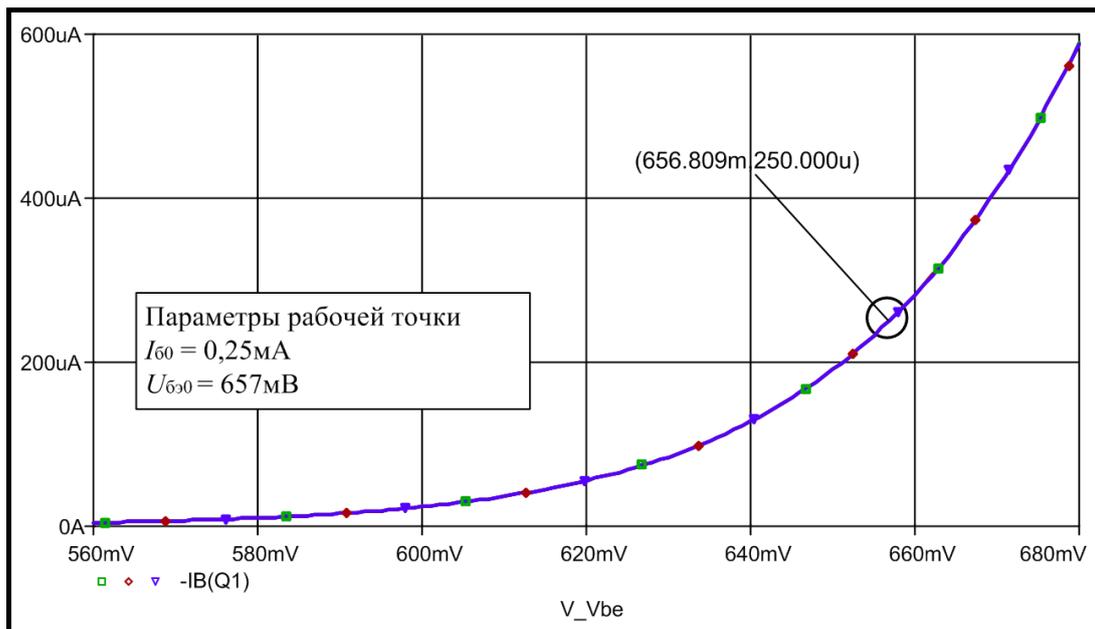
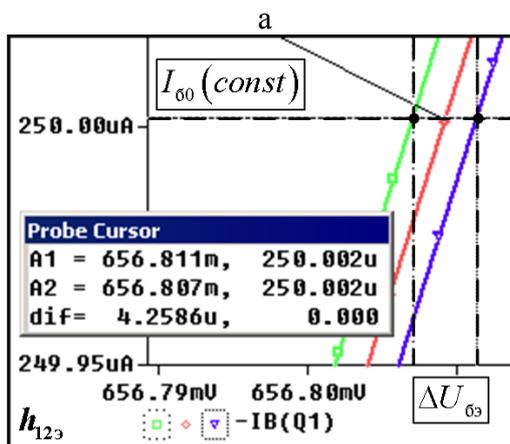
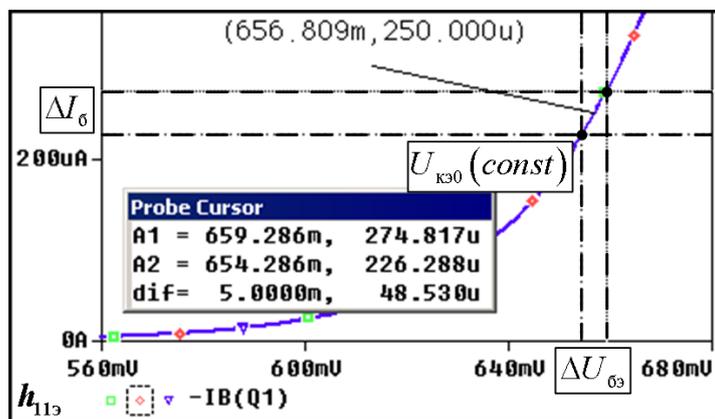


Рис. 61. Входные характеристики транзистора



б

Рис. 62. Определение приращений для нахождения входных h-параметров
 (а – h_{113} , б – h_{123})

Определение параметра h_{123} требует большого приближения области рабочей точки, поскольку кривые практически сливаются.

Подготовка к работе. Часть 2

Рассчитать сопротивления задающие режим работы каскада по постоянному току. На основе проведенных в первой части работы измерений рассчитать параметры элементов малосигнальной П-образной модели БТ пользуясь любой из изученных методик.

Лабораторное задание. Часть 2

1. Ввести в ЭВМ два варианта анализируемой схемы:
первый – используя библиотеки транзистора *.lib и *.olb созданные в PSpice Model Editor;
второй – используя малосигнальную П-образную модель транзистора, рассчитанную при подготовке к работе.
2. Произвести расчет *первого* варианта схемы усилительного каскада в рабочей точке по постоянному току. Получить значения токов в ветвях, напряжений в узлах и рассеиваемой на элементах мощности.
3. Получить зависимости коэффициента передачи каскада по напряжению, току и мощности от частоты для *двух* вариантов схемы.
4. Получить отклики *двух* вариантов схемы на передний фронт прямоугольного импульса напряжения в области малых (\approx от 1 до 5 мкс) и больших времен (\approx от 500 до 1000 мс), время нарастания переднего фронта – $< 1/f_T \approx 1$ нс, амплитуда – $U_{\text{вх}}$. Определить время переходного процесса для *двух* вариантов схем.
5. Получить эпюры напряжения и тока на входе и выходе *двух* вариантов схем в установившемся режиме, при входном синусоидальном сигнале вида $U(t) = U_{\text{вх}} \sin(2\pi f \cdot t)$, частоту сигнала f , выбрать на линейном участке АЧХ. Построить 3-4 периода сигнала. Определить амплитуды тока и напряжения на выходе.
6. Построить 64 периода напряжения сигнала на выходе для *первого* варианта схемы и выполнить преобразование Фурье. Измерить величину первых гармоник с амплитудой свыше 1 мВ, ограничиться рассмотрением не более 10 гармоник.

Порядок выполнения и рекомендации. Часть 2

Ввод и подготовка схемы

1. Загрузить графический редактор схем – программный модуль OrCAD Capture (CIS).
2. Создать проект (**Analog or Mixed A/D**) и средствами Capture ввести в ЭВМ два варианта схемы, в соответствии лабораторным заданием.



В качестве источника входного воздействия использовать источник **VPULSE**, а в качестве источника питания – **VDC**. Каждая схема должна иметь отдельные источники питания и сигнала.

3. Источники подсоединить через соединители страниц (**off-page connector**). Команда **Place>Off-Page Connector...** или соответствующая пиктограмма панели инструментов (рис. 63). В открывшемся окне **Place Off-Page Connector** выбрать тип коннектора и присвоить имя. Коннекторам присвоить индивидуальные имена, например: **in** (вход), **in1** (вход 1) и **supply** (питание).

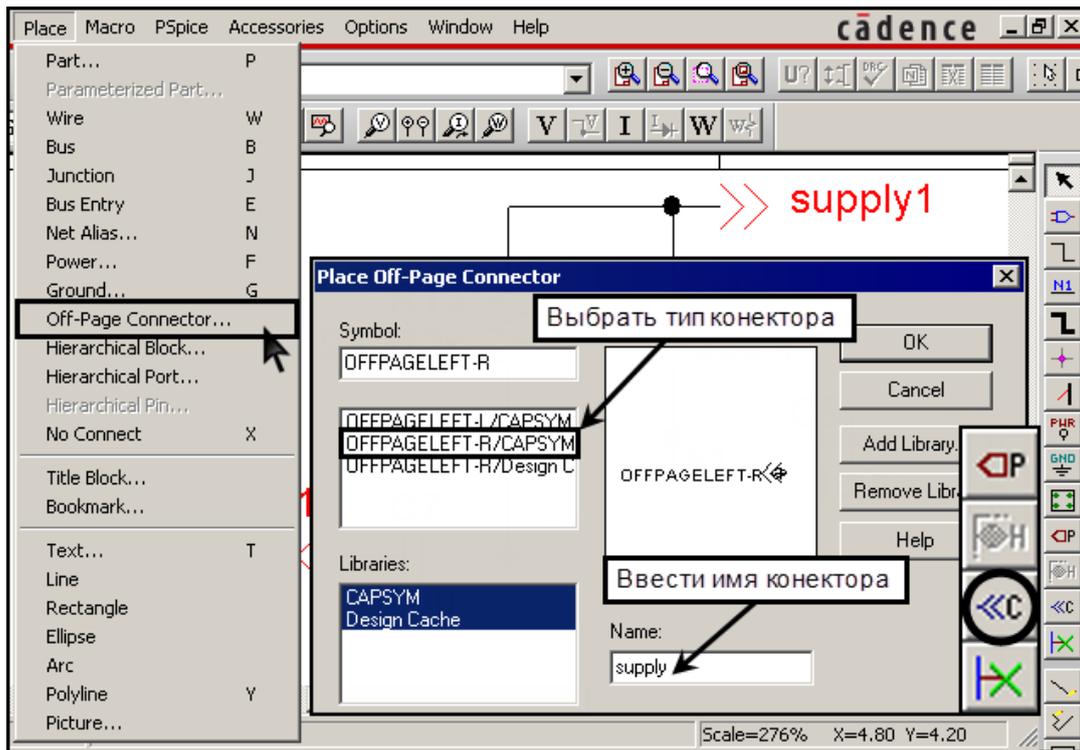


Рис. 63. Добавление соединителей страниц (off-page connector)

Коннекторы служат для электрического соединения схем размещенных на разных страницах проекта, но могут быть использованы и в рамках одной страницы. Цепям, к которым подключен коннектор, будет автоматически присвоен псевдоним, совпадающий с именем коннектора.

4. Обозначить выходы схем как **out** и **out1**.¹²

↓ 5. Значение параметров источника **VPULSE** задать путем редакции свойств компонента.

→ 5.а. Выделить компонент с помощью мыши, затем команда – **Edit>Properties...** или сочетание клавиш **Ctrl+E** (рис. 64).

Открыть редактор свойств компонента (**Property Editor**) можно через контекстное меню, вызываемое щелчком правой кнопки мыши по выделенному компоненту или же двойным щелчком левой кнопки мыши по компоненту.

→ 5.б. В открывшемся редакторе свойств компонента щелкнуть правой клавишей мыши в область таблицы и в открывшемся контекстном меню выбрать **Pivot** (рис. 65).

Опция *Pivot* контекстного меню редактора свойств меняет способ отображения таблицы параметров компонента.

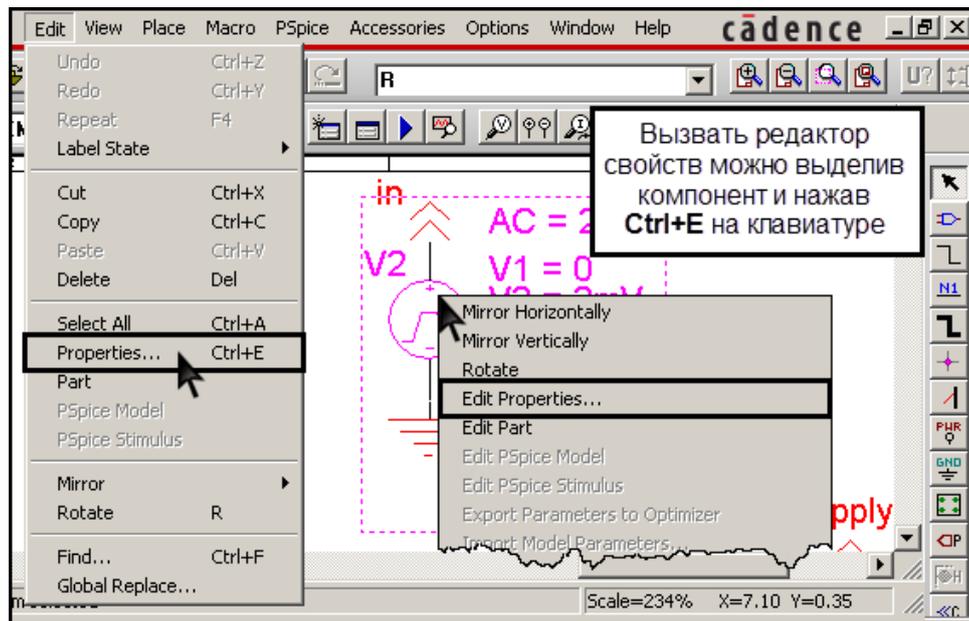


Рис. 64. Запуск редактора свойств компонента

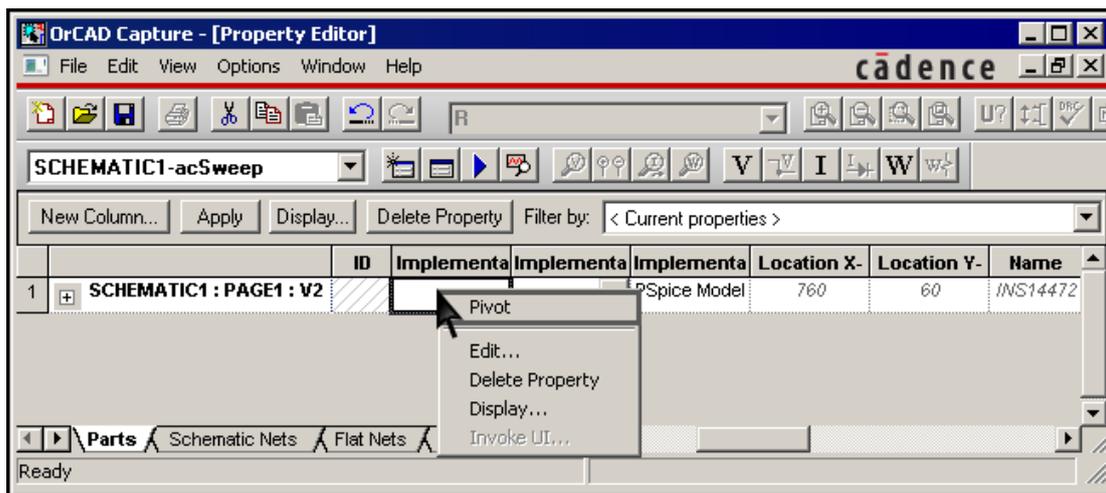


Рис. 65. Редактора свойств компонента. Изменение способа отображения таблицы

→ 5.в. Параметры источника задать, как показано в таб. 6.

Ввод параметра *AC* позволяет использовать данный источник для частотного анализа (*AC Sweep*). Применение в *spice*-моделировании специализированных источников типа *VAC* и *VDC* обусловлено отсутствием необходимости вводить большое число параметров, что удобно, если планируется проводить только один вид анализа.

Таблица 6

Параметры источника VPULSE

Параметр	AC	V1	V2	TD	TR	TF	PW	PER
Значение	U_{BX}	0	U_{BX}	0	1 нс	1 нс	2 с	3 с

→ 5.г. Для источника VPULSE отобразить на схеме параметр AC.

Правой кнопкой мыши щелкнуть по ячейке со значением параметра AC и выбрать в контекстном меню пункт **Display...**, затем в открывшемся окне **Display Properties** установить флажок **Name and Value** как показано на **рис. 66**.

6. Для управляемого источника тока используемого в схеме замещения биполярного транзистора задать и отобразить параметр **GAIN** на схеме.

Параметр GAIN в OrCAD – это коэффициент передачи управляемого источника. Для ИТУН (в OrCAD – G), GAIN представляет собой передаточную проводимость, в модели БТ Джиаколетто – крутизна транзистора.

При использовании ИТУТ (в OrCAD – F), GAIN – коэффициент передачи по току, в модели Джиаколетто – параметр h_{21} .

Итоговая схема в OrCAD может выглядеть, как показано на **рис. 67**.

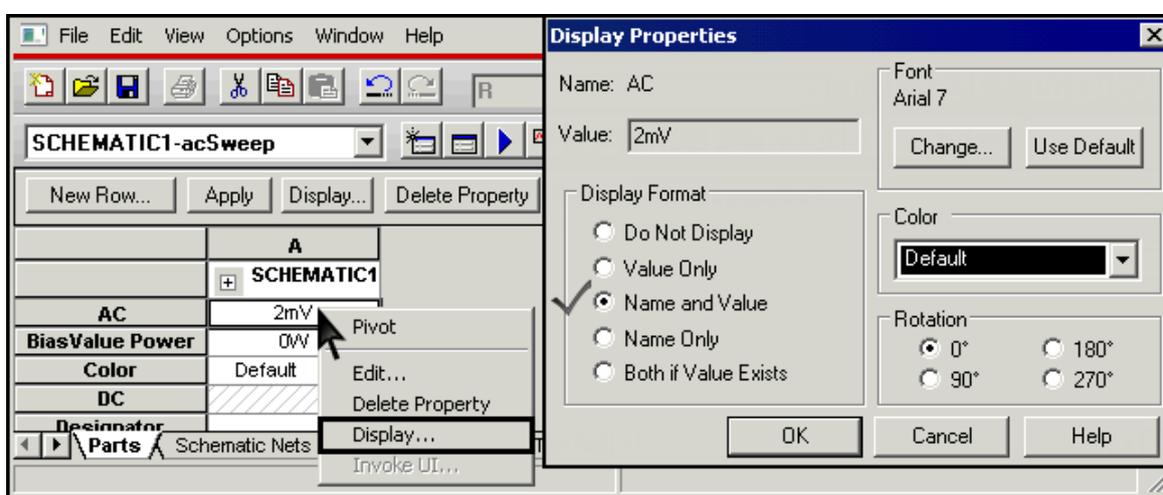


Рис. 66. Отображение на схеме параметров компонентов

В схеме на **рис. 67 (б)** для построения модели Джиаколетто использован ИТУН, при использовании ИТУТ П-образная схема замещения транзистора может выглядеть, как показано на **рис. 68**.

Анализ по постоянному току

7. Создать новый профиль моделирования.³
8. Выбрать тип анализа **AC Sweep** – анализ схемы в частотной области. Начальную частоту задать равной 0.1 Гц, конечную – 10 ГГц, число точек на декаду – 50.
9. Включить опцию **Last plot**.
10. Запустить симуляцию.²
11. Включить отображение на схеме режима по постоянному току, включая отображение потребляемых мощностей.¹³ Передвинуть с помощью мыши отобразившиеся значения токов и напряжений так, что бы схема имела читаемый вид.

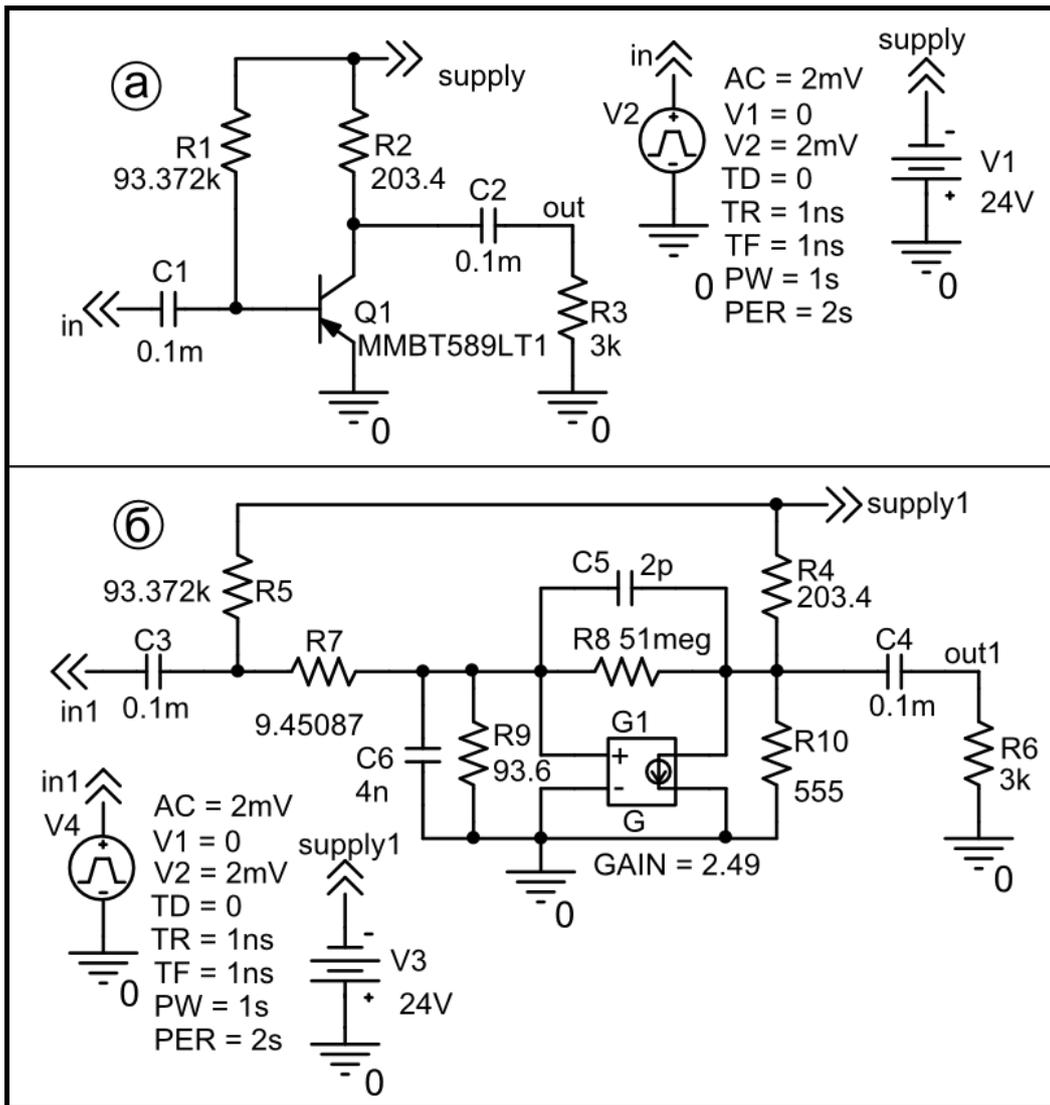


Рис. 67. Схемы усилительных каскадов (OrCAD) на основе на транзистора (а) и Π -образной схемы замещения с использованием ИТУН (б)

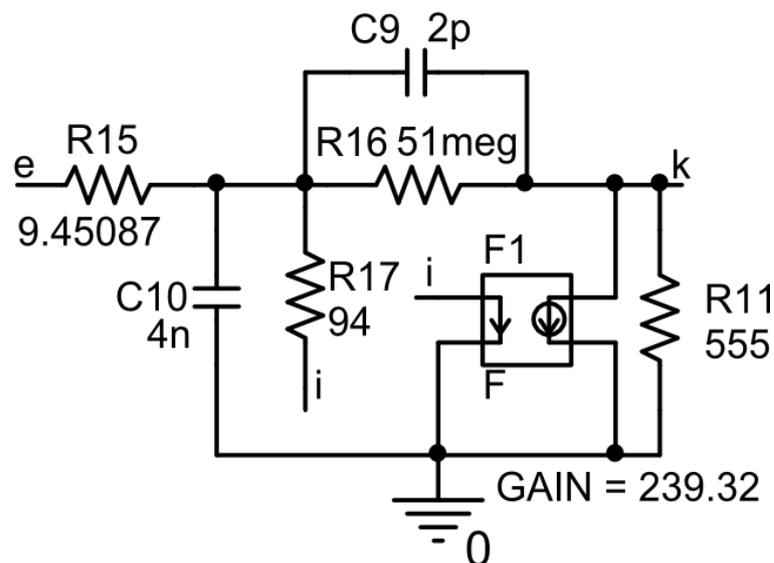


Рис. 68. Π -образная схема замещения БТ с использованием ИТУТ (OrCAD)

В программе PSpice (если специально не отключать) расчет схемы по постоянному току происходит перед частотным и динамическим анализом, поэтому если нет нужды в какой-то специфической информации о режиме работы по постоянному току, можно статический анализ делать совместно с другими видами анализа.

12. Сделать скриншот **первого** варианта схемы с результатами анализа и ввести полученные данные в заготовку отчета.

Частотный анализ

13. Построить графики АЧХ напряжения для двух схем. Открыть окно **Add Traces**⁷ и в строку **Trace Expression** через пробел ввести выражения для двух графиков, например $V(\text{OUT})/V(\text{IN})$ и $V(\text{OUT1})/V(\text{IN1})$.

14. Проанализировать вид полученных АЧХ. Если требуется, открыть настройки профиля моделирования (**Simulation Settings**)⁸ и изменить, граничные частоты анализа, число точек таким образом, чтобы графики приобрели наиболее информативный вид. Если внесены изменения в профиль моделирования, запустить симуляцию.⁹

15. Зафиксировать максимальное значение АЧХ напряжения. Включить трассировку,¹⁰ щелкнуть значок **Max** панели инструментов и поставить метку¹¹ на каждый график (рис. 69).

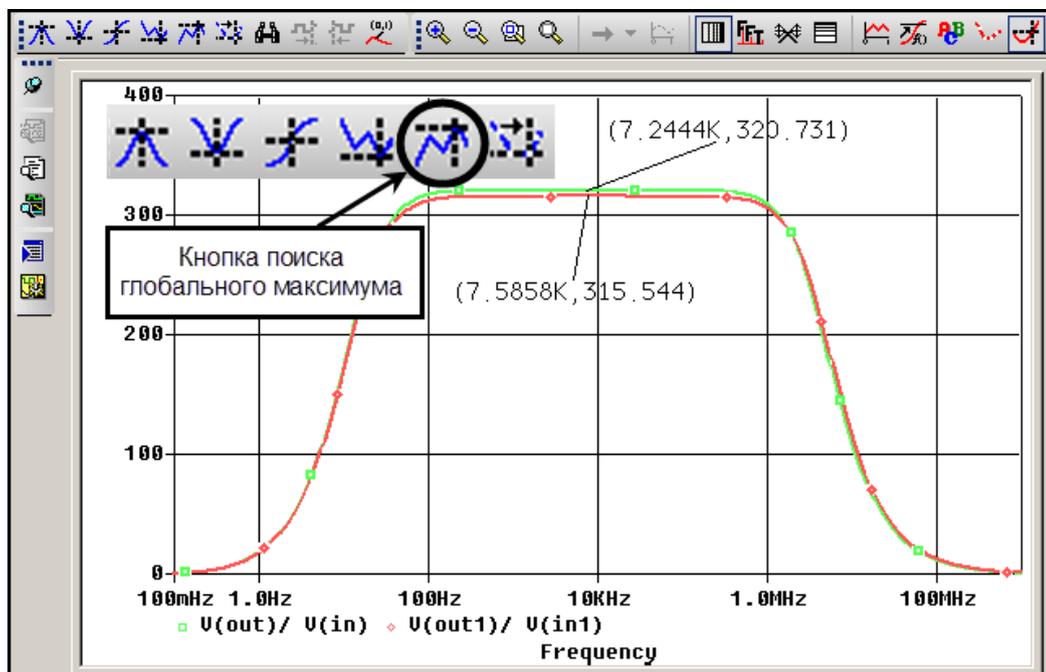


Рис. 69. Поиск максимума характеристики с помощью средств трассировки

16. Сохранить графики АЧХ напряжения в буфер обмена.⁵

17. Построить графики АЧХ тока для двух схем. Открыть окно **Add Traces**⁷ и в строку **Trace Expression** ввести выражение отношение токов выходной и входной емкостей, например $I(\text{C2})/I(\text{C1})$ и $I(\text{C4})/I(\text{C3})$.

18. Выполнить действия по пп. 15 и 16.

19. Построить графики АЧХ мощности для двух схем. Открыть окно **Add Traces** и в строку **Trace Expression** ввести выражения для коэффициентов передачи по мощности.

Зависимость коэффициента передачи по мощности от частоты, можно получить, перемножив коэффициенты передачи по току и напряжению или поделив мощность, выделяемую в нагрузку на мощность отдаваемую источником сигнала

20. Выполнить действия по пп. 15 и 16.

21. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Временной анализ.

Переходные характеристики в области больших времен

22. Создать новый профиль моделирования.³

23. Выбрать тип анализа **Time Domain**.

24. Настроить параметры анализа в соответствии с п. 4 лабораторного задания, время анализа – 500 мс.

25. Включить опцию **Last plot**.

26. Запустить симуляцию.²

27. Построить переходные характеристики для обеих схем. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражения для двух откликов, например V(OUT) и V(OUT1).

28. Проанализировать вид полученных характеристик. При необходимости, открыть настройки моделирования (**Simulation Settings**)⁸ и скорректировать время анализа, максимальный шаг, запустить симуляцию еще раз.⁹

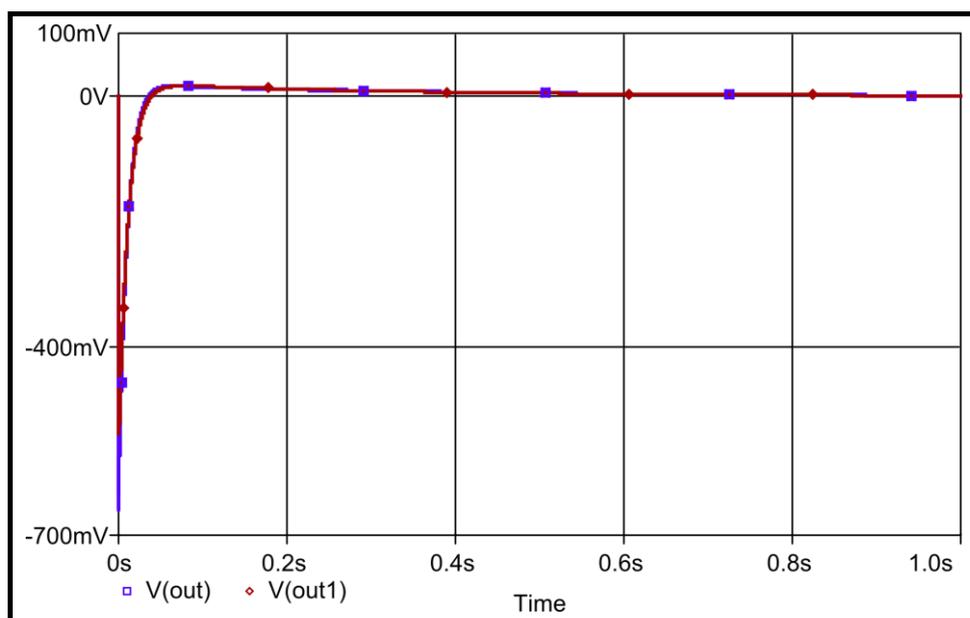


Рис. 70. Переходные характеристики. Время анализа – 1000 мс

29. Определить и зафиксировать в заготовке отчета примерное время переходного процесса.

Примерный вид переходных характеристик в области больших времен показан на [рис. 70](#).

30. Сохранить графики откликов в буфер обмена⁵ и вставить в заготовку отчета.

31. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Временной анализ. Переходные характеристики в области малых времен

32. Открыть окно **Simulation Settings**⁸ и настроить параметры анализа в соответствии с [п. 4](#) лабораторного задания, время анализа – 5 мкс.

33. Выполнить действия по [пп. 26-31](#).

Примерный вид переходных характеристик в области малых времен показан на [рис. 71](#).

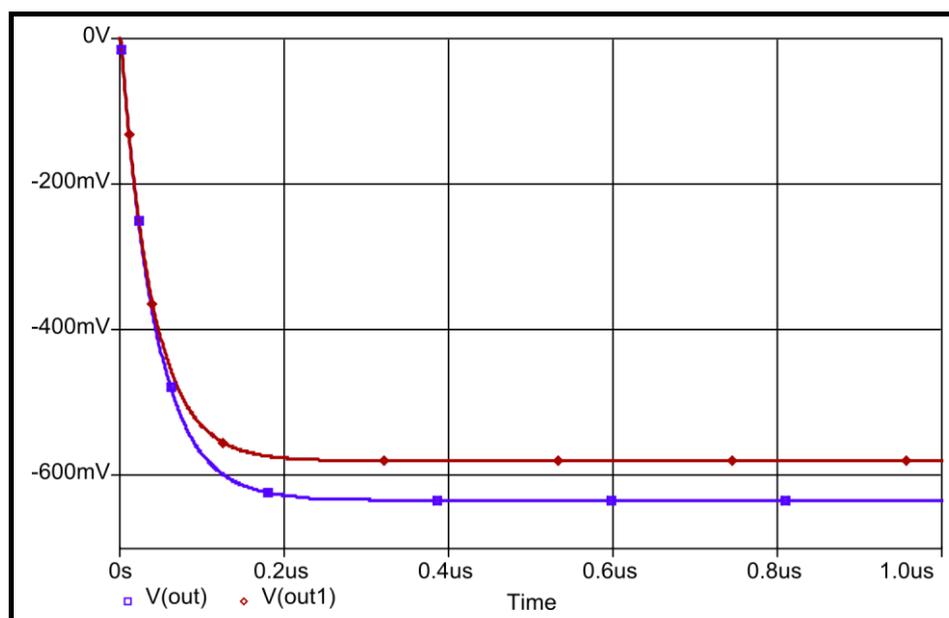


Рис. 71. Переходные характеристики. Время анализа – 1 мкс

Временной анализ. Отклики на синусоидальное воздействие в установившемся режиме

34. Преобразовать схему в соответствии с [п. 5](#) лабораторного задания. Вместо источника входного воздействия поставить источник **VSIN**. Параметры источника задать, как показано в [табл. 7](#).

Источник VSIN позволяет задавать воздействие в виде гармонического сигнала, применяется в динамическом анализе, при задании соответ-

вующих параметров может использоваться в частотном анализе и анализе по постоянному току.

Таблица 7

Значения параметров источника VSIN

Параметр	Значение	Примечание
VOFF	0	Смещение (постоянная составляющая сигнала)
VAMPL	$U_{вх}$	Амплитуда колебания
FREQ	f	Частота сигнала. Выбрать частоту, из диапазона, в пределах которого АЧХ каскада по напряжению линейна

35. Создать новый профиль моделирования.³

36. Выбрать тип анализа **Time Domain**. Параметр **Start saving data after** задать равным времени переходного процесса определенного в п. 29, общее время анализа задать равным времени переходного процесса плюс 3-4 периода входного сигнала, максимальный шаг ограничить такой величиной, чтоб на один период колебания приходилось 25-50 точек.

В итоге на экране должны отобразиться последние 3-4 периода колебания, что примерно будет соответствовать колебаниям в установившемся режиме. Не менее 25 точек на период гармонического колебания – условие получения относительно гладких и точных графиков.

37. Включить опцию **Last plot**.

38. Запустить симуляцию.²

39. Построить эпюры напряжения на выходе обеих схем. Открыть окно **Add Traces**. В строку **Trace Expression** ввести выражения для двух откликов, например V(OUT) и V(OUT1).

40. Добавить дополнительную ось Y на график. Команда **Plot>Add Y Axis** или сочетание клавиш **Ctrl+Y** (рис. 72).

За первой осью закрепляется номер 1. По мере добавления осей, новые нумеруются в порядке возрастания – 2, 3, 4 и т. д.

*Удалить ось можно командой **Plot>Delete Add Y**.*

41. Выбрать новую ось Y щелкнув мышью по оси номер 2.

Выбранная в данный момент ось помечается значком >> (рис. 72).

42. Построить эпюр напряжения на входе каскада. Открыть окно **Add Traces**. В строку **Trace Expression** ввести выражения для входного сигнала, например V(IN).

43. Включить трассировку,¹⁰ определить и зафиксировать в заготовке отчета амплитуду напряжения на выходе схемы.

44. Сохранить графики откликов в буфер обмена⁵ и вставить в заготовку отчета.

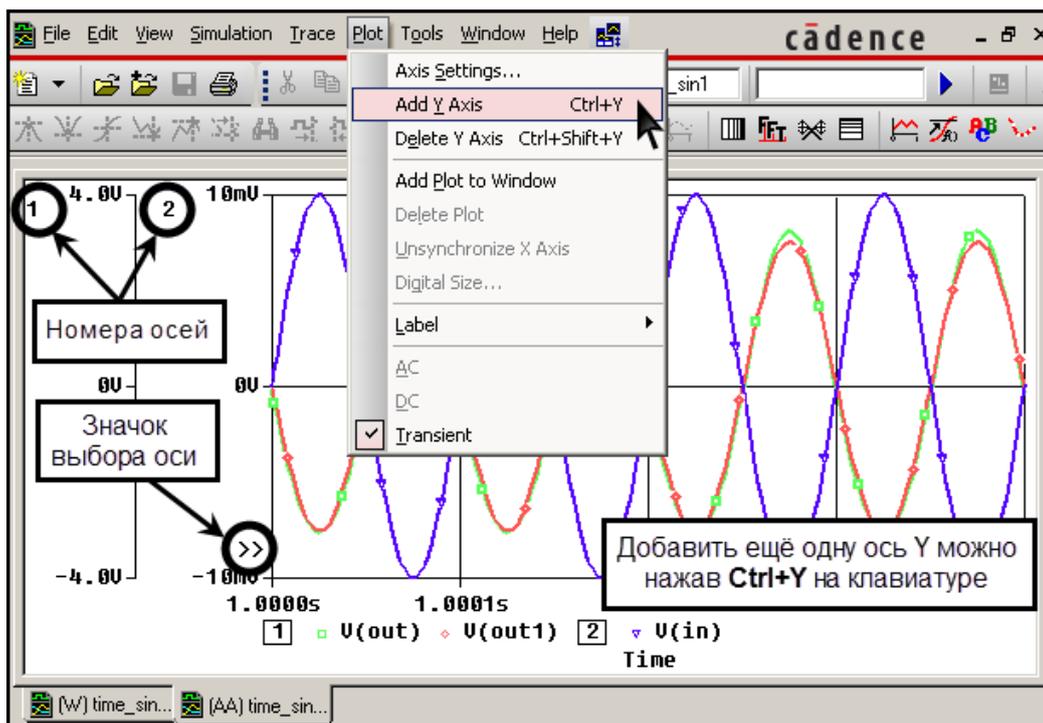


Рис. 72. Добавление новой оси Y

45. В PSpice A/D создать новое окно¹⁴ и выполнить пп. 39-44 для выходных токов.

46. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Временной анализ.

Отклики на синусоидальное воздействие. Анализ Фурье

47. Создать новый профиль моделирования.³

48. Выбрать тип анализа **Time Domain**. Параметр **Start saving data after** задать равным времени переходного процесса определенного в п. 29, общее время анализа задать равным времени переходного процесса плюс 64 периода входного сигнала, максимальный шаг ограничить такой величиной, чтоб на один период колебания приходилось 100-200 точек.

Для спектрального анализа периодических сигналов с помощью преобразования Фурье в программе PSpice A/D, важно чтобы было рассчитано целое число периодов смоделированной функции. При вычислении быстрого преобразования Фурье (БПФ) программа PSpice A/D исходит из того, что рассчитанный интервал полученной функции периодически повторяется. При необходимости, при расчете исходной функции следует ограничивать величину максимального шага интегрирования, точность расчета в данном случае напрямую влияет на точность спектрального анализа.

Интервал анализа для преобразования Фурье, в пределах установлен-

ных директивой моделирования, также можно задать в свойствах оси X окна **Axis Settings**, группа **Use Data**, флажок **Restricted (analog)**. Разрешение по частоте равно $1/T$, где T – интервал анализа.

49. Включить опцию **Last plot**.²

50. Запустить симуляцию.

51. Построить эюр напряжения на выходе каскада построенного на основе spice-модели БТ. Открыть окно **Add Traces**⁷ и в строку **Trace Expression** ввести выражения для отклика первого варианта схемы, например V(OUT).

52. Выполнить преобразование Фурье. Команда **Trace>Fourier** или соответствующая кнопка на панели инструментов (рис. 73).⁶

Преобразование Фурье можно выполнить, поставив флажок **Fourier** группы **Processing Options** в свойствах оси X окна **Axis Settings**.

53. Установить для оси Y логарифмический масштаб и отмасштабировать ось так, чтобы нижняя граница была равна 100 мкВ (рис. 73). Если необходимо, отмасштабировать ось X.

Возможное присутствие нулевой гармоник в спектре, в основном, обусловлено наличием постоянной составляющей в сигнале, т.е. переходной процесс не завершен полностью.

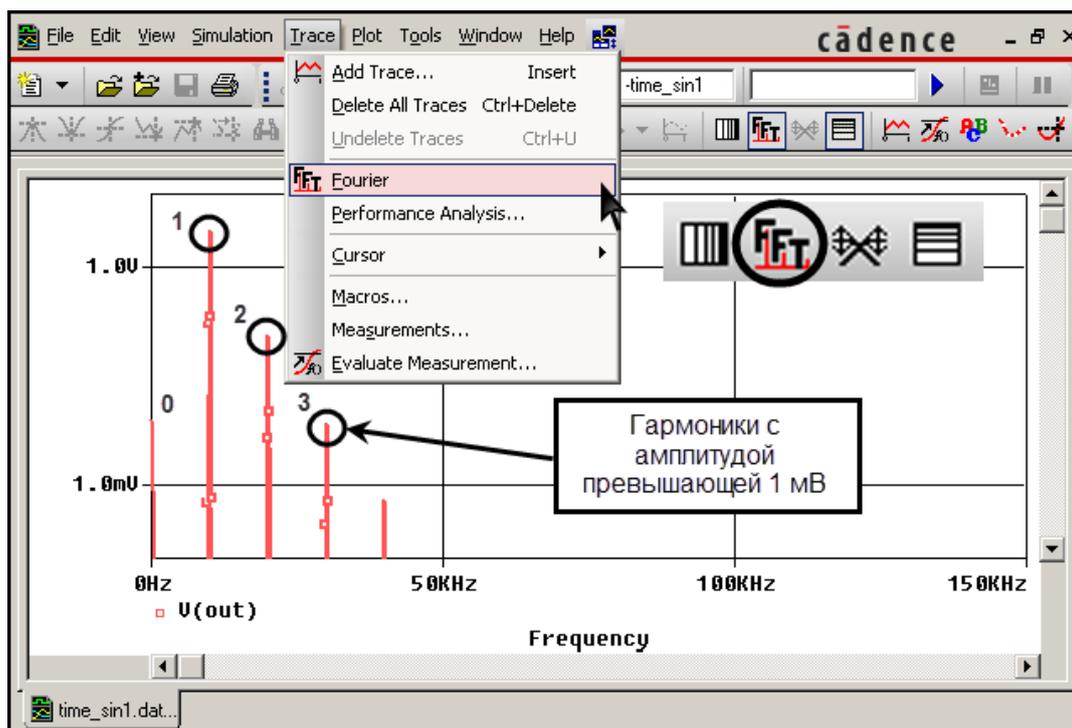


Рис. 73. Преобразование Фурье в PSpice A/D

54. Включить трассировку¹⁰ и определить величины первых гармоник (использовать не более 10 шт.) амплитуды которых превышают 1 мВ, поставить метки.¹¹ Измеренные значения и полученный график сохранить в заготовке отчета. Примерный вид полученного спектра колебания на выходе усилителя с измеренными амплитудами гармоник показан на рис. 74.

В программе PSpice A/D существует возможность представить результаты анализа Фурье в табличной форме, записав их в выходной файл. Это можно сделать, введя в схемный файл директиву **.FOUR**. В выходной файл будут записаны величины гармоник амплитудного и фазового спектра, их нормированные значения, а также коэффициент гармоник.

Директива **.FOUR** в OrCAD вводится через опции настроек моделирования окна **Simulation Settings**, тип анализа – **Time Domain**. Нажать кнопку **Output File Options...**, в открывшемся окне (**Transient Output File Options**) поставить флажок **Perform Fourier Analysis**, указать частоту первой гармоники (фундаментальную частоту колебания), количество гармоник для расчета (по умолчанию 9) и выходную переменную. По директиве **.FOUR** спектральному анализу подвергается участок реализации переходного процесса в конце интервала анализа длительностью равной $1/f$, где f – частота первой гармоники.

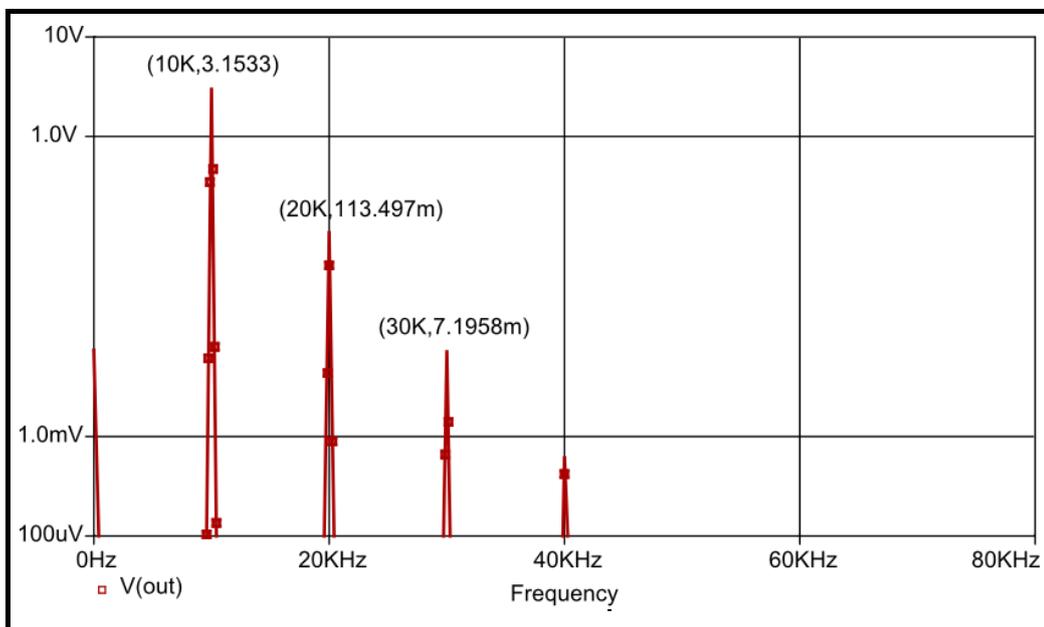


Рис. 74. Спектр колебания на выходе усилителя

55. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Обработка экспериментальных данных

Для первого варианта схемы рассчитать КПД выходной цепи усилительного каскада и коэффициент гармоник.

Проанализировать на взаимное соответствие характеристики для двух вариантов схемы усилительного каскада.

Содержание отчета

Цель работы, исходная схема, результаты подготовки к работе (расчет сопротивлений каскада, расчет модели транзистора Джиаколетто, исходные соотношения и пояснения к расчетам), скриншоты всех используемых в работе схем выполненных в OrCAD Capture, результаты анализа по постоянному току (скриншот и таблица (см. **табл. 5**)), графики всех полученных характеристик и зависимостей, все измеренные или рассчитанные параметры, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Линейная П-образная малосигнальная модель БТ.
2. Физический смысл элементов модели БТ Джиаколетто.
3. Почему модель БТ Джиаколетто линейная и малосигнальная?
4. Как определяется рабочая точка усилительного каскада?
5. Частотные свойства биполярного транзистора на примере П-образной модели Джиаколетто.
6. Какие модели БТ используются в PSpice?
7. Какие модели полупроводниковых элементов используются в частотном анализе?
8. Какой анализ PSpice использовался для получения ВАХ БТ, его директива?
9. Типы управляемых источников и их параметры.
10. Параметры источника VSIN.
11. Как называется модуль пакета OrCAD в котором создаются и редактируются spice-модели?
12. Как называется модуль пакета OrCAD в котором выполняется построение графиков и анализ результатов моделирования схем?
13. Какие элементы схемы определяют частотные свойства каскада?
14. Что и как сделали, получили в лабораторной работе?
15. Инструмент Probe, с помощью которого определялись приращения для расчета h-параметров?
16. Директива, предваряющая описание spice-модели в виде совокупности параметров. Директива, задающая описание макромодели.
17. Какие библиотеки OrCAD использовались в лабораторной работе?
18. Какие библиотеки были подключены для выполнения работы?
19. Расширение библиотек OrCAD spice-модели и УГО?
20. Опцией, какого анализа в PSpice является анализ Фурье?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Исследование шумовых и температурных свойств усилительного каскада на биполярном транзисторе

Цель работы

Освоение методики учета шумовых свойств радиоэлектронных компонентов с помощью средств OrCAD.

Изучение шумовых свойств радиоэлектронных компонентов на примере усилительного каскада построенного на основе схемы включения биполярного транзистора с ОЭ со стабилизацией тока базы.

Основные теоретические положения

Шумы в электронных устройствах обычно рассматриваются как вредный фактор, и, действительно, они часто накладывают ограничения на работу устройств. Шум характеризуется своим частотным спектром, распределением амплитуды и источником (происхождением).

Наиболее часто встречающимися разновидностями шумов являются **тепловой** и **дробовой**.

Тепловой шум возникает вследствие случайных флуктуаций скорости носителей заряда в резистивном материале. Это явление аналогично броуновскому движению.

Электроны в резисторе обладают тепловой энергией и передвигаются в материале случайным образом, испытывая в процессе движения соударения с атомами кристалла. Случайные движения вызывают тепловой шум. У резистора, который находится в тепловом равновесии со своим окружением, на концах появляются флуктуации либо напряжения (при разомкнутом контуре), либо тока (при короткозамкнутом контуре). Этот шум впервые наблюдал Джонсон и поэтому **тепловым шум** еще называют **шумом Джонсона**.

Флуктуации можно истолковать как результат очень большого числа независимых случайных событий. Каждое событие состоит из начальной стадии, когда происходит отклонение от состояния равновесия, и релаксации к этому состоянию. Начальная стадия – это пробег электрона между столкновениями, который порождает неравновесное распределение заряда в резистивном материале, а релаксация – это последующее изменение заряда, восстанавливающее состояние равновесия. Явления, происходящие в событии, приводят к возникновению импульса тока или напряжения на клеммах, и суперпозиция всех таких импульсов есть флуктуации теплового шума. В соответствии с этой моделью тепловой шум является одним из примеров последовательности случайных импульсов, и форма сигнала тока или напряжения теплового шума должна состоять из очень большого числа отдельных импульсов, связанных с дис-



клетными событиями, происходящими в резистивном материале.

Тепловой шум – это внутреннее присущее и неустранимое свойство резистивных материалов и часто принципиально является тем пределом, ниже которого нельзя ослабить шумы в электронном приборе. Самый дорогой и тщательно изготовленный резистор имеет тот же тепловой шум, что и дешевый углеродный резистор с тем же сопротивлением. Общая величина шума пропорциональна квадратному корню сопротивления, поэтому для уменьшения шума, величину сопротивлений в схеме надо также уменьшать.

Амплитуда напряжения шума Джонсона, вообще говоря, в данный конкретный момент непредсказуема, но она подчиняется закону распределения Гаусса.

Тепловой шум имеет равномерный частотный спектр, т. е. мощность шума одинакова на всех частотах (до некоторого предела). Шум с равномерным спектром называют «**белым шумом**».

Интересно отметить, что любой физический аналог сопротивления (любой механизм потерь энергии в физической системе, например, вязкое трение малых частиц жидкости) имеет связанные с ним флуктуации соответствующей физической величины (в приведенном примере – это флуктуации скоростей частиц, проявляющиеся как хаотическое броуновское движение). Шум Джонсона – это просто специальный случай такого флуктуационно-диссипативного явления.

Дробовой шум связан с прохождением тока через барьер. Впервые он был рассмотрен Шотки, который использовал аналогию мелкой дроби сыплющейся в контейнер. Дробовой шум или, по крайней мере, шум, похожий на дробовой, часто встречается в твердотельных устройствах, где ток проходит через потенциальный барьер (например, в обедненном слое *p-n*-контакта).

В электронной лампе акты вылета электронов с катода или попадания их на анод образуют последовательность независимых событий, происходящих в случайные моменты времени. Поэтому ток, протекающий через нее, флуктуирует. То же самое происходит в транзисторе или полупроводниковой диоде, так как прохождение носителей через потенциальные барьеры осуществляется независимо в случайные моменты времени. Это явление и называют дробовым шумом. Таким образом, специфическая особенность дробового шума – физическое разделение двух областей: области, где случайно рождаются носители тока (катод, эмиттер или база), и области, где они взаимодействуют с внешним электрическим полем.

Этот вид шумов вызван дискретной природой носителей заряда. Точно так же, если по проводнику течет постоянный ток, то среднее число носителей заряда, протекающее по нему в единицу времени, постоянно. В то же время в каждый момент времени число носителей заряда статистически изменяется. Это вызывает флуктуации тока. Такое явление называют дробовым эффектом по аналогии с ударами дроби, падающей на металлическую пластину.

При низких частотах спектральная плотность тока постоянна и эффективный шумовой ток не зависит от частоты (является белым шумом). Эффективный шумовой ток пропорционален величине среднего тока и не зависит от температуры окружающей среды.

Частный случай дробового шума – **генерационно-рекомбинационный шум** в полупроводниковых приборах. Генерационно-рекомбинационный шум наблюдается в основном в полупроводниковых средах и обусловлен флуктуациями концентрации носителей в результате статистического характера актов генерации и рекомбинации.

Физическая природа теплового и дробового шума различна, но структура шумовых сигналов обоих типов похожа: оба сигнала можно представить как последовательность случайных импульсов, похожих по форме и случайно распределенных во времени.

Один из видов шума, встречающегося в самых разнообразных системах (электронных, биологических, музыкальных и т. д.), и особенно твердотельных устройствах, приобрел широкую известность. Это является следствием повсеместного распространения и одновременно сложности для теоретического изучения. Этот шум называется $1/f$ -шум, название связано с тем, что спектральная плотность этого шума изменяется в зависимости от частоты как $|f|^{-\alpha}$, где значение α обычно колеблется в пределах 0,8-1,2. Эту зависимость наблюдают при понижении частоты до значения порядка 10^{-6} Гц. Верхний ее предел установить трудно, так как он, как правило, маскируется тепловым или каким-либо другим шумом. Другие названия $1/f$ -шума (исторически) – это: токовый шум; избыточный шум; фликер-шум; контактный шум и иногда называется «розовым шумом».

Отметим, что хотя термин $1/f$ -шума является общим большого числа явлений, из этого вовсе не следует, что существует один общий для всех этих случаев физический механизм возникновения шума такого типа. На самом деле имеющиеся данные дают возможность полагать, что причина возникновения $1/f$ -шума в различных случаях совершенно разная. В настоящее время не существует ни одного вполне удовлетворительного объяснения этого явления, хотя в некоторых условиях модели были получены.

Разновидностью $1/f$ -шума является наблюдаемый в полупроводниках импульсный (**взрывной**) шум – ступенчатые изменения уровня сигнала со случайно распределенными интервалами времени между изменениями уровня.

Анализ шумов в программе PSpice является составной частью частотного анализа (AC Sweep).

Анализ шумов позволяет рассчитывать входную и выходную спектральные плотности шумов. Анализ производится от источника переменного тока или напряжения, для которого указываются амплитудное значение переменной составляющей и величина постоянной составляющей (в частном

случае может быть принята равной нулю). При анализе задаются элемент, на котором будет рассматриваться выходное напряжение шумов, наименование используемого источника и интервал расчета парциальных уровней шума.

Результатом анализа являются кривые спектральных плотностей. При анализе шумов PSpice рассчитывает и выдает следующую информацию для каждой частоты, для которой производится анализ по переменному току:

- шум, генерируемый на выходе некоторого устройства, который складывается из шумов, генерируемых каждым резистором и полупроводником, из которых состоит данное устройство. Для полупроводникового устройства составляющая шума определяется режимами его работы;
- общий выходной и эквивалентный входной шум.

При вычислении полного шума на выходе цепи PSpice вычисляет среднеквадратичную сумму шумов, генерируемых всеми «шумящими» элементами данной цепи.

При вычислении эквивалентного входного шума PSpice делит общий выходной шум на шум, который распространяется по анализируемой цепи от входа к выходу. Этот результат получается при определении входного шума, который обеспечивает на выходе эквивалентный расчетный выходной шум в случае идеальной (не шумящей) цепи.

Таблица 8

Обозначение типов шумов аналоговых элементов (PSpice)

Обозначение шума	Тип шума
NFIB(device_name)	Фликкер-шум компонента
NRB, NRC, NRE	Тепловой (Джонсоновский шум) шум объемных сопротивлений базы, коллектора и эмиттера
NSIB, NSIC	Дробовой шум тока базы и коллектора
NTOT(device_name)	Суммарный шум компонента

Наиболее удобной характеристикой шума для многих приложений является **отношение сигнал/шум**. По значению этого параметра можно судить о степени «засоренности» полезного сигнала шумом. Параметр сигнал/шум представляет собой отношение напряжения сигнала к напряжению шума, выраженное в децибелах. Например, если напряжение полезного сигнала – 1В, а напряжение шума – 1 мВ, отношение сигнал/шум будет составлять 1000:1, или 60 дБ.

В звуковых системах, чем больше значение сигнал/шум, тем более чистый звук обеспечивают колонки. Желательно, чтобы этот параметр был не менее 75 дБ. Для мощных колонок, претендующих на высококлассное звучание, отношение сигнал/шум должно быть не меньше 90 дБ. Величина (60-65 дБ) характерна для «кассетной» записи. Повышение отношения сигнал/шум на 10 дБ означает снижение громкости шума вдвое.

Подготовка к работе

Ознакомиться с целями и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе. Дополнительная литература для подготовки см. [7, 13, 14].

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к лабораторной работе.

Исходная схема для анализа приведена в **Приложении 3**, в соответствии с вариантом (тот же что и в лабораторной работе №2) выбрать номинал внутреннего сопротивления источника входного сигнала (**Приложение 3**), остальные параметры схемы по **Приложению 2** и лабораторной работе №2.

Вычислить номинал емкости при условии, что температура возрастет на 20°C, начальный номинал и ТКЕ по **табл. 9**.

Таблица 9

Вариант	1, 8, 15	2, 9, 16	3, 10, 17	4, 11, 18	5, 12, 19	6, 13, 20	7, 14, 21
C, пФ	100	50	20	15	10	5	1
ТКЕ, %	5	10	15	20	25	30	35

Лабораторное задание

1. Собрать в OrCAD Capture анализируемую схему используя библиотеки транзистора *.lib и *.olb созданные в PSpice Model Editor.

2. Снять АЧХ каскада. Получить зависимость напряжения шумов на выходе каскада от частоты, а так же зависимость отношения сигнал/шум от частоты.

3. Исследовать спектральные плотности шума для всех источников шума в схеме, отдельно для транзистора и остальных компонентов схемы, выявить элементы, дающие наибольший и наименьший вклад в суммарное напряжение шумов.

4. Исследовать зависимости АЧХ и отношения сигнал/шум каскада от температуры. Температурный коэффициент резисторов (ТКС) принять равным 0,0005, емкостей (ТКЕ) принять равным 0,009. Температуру менять в пределах рабочего диапазона транзистора, для расчета температурных зависимостей взять **пять** отсчетов, включая комнатную температуру, и температуры на границах диапазона.

5. Построить зависимости отношения сигнал/шум, коэффициента передачи по напряжению и ширины полосы пропускания от температуры. Для построения графиков использовать не менее **десяти** точек.

Порядок выполнения работы и рекомендации

Ввод и подготовка схемы

1. Загрузить графический редактор схем – программный модуль OrCAD Capture (CIS).

2. Создать проект (**Analog or Mixed-Signal Circuit Project**) и средствами Capture ввести схему, соответствующую своему варианту, в ЭВМ.

Источник входного сигнала – **VAC**, источник питания – **VDC**.

3. Обозначить входы и выходы схемы.

Источники подсоединить с помощью контактов питания **VCC** из библиотеки **CAPSYM.OLB**. Команда **Place>Power...**, соответствующая пиктограмма панели инструментов (рис. 75) или клавиша **F** на клавиатуре. В открывшемся окне **Place Power** выбрать элемент **VCC** (контакт питания) и присвоить имя. Контактам присвоить индивидуальные имена, например: **in** (вход) и **supply** (питание).

Обозначить выход схемы как **out**.¹²

Отличие схемы усилительного каскада от схемы, использованной в лабораторной работе №2, заключается в добавочном сопротивлении, имитирующем внутреннее сопротивление источника сигнала.

Обратить внимание на то, что вход каскада – это точка узел между внутренним сопротивлением и разделительным конденсатором.

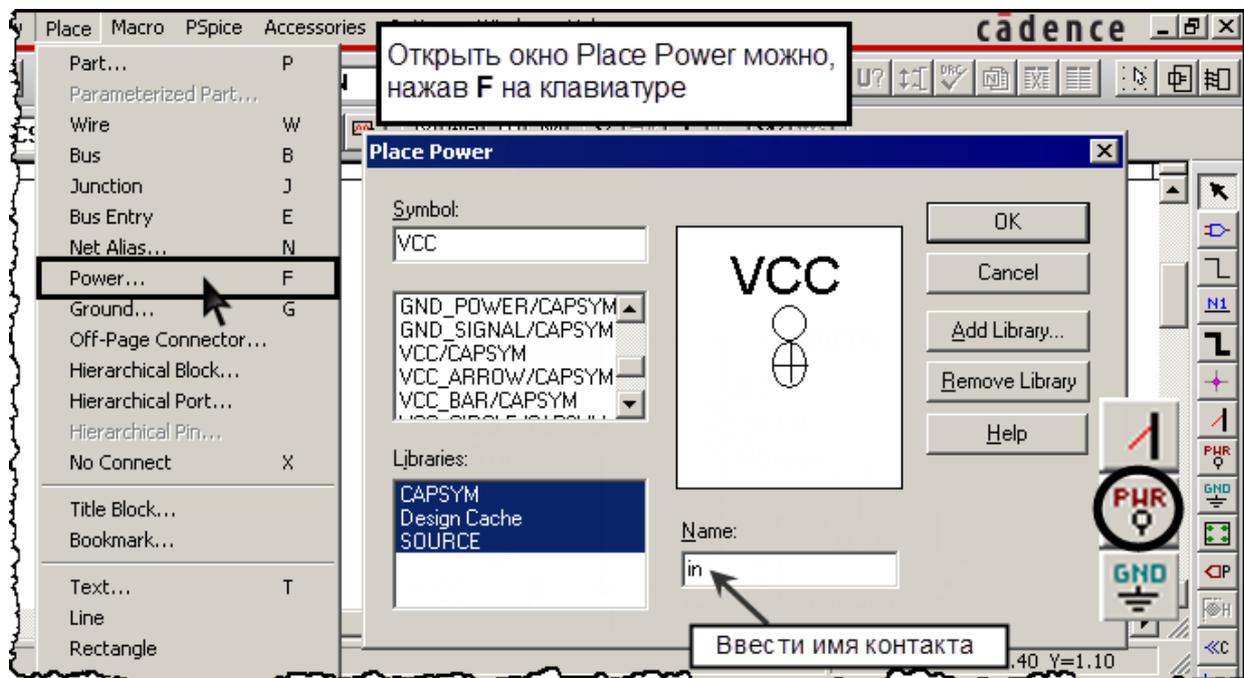


Рис. 75. Добавление контактов VCC

Имена контактов автоматически закрепляются как псевдонимы цепей, к которым подключены.

Анализ шумов

4. Создать новый профиль моделирования.³

5. Выбрать тип анализа **AC Sweep**, настроить параметры для съема АЧХ. В разделе окна **Noise Analysis** установить флажок **Enabled** (разрешить анализ шумов). В поле **Output Voltage** (выходное напряжение – для какой точки схемы произвести анализ шумов) указать напряжение на выходе каскада. В поле **I/V Source** (источник, для которого вычисляется эквивалентный входной шум) указать обозначение входного источника. Пример показан на **рис. 76**.

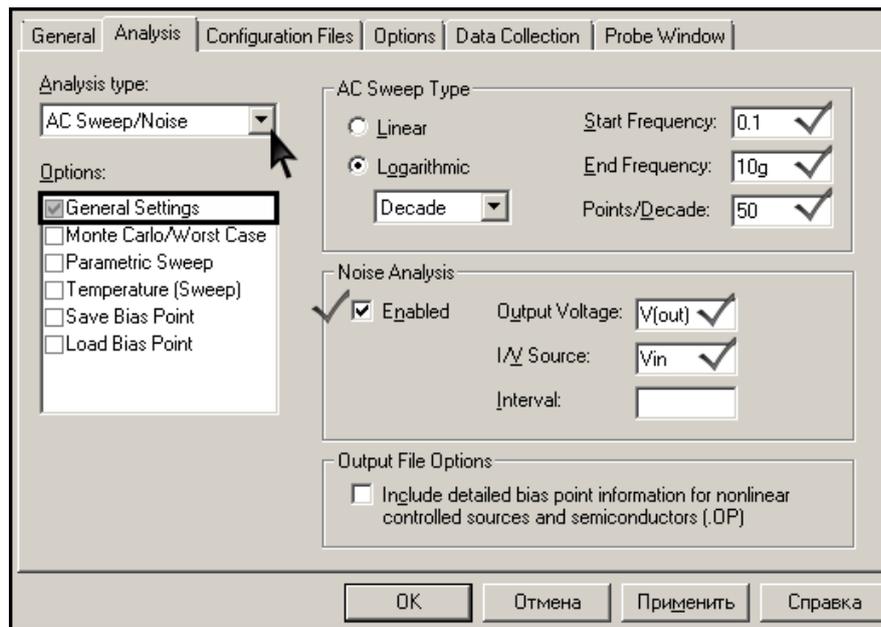


Рис. 76. Настройка анализа шумов

6. Запустить симуляцию.²

7. Построить АЧХ каскада по напряжению. Открыть окно **Add Traces**. В строку **Trace Expression** ввести выражения для коэффициентов передачи по напряжению.

↓ 8. Построить и сохранить зависимость напряжения шумов каскада от частоты.

→ 8.а. Создать и выбрать вторую ось координат **Y**.¹⁵

→ 8.б. Открыть окно **Add Traces**⁷ и в строку **Trace Expressions** ввести выражение **V(ONoise)** (**рис. 77**).

V(ONoise), от out noise – спектральное распределение шумового напряжения в той точке схемы, которая при предварительной установке была указано как выход.

Обозначение ONoise относится к полной мощности выходного шума, NTOT(ONoise) – спектральная плотность мощности выходного шума, имеет размерность В²/Гц, соответственно $V(ONoise) = \sqrt{NTOT(ONoise)}$, измеряется в В/√Гц.

→ 8.в. Сохранить графики характеристик в заготовке отчета.⁵ Пример АЧХ и зависимости напряжения шумов каскада показан на [рис. 78](#).

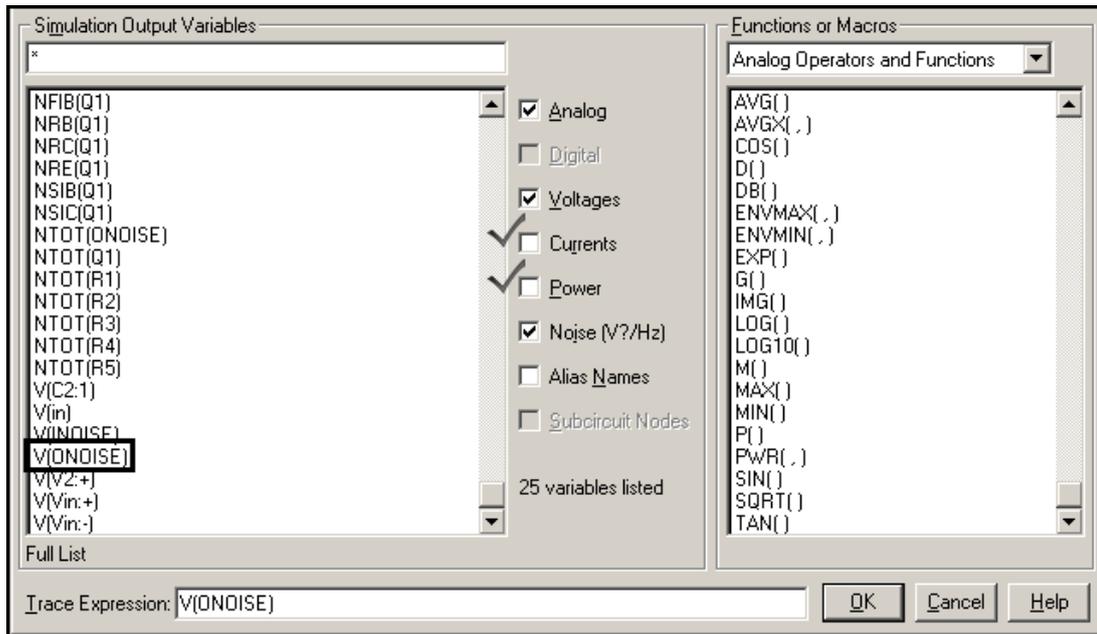


Рис. 77. Ввод выражения для спектра шумового напряжения на выходе

Убрать ненужные переменные из раздела *Simulation Output Variables* окна *Add Traces* можно сняв соответствующие флажки групп переменных в средней части окна ([рис. 77](#)).

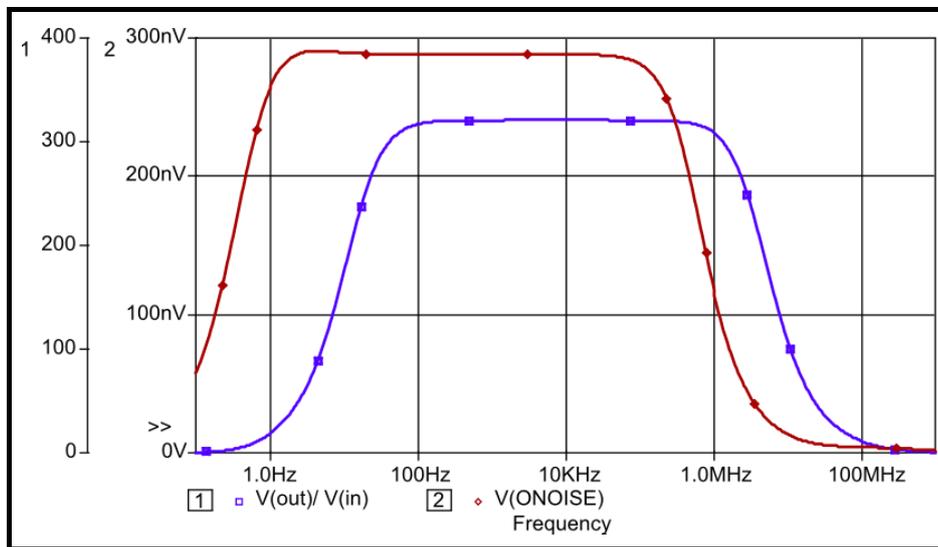


Рис. 78. АЧХ и зависимость напряжения шумов на выходе каскада от частоты

9. Построить зависимость отношения сигнал/шум от частоты в децибелах. Открыть окно **Add Traces**. В строку **Trace Expressions** ввести выражение $DB(V(OUT)/V(ONoise))$.

Вычисление децибел в программе *Probe* происходит с помощью функции $DB(\text{имя переменной})$, DB – от английского *decibel* – децибел.

10. Сохранить графики характеристик в заготовке отчета.⁵

↓ 11. Построить спектральные плотности шумов для различных источников шума в схеме. Пример на [рис. 79](#).

→ 11.а. В PSpice создать новое окно.¹⁴

→ 11.б. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражения для спектральных плотностей NFIB(Q1) NRB(Q1) NRC(Q1) NRE(Q1) NSIB(Q1) NSIC(Q1).

→ 11.в. Изменить масштаб оси Y на логарифмический.¹⁶

→ 11.г. Удалить графики, имеющие только нулевые или близкие к нулю (порядка 10^{-30}) значения.

Многие модели транзисторов не имеют коэффициентов для расчета фликер-шума.

→ 11.д. Сохранить графики шумов транзистора в заготовке отчета.

→ 11.е. В PSpice создать новое окно.¹⁴

→ 11.ж. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражения для спектральных плотностей, всех резисторов и суммарного шума транзистора, например, NTOT(Rb) NTOT(Rk) NTOT(Rn) NTOT(Rvn).

Емкости и индуктивности в PSpice не имеют шумовых моделей.

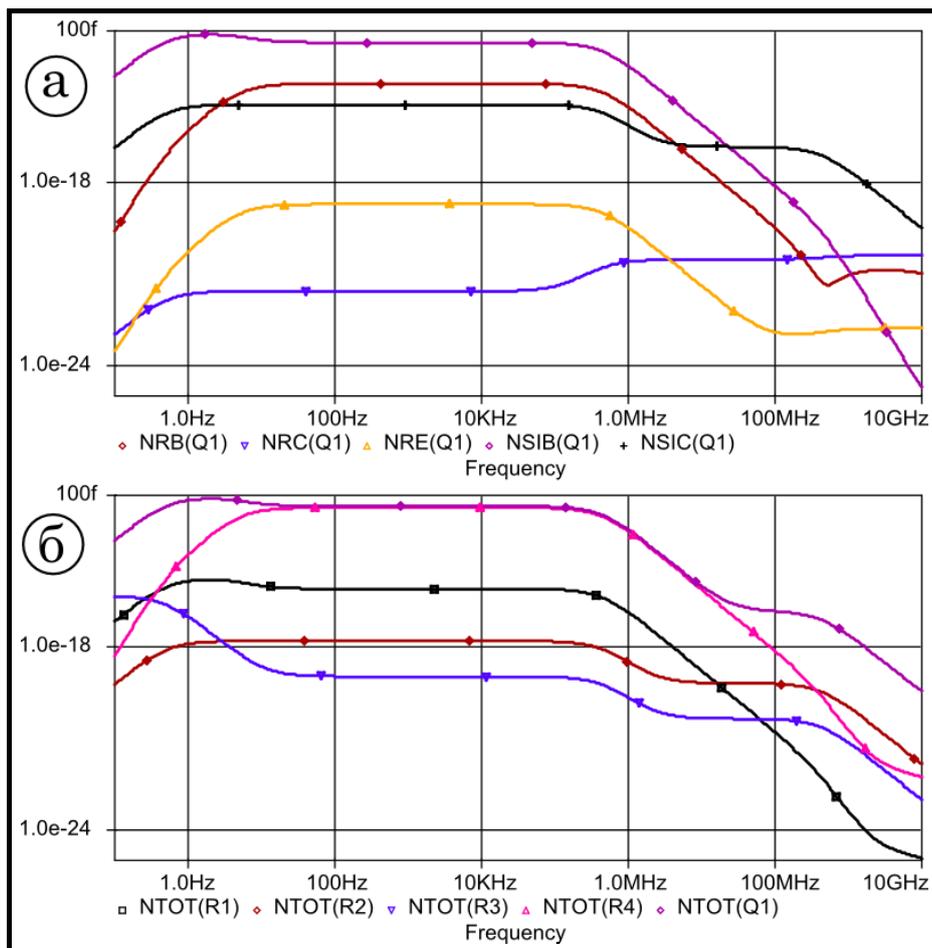


Рис. 79. Спектральные плотности шумов
а – шумы транзистора, б – шумы резисторов и суммарный шум транзистора

- 11.з. Изменить масштаб оси Y на логарифмический.¹⁶
- 11.и. Сохранить графики шумов резисторов в заготовке отчета.⁵
- 12. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Температурный анализ. Подготовка схемы

13. Заменить пассивные компоненты C и R на Cbreak и Rbreak из библиотеки **BREAKOUT**.

В OrCAD параметры компонентов C и R никак не зависят от температуры. Для исследования влияния температуры в программе OrCAD (до версии 16.0 включительно) необходимо использовать компоненты Cbreak и Rbreak, которым можно задать температурные коэффициенты номиналов.

↓ 14. Задать температурный коэффициент номиналов сопротивлений и емкостей в соответствии с п. 4 лабораторного задания.

→ 14.а. Выбрать элемент, затем команда **Edit>Pspice Model** или щелкнуть правой кнопкой и из контекстного меню выбрать **Edit Pspice Model** (рис. 80).

→ 14.б. В открывшемся редакторе моделей (**PSpice Model Editor**), после номинала элемента, через пробел, ввести TC1=0.0005 – для резисторов и TC1=0.009 – для конденсаторов, пример см. рис. 81.

→ 14.в. Сохранить изменения в моделях.

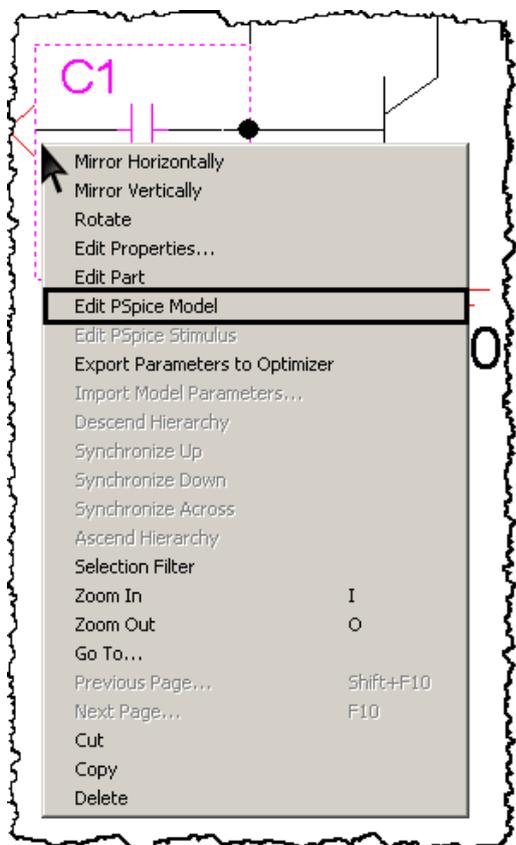


Рис. 80.

Введенный температурный компонент изменится одновременно у всех элементов с одинаковыми псевдонимами.

TC – temperature coefficient, TC1 – это линейный температурный коэффициент.

Температурный коэффициент характеризует процентное изменение абсолютной величины номинала компонента при изменении температуры окружающей среды на 1°C.

Температурный анализ. Temperature (Sweep)

↓ 15. Получить зависимости АЧХ для разных температур.

→ 15.а. Создать новый профиль моделирования.³

→ 15.б. Выбрать тип анализа **AC Sweep**, настроить параметры для съема АЧХ.

→ 15.в. В **Options** выбрать **Temperature**

(Sweep) и задать параметры в соответствии с п. 4 лабораторного задания, пример см. рис. 82.

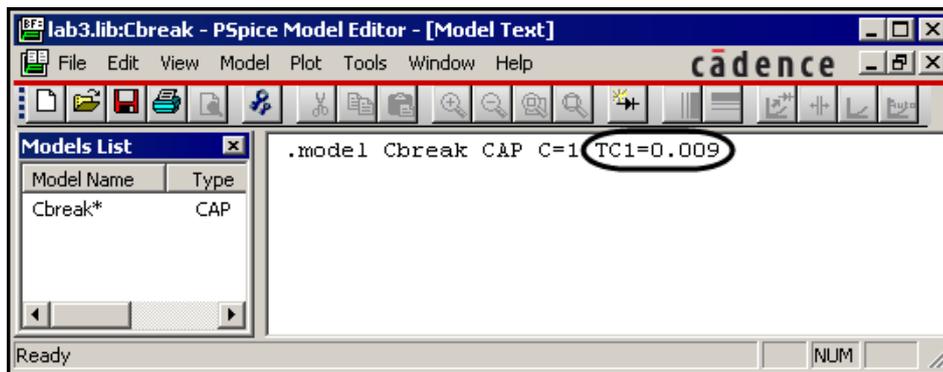


Рис. 81. Редактирование spice-модели емкости Cbreak

Температура в PSpice измеряется в градусах Цельсия, за комнатную температуру в PSpice A/D принята величина 27°С.

Если выбрать опцию **Run the simulation at the temperature** – моделирование будет выполнено для одной температуры.

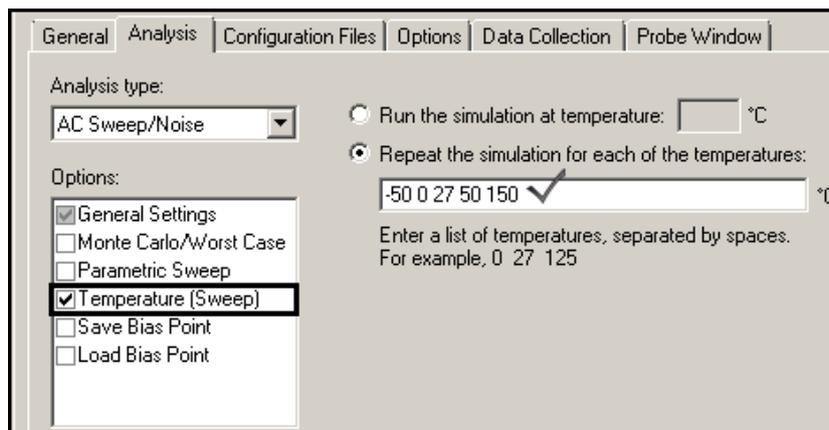


Рис. 82. Настройка частотного анализа для различных температур (Temperature (Sweep))

→ 15.г. Запустить симуляцию.²

По окончании моделирования появиться окно, в котором можно выбрать желаемые температуры для последующего анализа в **Probe**

→ 15.д. Построить АЧХ каскада по напряжению. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражения для коэффициентов передачи по напряжению. Сохранить графики в заготовке отчета.⁵ Примерный вид графиков показан на рис. 83.

→ 15.е. Сохранить в заготовке отчета полученные графики.⁵

16. В PSpice A/D открыть создать окно.¹⁴

17. Построить зависимость отношения сигнал/шум от частоты для различных температур. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражения для отношения сигнал/шум. Сохранить графики в заготовке отчета.⁵

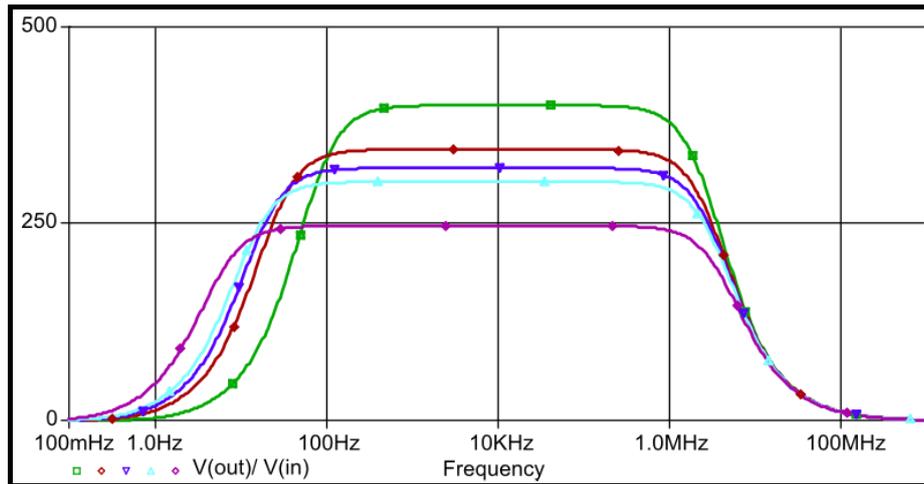


Рис. 83. АЧХ каскада для различных температур

18. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Температурный анализ. Parametric Sweep. Анализ эффективности

19. Открыть профиль моделирования.⁸

20. В **Options** снять выбор с **Temperature (Sweep)** и выбрать **Parametric Sweep**. Задать параметры, в соответствии с п. 5. лабораторного задания, пример см. рис. 84.

На рис. 84 задано изменение температуры до -50 до $+150^{\circ}\text{C}$ с шагом 10 градусов.

21. Запустить симуляцию.⁹

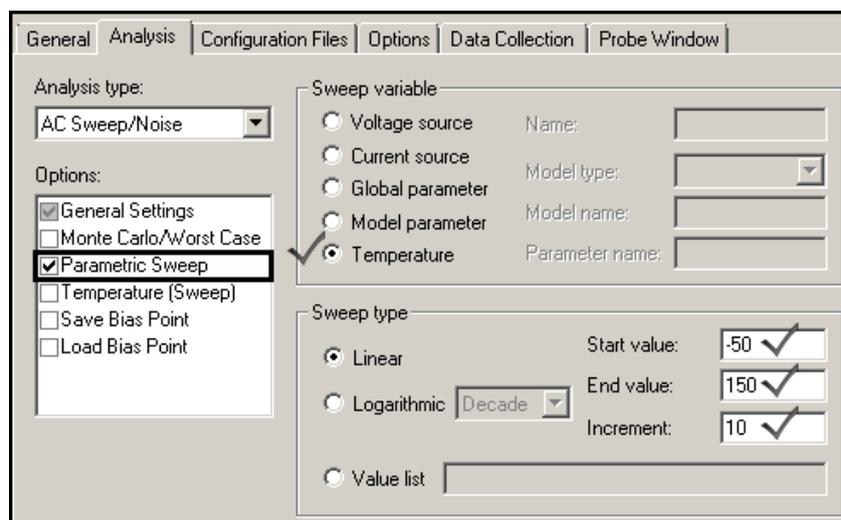


Рис. 84. Настройка частотного анализа для различных температур (Parametric Sweep)

22. В PSpice A/D создать новое окно.¹⁴

23. Запустить анализ эффективности (**Performance Analysis**). Команда **Trace>Performance Analysis** или щелчок соответствующей пиктограммы панели инструментов (рис. 85).

После запуска анализа эффективности по оси X будет откладываться температура в заданном ранее диапазоне.

В ходе анализа эффективности обрабатываются только те данные, которые уже имеются: полученные в результате параметрического, температурного анализа, анализа Монте-Карло или на наихудший случай, т.е. при наличии какой-либо параметрической переменной и возможности получить семейство характеристик. В ходе анализа эффективности, для каждого значения параметра, с каждой кривой семейства, считывается заранее заданное с помощью целевых функций значение, например максимальное значение кривой. Затем полученные таким образом значения можно представить в зависимости от параметрической переменной в виде графика.

24. Построить зависимость коэффициента передачи в полосе пропускания каскада от температуры.

Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражение $\text{Max}(V(\text{OUT})/V(\text{IN}))$ – целевая функция поиска максимума характеристики.

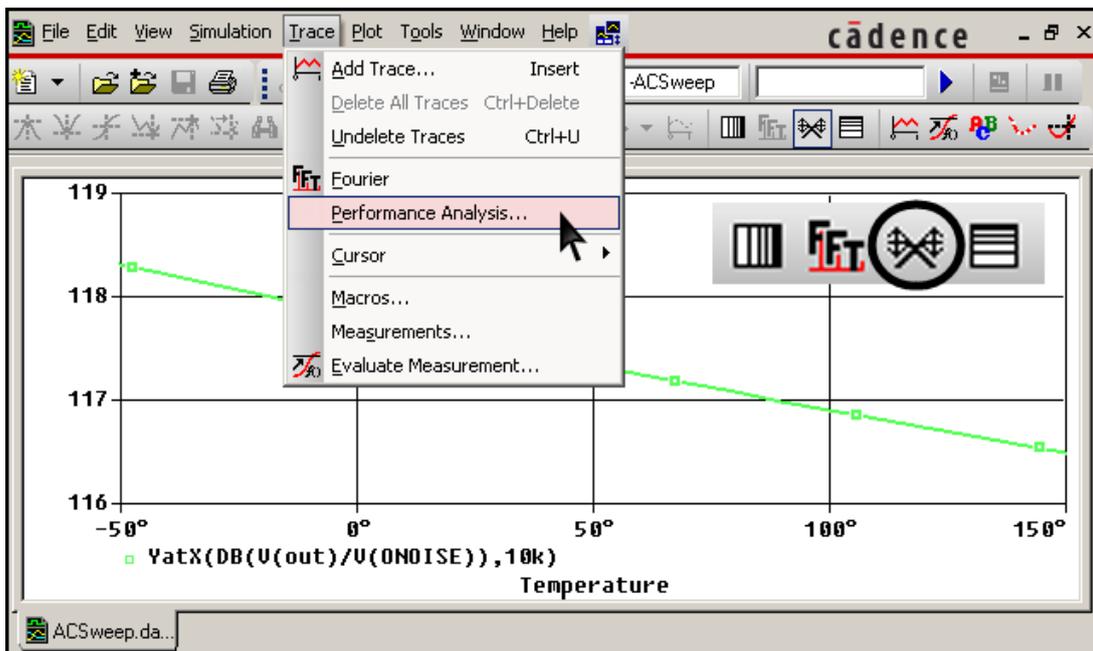


Рис. 85. Запуск анализа эффективности (**Performance Analysis**)

В анализе эффективности в правой части окна **Add Traces**, располагаются не список математических функций и связующих, а **Measurements** (букв. замеры, измерения) – список целевых функций, в версии OrCAD 9.2 – *Goal Function*. С помощью поля *Functions or Macros* можно выбирать, что следует отображать в этой части окна: целевые или математические функции. Часть математических функций и операций можно использовать и в анализе эффективности.

С помощью целевой функции **Max** находится максимум операнда для каждого значения параметрической переменной. Задав выражение

$Max(V(OUT)/V(IN))$ – найдем максимум коэффициента передачи для каждой из температур, при условии, что верхушка АЧХ плоская – получим коэффициент передачи каскада в полосе пропускания.

25. Сохранить полученный график.⁵

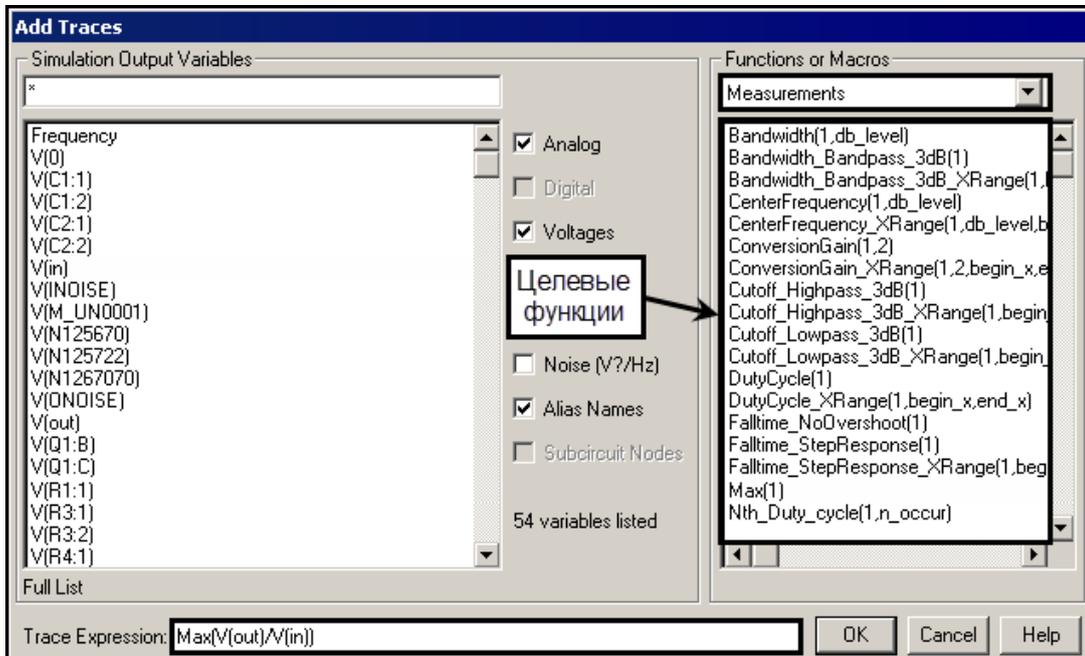


Рис. 86. Запуск анализа эффективности (Performance Analysis)

26. В PSpice A/D создать новое окно.

27. Запустить анализ эффективности (Performance Analysis).¹⁷

Если запускать анализ эффективности через меню **Trace**, то можно воспользоваться помощью мастера анализа эффективности (**Performance Analysis Wizard**).

28. Построить зависимость ширины полосы пропускания каскада от температуры. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражение $Bandwidth(V(OUT)/V(IN),3)$ – целевая функция вычисления полосы пропускания по уровню 3 дБ.

29. Сохранить полученный график.⁵

30. В PSpice A/D создать новое окно.¹⁴

31. Запустить анализ эффективности (Performance Analysis).¹⁷

32. Построить зависимость отношения сигнал/шум каскада в полосе пропускания от температуры. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражение $YatX(DB(V(OUT)/V(ONoise)),10k)$ – целевая функция, которая возвращает значение Y для указанного X. С помощью целевой функции **YatX** найдем отношение сигнал/шум на частоте 10 кГц для каждой из температур. Частота 10 кГц лежит в пределах полосы пропускания каскада.

33. Сохранить полученный график.⁵

34. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Обработка экспериментальных данных

Проанализировать характеристики. Определить элемент, вносящий наибольший вклад в общие шумы каскада. Определить пассивный элемент, вносящий наибольший вклад в общие шумы каскада. Определить вид шума и источник, в транзисторе вносящий наибольший вклад в суммарный шум транзистора.

Содержание отчета

Цель работы, исходная схема, результаты подготовки к работе (расчет номинала емкости, исходные соотношения и пояснения к расчетам), результаты анализа), скриншоты всех используемых в работе схем выполненных в OrCAD Capture, графики всех полученных характеристик и зависимостей, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие элементы схемы являются основными источниками шумов?
2. Физическая природа шумов радиоэлектронных компонентов.
3. Какой спектр имеют шумы радиоэлектронных компонентов?
4. Какие модели используются в PSpice для учета шумовых свойств компонентов?
5. Как называется тип анализа, используемый в OrCAD для исследования шумовых свойств схемы?
6. Какие параметры необходимо указать для проведения анализа шумов в PSpice?
7. Какое влияние оказывает температура на шумы радиоэлектронных компонентов?
8. Какое влияние оказывает температура на работу усилительного каскада?
9. Какие параметры необходимо указать для проведения температурного анализа в PSpice?
10. Как в PSpice задаются ТКС и ТКЕ?
11. Почему для температурного анализа используются компоненты из библиотеки BREAKOUT.OLB?
12. Для чего в данной работе использовался анализ эффективности (**Performance Analysis**)?
13. Как в PSpice обозначаются шумы компонентов?
14. Что и как сделали и получили в лабораторной работе?
15. Какие целевые функции использовались в работе?
16. С помощью какой функции в PSpice вычисляются децибелы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Параметрическая оптимизация, анализ чувствительности и исследование влияния разброса параметров элементов на характеристики схемы

Цель работы

Освоение методик учета влияния разброса внутренних параметров радиоэлектронных компонентов на характеристики схем с помощью средств САПР OrCAD.

Изучение применения метода приращений, метода Монте-Карло и метода расчета на наихудший случай, знакомство с методикой параметрической оптимизацией в среде OrCAD на примере усилительного каскада построенного на основе схемы включения биполярного транзистора с ОЭ со стабилизацией тока базы.

Основные теоретические положения

Влияние разброса параметров элементов. Чувствительность

Ни один параметр элемента РЭС не может быть реализован со значением, в точности равным номинальному. На отклонения будут влиять технологические погрешности изготовления самого элемента, разброс параметров материалов, из которых он выполнен, а также условия эксплуатации (старение элемента, температура, влажность и т. п.).

Следовательно, параметры элементов РЭС есть случайные величины с определенными статистическими характеристиками. Наличие разброса параметров элементов будет вызывать изменения выходных характеристик РЭС.

С помощью компьютерного моделирования можно еще на стадии проектирования решать проблему учета влияния разброса параметров элементов, в общем случае охватывающую целый комплекс задач анализа и синтеза.

В данной лабораторной работе будет решаться задача допускового анализа, заключающаяся в определении возникающих допусков выходных параметров, когда заданы структура устройства, его номинальные параметры, а также допуски номиналов внутренних параметров. Данная задача решается, когда устройство полностью спроектировано и необходимо лишь проанализировать влияние разброса параметров для оценки изделия при выпуске его в серию и необходимости введения подстроечных элементов.

Задачу допускового анализа можно решать с использованием коэффициентов чувствительности, анализа на наихудший случай и анализа Монте-Карло.

В общем случае под чувствительностью понимают реакцию схемы на малое изменение ее внутренних параметров.



Чувствительность позволяет:

- понять, как вариация кого-либо параметра элемента влияет на отклик цепи и найти те элементы, отклонения параметров которых от номинальных приводит к наибольшему отклонению выходных параметров схемы;
- сравнить качество различных цепей имеющих одинаковый отклик при номинальных параметрах;
- определяет градиент функции, который используется при оптимизации схемы и анализе на наихудший случай.

Для численной оценки чувствительности используют абсолютный коэффициент чувствительности (*коэффициент влияния*) – количественная оценка изменения выходного параметра y_j при заданном изменении параметра x_i :

$$A_{ji} = \frac{dy_j}{dx_i}.$$

В качестве выходного параметра в общем случае может использоваться функция качества, а в качестве x_i любой внутренний или внешний параметр.

Коэффициент относительной чувствительности вычисляется по формуле:

$$S_{ji} = \frac{X_i^0}{Y_j^0} \cdot \frac{dy_j}{dx_i},$$

где X_i^0 – номинальное значение параметра элемента;

Y_j^0 – номинальное значение характеристики каскада;

dy_j и dx_i – отклонения характеристики и номинала элемента.

Метод приращений

Наиболее простым методом оценки чувствительности является **метод приращений**, основанный на численном дифференцировании. В этом методе коэффициент чувствительности j -го выходного параметра к изменению i -го внутреннего параметра определяется по выше приведенным формулам для A_{ji} и S_{ji} .

Сначала производят расчет выходных параметров в номинальном режиме. Затем производят n вариантов расчета, в каждом из которых дается отклонение dx_i от номинального значения X_i^0 только одному из внутренних параметров x_i , и вычисляют коэффициенты чувствительности.

Метод основан на линейном приближении зависимости S_{ji} , что обуславливает его невысокую точность. Увеличить точность можно выполняя для каждого внутреннего параметра x_i два варианта расчета путем задания отклонения dx_i в обе стороны от номинала. Кроме того, обычно неизвестны соображения по выбору оптимального значения отклонения dx_i . В большинстве практических случаев точность оказывается достаточной при $-0,25X_i^0 \leq dx_i \leq +0,25X_i^0$.



Наихудший случай

Расчет на наихудший случай является простейшим видом определения разброса выходных параметров устройства без оценки плотности распределения этих параметров. Получаемые с помощью этого расчета оценки сильно завышены, что и определяет название метода.

Наихудший случай соответствует такой ситуации, когда параметры всех элементов имеют максимальные по величине и такие по знаку отклонения, при которых возникает наибольшее отклонение выходной характеристики.

Величину максимальных отклонений внутренних параметров задает разработчик, и обычно она принимается равной допуску на номинал элемента, а знак отклонения определяется в ходе анализа чувствительности.

Анализ проводится из предположения, что знаки коэффициентов чувствительности остаются неизменны во всей рассматриваемой области изменений внутренних параметров. Кроме того, как и в методе приращений, предполагается отсутствие сильных корреляционных связей между отклонениями параметров отдельных элементов.

В расчете на наихудший случай наибольший интерес представляют две ситуации: наихудший случай в меньшую (Low) и большую сторону (Hi), т.е. уменьшение или увеличение выходного параметра.

В общем случае алгоритм расчета на выбранный (Low или Hi) наихудший случай содержит следующие шаги:

- анализ чувствительности и определение знаков коэффициентов чувствительности;
- присвоение внутренним параметрам самых неблагоприятных значений;
- расчет схемы и определение выходного параметра для наихудшего случая.

В случае наличия большого числа корреляционных связей между внутренними параметрами и при нелинейных зависимостях выходных параметров от внутренних, расчет на наихудший случай может дать ошибочную оценку. Кроме того расчет на наихудший случай не позволяет оценить вероятность наступления этого, самого неблагоприятного, случая, которая как правило, низка.

Монте-Карло

Для точной оценки влияния разброса параметров элементов на выходные характеристики устройства необходимо использовать методы статистического моделирования, наиболее известный и распространенный из которых является **метод Монте-Карло**.

По своей сути этот метод аналогичен натурному макетированию, однако вместо изготовления макета из элементов с разбросом используется генерация вектора случайных параметров с заданными статистическими характеристиками.

Алгоритм анализа Монте-Карло функционирует следующим образом:

1. Выполняется генерация случайной реализации вектора внутренних

параметров устройства, при этом каждая компонента вектора генерируется с соответствующими статистическими характеристиками.

2. Проводится моделирование схемы с данным вектором параметров и определяется реализация выходных характеристик и вычисляются оценки выходных параметров (коэффициент передачи, полоса пропускания и т. д.).

3. Заданное число раз повторяются шаги 1 и 2. Число повторений зависит от требуемой точности статистического моделирования.

Метод Монте-Карло при высокой точности требует очень большого объема испытаний, однако уже при 1000 испытаниях обеспечивается точность порядка 1 %, что вполне достаточно для практики.

4. По найденной совокупности реализаций выходных характеристик и параметров выполняется их статистическая обработка. Например, определяется математическое ожидание, дисперсия, их доверительные интервалы, границы полей допусков и т. д.

5. По полученной совокупности реализаций выходных параметров строятся гистограммы распределения.

Анализ методом Монте-Карло и расчет на наихудший случай в OrCAD PSpice A/D доступны как опции анализов **AC Sweep**, **DC Sweep** и **Time Domain**. Анализ чувствительности выполняется в ходе расчета на наихудший случай, его результаты доступны в выходном файле. Как опция, анализ чувствительности для статического режима доступен в анализе **Bias Point**.

Кроме того анализ чувствительности и метод Монте-Карло можно выполнять в модуле PSpice Advanced Analysis который по сравнению с PSpice A/D предоставляет более широкие и наглядные возможности настройки и обработки результатов по данным видам моделирования.

Параметрическая оптимизация

Параметрическая оптимизация относится к методам синтеза и представляет собой процедуру определения такой совокупности внутренних параметров РЭС, при которой заранее выбранные выходные параметры принимают наилучшие возможные значения.

В основе методов параметрической оптимизации лежат способы, основанные на поиске с применением коэффициентов чувствительности условного экстремума (минимума или максимума) некоторой вспомогательной функции, называемой *целевой функцией*. При этом целевая функция есть функция от допусков на параметры.

Полное решение задачи проектирования РЭС методами параметрической оптимизации включает следующие этапы:

- моделирование устройства;
- составление целевой функции с выбором тех или иных критериев качества проектируемого устройства;
- минимизация (максимизация) целевой функции для получения оптимальных внутренних параметров устройства, при этом, как и в задачах анали-

за влияния разброса параметров элементов, неоднократно решается задача анализа схемы.

В лабораторной работе рассматривается учебный пример, заключающийся в автоматизированном подборе параметров элементов схемы усилительного каскада, для получения заданного режима работы каскада по постоянному току.

Параметрическая оптимизация в OrCAD выполняется в модуле PSpice Advanced Analysis.

Подготовка к работе

Ознакомиться с целями и содержанием лабораторной работы.

Изучить теоретические сведения к работе. Дополнительная литература для подготовки см. [1, 2, 9, 11].

Заготовить таблицу для расчета коэффициентов чувствительности.

Пройти входное тестирование или опрос для допуска к лабораторной работе.

Исходная схема для анализа, параметры схемы по [Приложению 2](#) и лабораторной работе №2.

Лабораторное задание

1. Собрать в OrCAD Capture анализируемую схему используя библиотеки транзистора *.lib и *.olb созданные в PSpice Model Editor.

2. Снять АЧХ каскада. С помощью метода приращений произвести расчет коэффициента чувствительности характеристик каскада к разбросу параметров элементов. Результаты представить в таблицах (см. [таб. 10](#) и [11](#)). В качестве характеристик каскада использовать: коэффициент передачи каскада по напряжению, в полосе пропускания и ширину полосы пропускания АЧХ по уровню 3дБ. В качестве параметров элементов использовать номиналы сопротивлений и емкостей, входящих в схему, а так же коэффициент усиления тока базы транзистора в схеме с ОЭ. Величину отклонения параметров принять равной 10% от номинала.

Таблица 10

Относительная чувствительность коэффициента передачи каскада по напряжению, в полосе пропускания к изменению параметров компонентов

Компонент	Номинал	dx_i	$+K_0, \text{дБ}$	$-K_0, \text{дБ}$	$dK_0, \text{дБ}$	$S_{K_0,i}$
R_R1 (кОм)	13,5	1,35	36,191	36,208	0,017	4,053E-03
R_R2 (Ом)	26	2,6	...	...		...
C_C3 (мФ)	1	0,1	...	...		...
C_C4 (мФ)	1	0,1	...	...		...
BF_Q	229,798	22,98	...	...		...
...

Таблица 11

Относительная чувствительность ширины полосы пропускания каскада к изменению параметров компонентов

Компонент	Номинал	Δx_i	$+\Delta f, \text{кГц}$	$-\Delta f, \text{кГц}$	$-d\Delta f, \text{кГц}$	$S_{\Delta f, i}$
R R1 (кОм)	13,5	1,35	987,15666	986,1674	0,98926	0,009893
...

2. Произвести анализ влияния разброса параметров радиокомпонентов на характеристики схемы при помощи статистического анализа по методу Монте-Карло и расчет наихудшего случая. Задать всем сопротивлениям, емкостям и коэффициенту усиления тока базы транзистора в схеме с ОЭ допуск: для пассивных компонентов – 10 %, для коэффициента усиления тока базы – 25%.

2.1. Метод Монте-Карло.

В качестве выходной переменной использовать напряжение на выходе каскада, тип распределения для номиналов элементов выбрать равномерным, число статистических испытаний («прогонов») установить не менее 200.

Построить АЧХ каскада для всех «прогонов» анализа Монте-Карло. Построить гистограммы статистического распределения коэффициента передачи и ширины полосы пропускания АЧХ.

2.2. Расчет на наихудший случай.

В качестве выходной переменной использовать напряжение на выходе каскада. Произвести расчет и построить АЧХ каскада для направления изменения параметров компонентов N_i (положительное приращение) и Low (отрицательное приращение). Найти отклонения ширины полосы пропускания и коэффициента передачи в полосе пропускания для наихудшего случая любым возможным способом.

3. По выходным характеристикам транзистора, полученным в лабораторной работе №2 выбрать новую рабочую точку и произвести параметрическую оптимизацию каскада с помощью модуля PSpice Advanced Analysis (в OrCAD 9.2 – модуль PSpice Optimizer). Оптимизацию производить для рабочей точки с неизвестным заранее током базы $I_{\beta 0}$, опираясь на значения напряжения $U_{кэ0}$ и тока $I_{к0}$.

Порядок выполнения и рекомендации

Подготовка схемы

1. Загрузить графический редактор схем – программный модуль OrCAD Capture (CIS).

2. Создать проект (**Analog or Mixed A/D**) и средствами Capture ввести схему, соответствующую своему варианту, в ЭВМ.



Источник входного сигнала – **VSIN**, источник питания – **VDC**.

Обозначить входы и выходы схемы, присвоив псевдонимы соответствующим цепям.¹² Вход обозначить как **in**, а выход – **out**.

3. Параметры источника **VSIN**: смещение – 0, амплитуда колебания – 0, частота сигнала – из диапазона, в пределах которого АЧХ каскада по напряжению линейна, параметр **AC** задать равным $U_{вх}$ и отобразить на схеме (см. [пп. 5.а](#) и [5.г](#) лабораторной работы №2, часть 2).

5. Создать новый профиль моделирования.³ Выбрать тип анализа – **AC Sweep**, настроить параметры для съема АЧХ.

6. Запустить симуляцию.²

7. Построить АЧХ каскада по напряжению. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражения для коэффициентов передачи по напряжению. Сохранить графики в заготовке отчета.⁵

↓ 8. Найти коэффициент передачи каскада по напряжению, в полосе пропускания и ширину полосы пропускания АЧХ по уровню 3дБ.

→ 8.а. Открыть окно **Evaluate Measurement** (вычисление целевых функций). Команда **Trace>Evaluate Measurement...**, или соответствующая пиктограмма панели инструментов ([рис. 87](#)).

→ 8.б. В строку **Trace Expression** ввести $\text{MAX}(\text{DB}(\text{V}(\text{OUT})/\text{V}(\text{IN})))$.

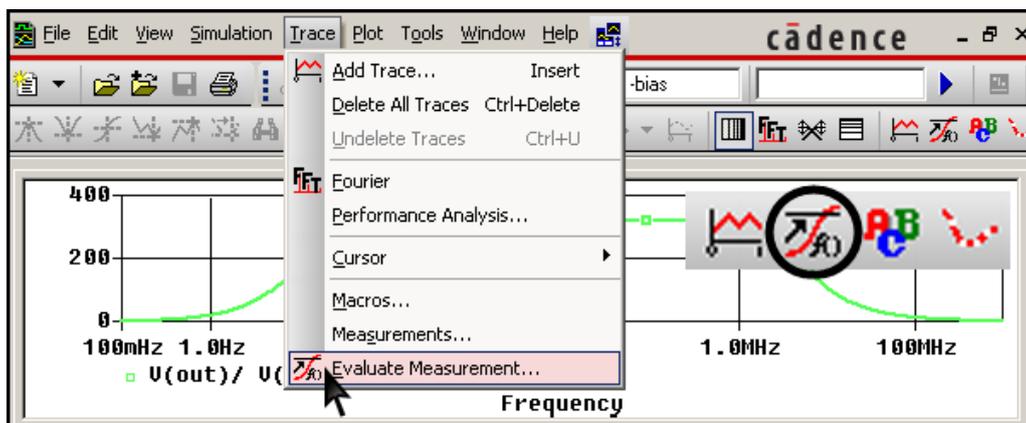


Рис. 87. Расчет целевых функций

→ 8.в. Открыть окно **Evaluate Measurement**.¹⁸

→ 8.г. В строку **Trace Expression** ввести $\text{BANDWIDTH}(\text{V}(\text{OUT})/\text{V}(\text{IN}),3)$.

Окно **Evaluate Measurement** ([рис. 88](#)) открываемое командой ([рис. 87](#)), аналогично окну **Add Traces**, но в правой части окна, как и в анализе эффективности, находится список целевых функций. В OrCAD 9.2, команда для расчета целевых функций **Trace>Eval Goal Function**.

В версиях OrCAD 10.5 и старше результаты вычисления целевых функций можно отображаются в виде таблицы под область построения ([рис. 89](#)), если таблица не появилась, выполнить команду **View>Measurement Results** ([рис. 89](#)).

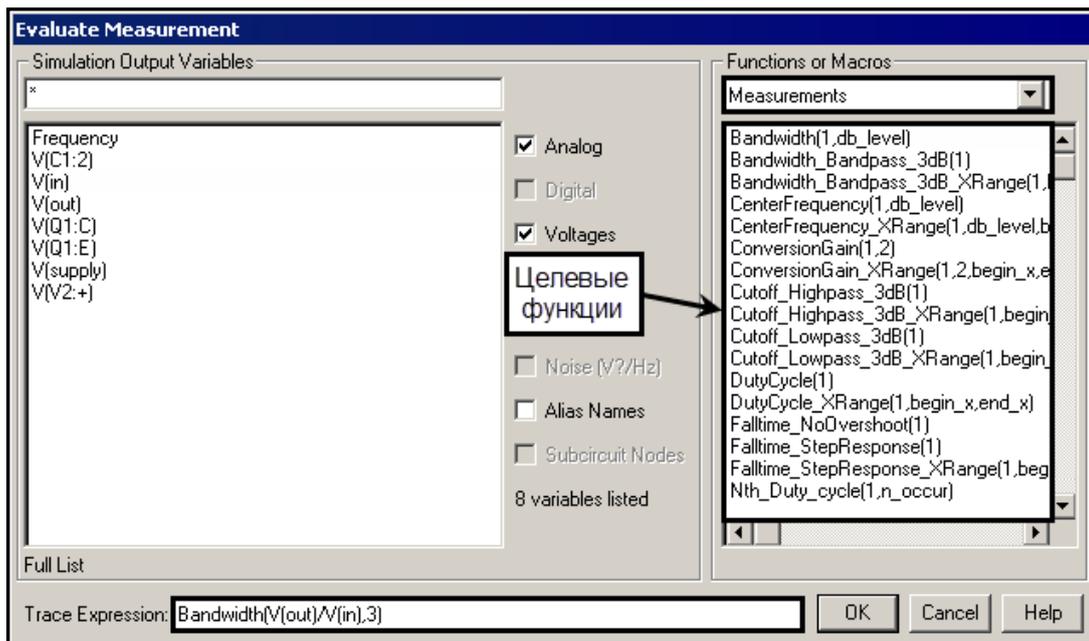


Рис. 88. Окно Evaluate Measurement. Расчет целевых функций

→ 8.д. Зафиксировать полученные значения коэффициента передачи и ширину полосы пропускания в заготовке отчета.

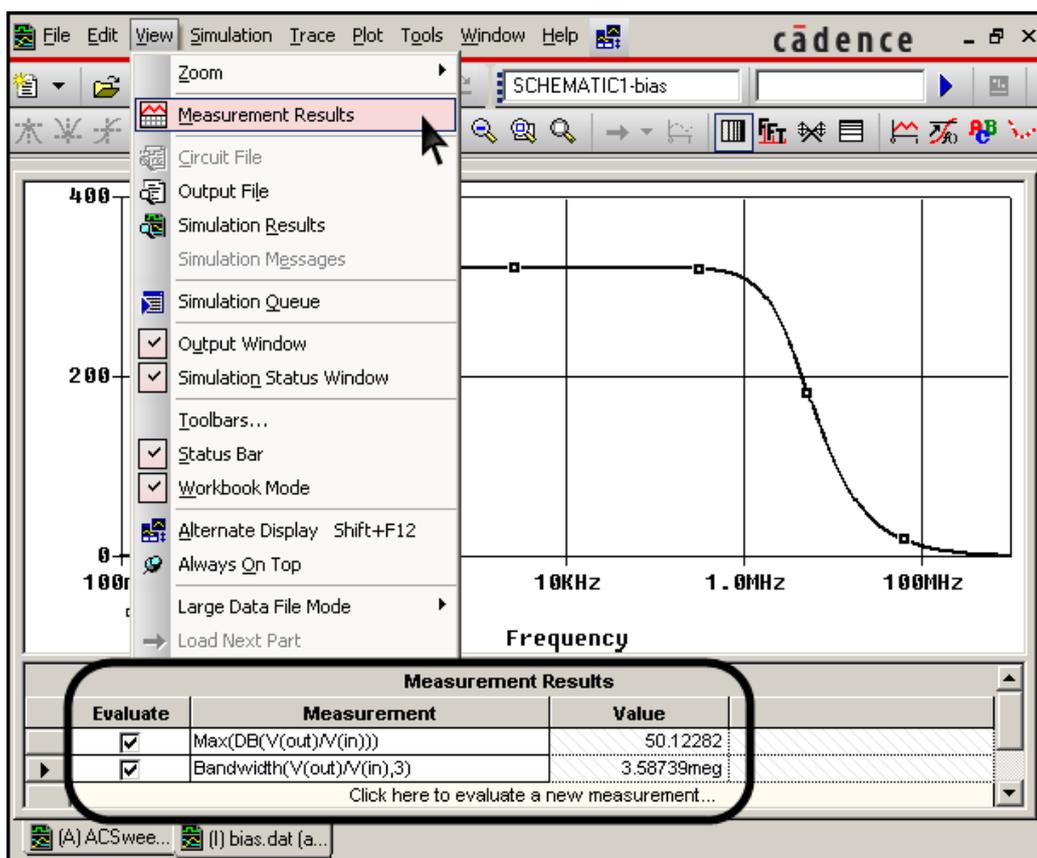


Рис. 89. Отображение результатов вычислений целевых функций в табличном виде

Результаты расчета целевых функций можно отобразить на графике, для этого выполнить команду **Tools>Options...**, в открывшемся диалоговом

окне **Probe Settings** поставить флажок **Display Evaluation**. С данной установкой, при каждом расчете целевых функций будет построен график с метками и результатами вычисления, соответствующими введенной целевой функции (рис. 90).

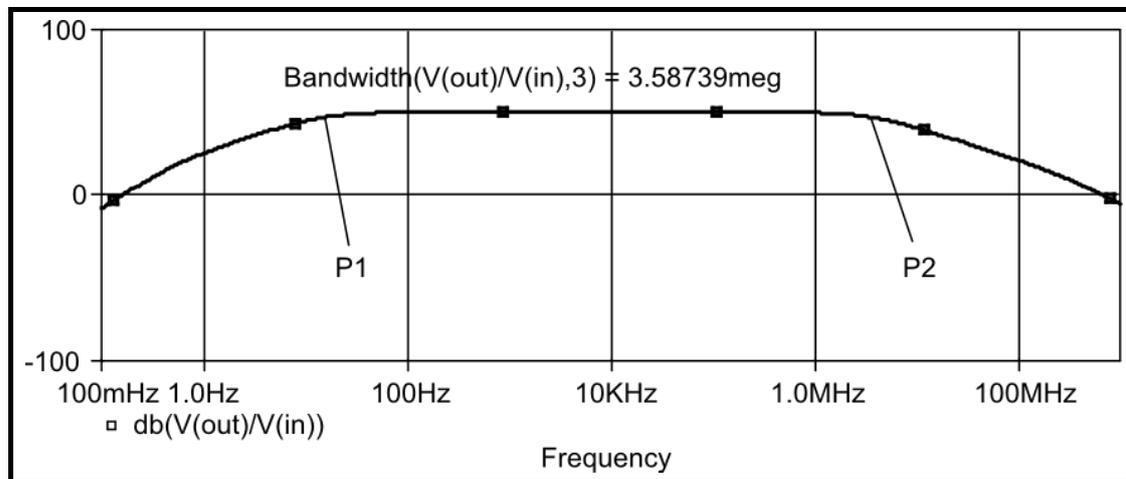


Рис. 90. Отображение результатов вычислений целевых функций на графике

Анализ чувствительности методом приращений

↓ 9. С помощью метода приращений произвести расчет коэффициента чувствительности характеристик каскада к разбросу параметров элементов.

→ 9.а. Увеличить параметр какого-либо элемента на 10%. Повторить действия по пп. 6, 7, 8. Результаты внести в таблицу (см. табл. 10 и 11).

Если в окне **Simulation Settings**, на закладке **Probe Windows** включить опцию **Last plot**, то пересчет АЧХ и целевых функций будет происходить автоматически.

→ 9.б. Присвоить выбранному в п. 9.а элементу значение параметра на 10% меньше номинального. Повторить действия по пп. 6, 7, 8. Результаты внести в таблицу (см. табл. 10 и 11), затем вернуть параметру номинальное значение.

→ 9.в. Повторить действия по пп. 9.а и 9.б для всех элементов схемы, кроме источников энергии и заполнить таблицу числовыми значениями.

↑ 9.в.1. Для биполярного транзистора приращения выполнять для параметра $spice$ -модели транзистора BF – коэффициент усиления тока базы в схеме с ОЭ.

↑ 9.в.2. Для изменения параметров $spice$ -модели транзистора выбрать транзистор, затем команда **Edit>Pspice Model** или щелкнуть правой кнопкой и из контекстного меню выбрать **Edit Pspice Model**.

↑ 9.в.3. В открывшемся редакторе моделей (**Pspice Model Editor**), найти и изменить параметр BF $spice$ -модели. Сохранить изменения.

Задание допусков параметров элементов

10. Вернуть всем элементам номинальные параметры.

11. В свойствах компонентов задать всем сопротивлениям и емкостям допуск номинала равный 10%.

Выделить все сопротивления и емкости последовательными щелчками мыши удерживая клавишу Ctrl, затем открыть редактор свойств компонентов, команда **Edit>Properties (Ctrl+E)**. В появившемся окне редактора свойств, ввести параметр TOLERANCE для всех компонентов равный 10 % (рис. 91).

	A	B	C	D	E
	SCHEMA	SCHEMA	SCHEMA	SCHEMA	SCHEMA
Reference	C1	C2	R1	R2	R3
SLOPE	CSMAX	CSMAX	RSMAX	RSMAX	RSMAX
Source Library	CAORCA	CAORCA	CAORCA	CAORCA	CAORCA
Source Package	C	C	R	R	R
Source Part	C.Normal	C.Normal	R.Normal	R.Normal	R.Normal
TOLERANCE	10%	10%	10%	10%	10%
Value	0.1m	0.1m	93.372k	203.4	3k
VOLTAGE	CMAX	CMAX	RVMAX	RVMAX	RVMAX

Рис. 91. Задание параметра TOLERANCE

↓ 12. Задать разброс для коэффициента усиления тока базы транзистора.

→ 12.a. Выделить транзистор, затем команда **Edit>Pspice Model** или щелкнуть правой кнопкой мыши и из контекстного меню выбрать **Edit Ppice Model**.

→ 12.б. В тексте spice-модели транзистора, после BF=... задать отклонение DEV=25% (рис. 92), сохранить изменения.

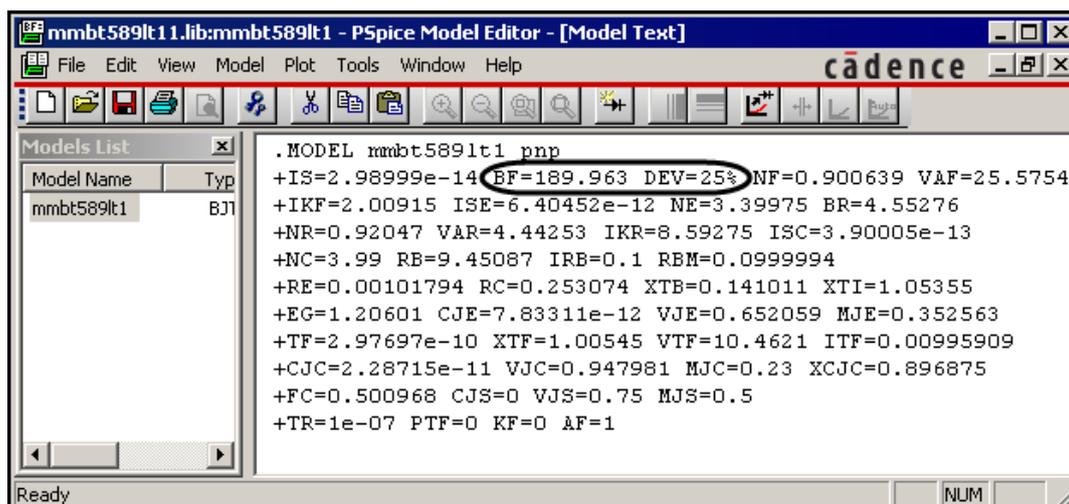


Рис. 92. Редактирование spice-модели транзистора

В анализе Монте-Карло и расчете наихудшего случая в PSpice A/D учитываются только элементы и параметры с заданным допуском.

Параметры, имеющие опцию *DEV*, получают случайный разброс значений в пределах указанной в процентах величины. Параметр *TOLERANCE* в редакторе свойств назначает *DEV* для пассивных компонентов из библиотеки *ANALOG.OLB*. Для пассивных компонентов из библиотеки *BREAKOUT.OLB* разброс задается редакцией *spice*-модели компонента, вводом и заданием *DEV*.

Расчет на наихудший случай

- ↓ 13. Произвести расчет на наихудший случай.
- 13.а. Создать новый профиль моделирования.³ Выбрать тип анализа – **AC Sweep**, настроить параметры для съема АЧХ.
 - 13.б. В разделе окна **Options** установить флажок **Monte Carlo/Worst-case**, затем выбрать опцию **Worst-case/Sensitivity**. В качестве выходной переменной использовать напряжение на выходе каскада (**Output variable – V(out)**) (рис. 93).

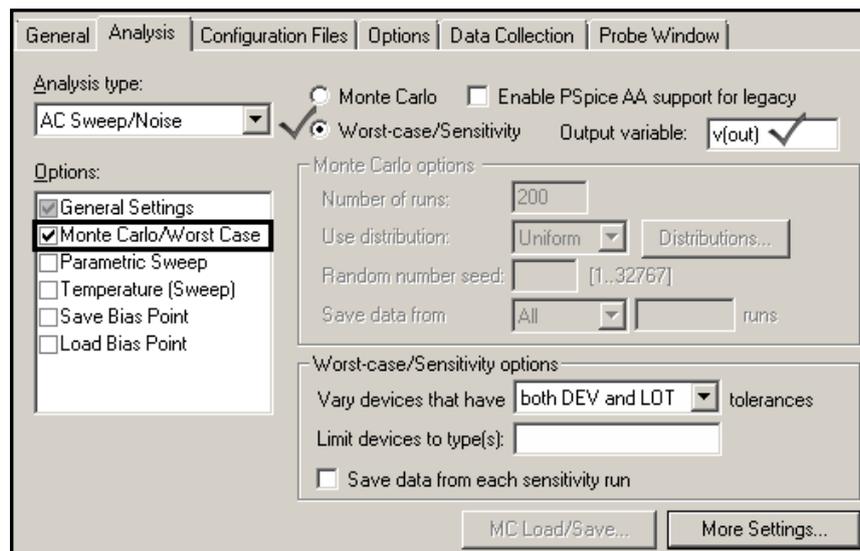


Рис. 93. Настройка анализа на наихудший случай

- 13.в. Задать направление изменения выходной характеристики H_i . Для выбора направления приращения необходимо в окне настройки **Worst-case/Sensitivity** щелкнуть **More Settings**, в окне **Monte Carlo/Worst-case Output File Options** в разделе **Worst-Case direction** поставить флажок H_i .
- 13.г. Запустить симуляцию.²
- 13.д. Построить АЧХ каскада по напряжению для всех прогонов. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expression** ввести выражения для коэффициентов передачи по напряжению. Сохранить графики в заготовке отчета.⁵
- 13.е. Найти отклонения ширины полосы пропускания и коэффициента передачи в полосе пропускания (в децибелах) для наихудшего случая любым

возможным способом. Можно воспользоваться трассировкой или вычислить соответствующие целевые функции. Пример показан на [рис. 94](#).

- 13.ж. Сохранить полученные графики и числовые параметры.⁵
- 13.з. Задать направление изменения выходной характеристики Low и повторить действия по [пп. 13.г, 13.д, 13.е, 13.ж](#).

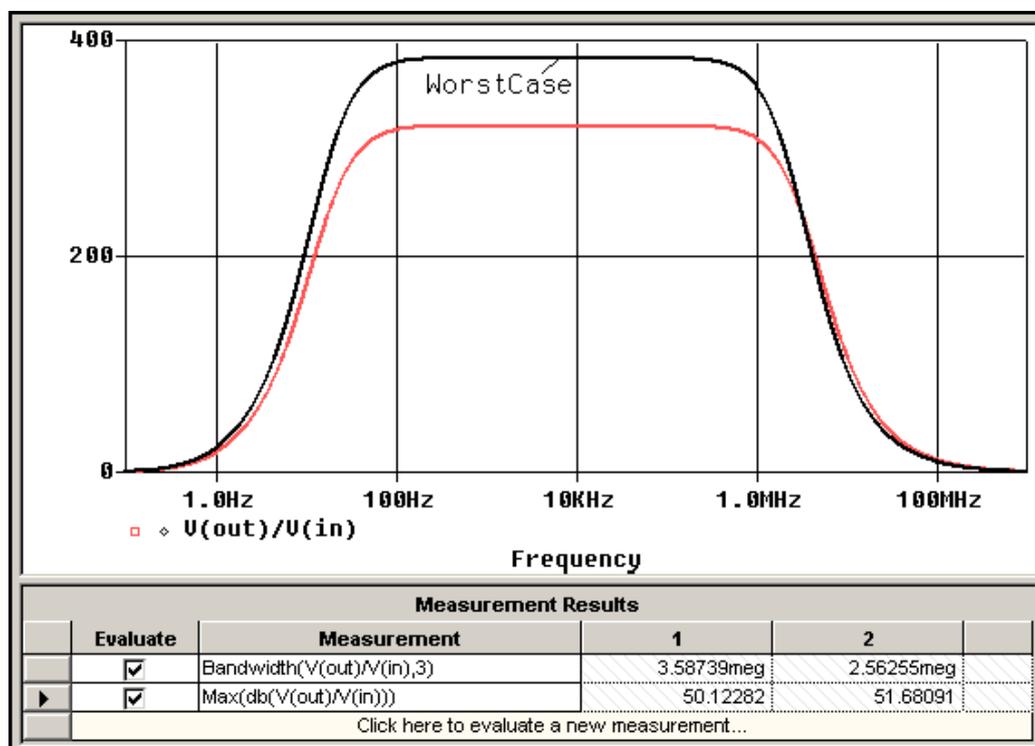


Рис. 94. Результаты анализа на наихудший случай

- 13.и. Открыть выходной файл (**Output File**)⁴ найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

В ходе расчета наихудшего случая определяются коэффициенты чувствительности для выходной переменной (**Output variable**), при этом приращения для параметров элементов находятся по формуле: $dx_i = X_i^0 \cdot RELTOL$, где X_i^0 – номинальное значение параметра элемента, $RELTOL$ – относительная точность расчета, задается через опции окна **Simulation Settings** и по умолчанию равна 0,001. Результаты анализа чувствительности доступны в выходном файле.

Приращения параметров элементов для наихудшего случая принимаются равными заданному допуску, в нашем случае параметру **TOLERANCE (DEV)**.

Анализ Монте-Карло

- ↓ 14. Произвести анализ Монте-Карло.
- 14.а. Создать новый профиль моделирования.³ Выбрать тип анализа – **AC Sweep**, настроить параметры для съема АЧХ.

→ 14.б. В разделе окна **Options** установить флажок **Monte Carlo/Worst-case**, затем выбрать опцию **Monte Carlo**. В качестве выходной переменной использовать напряжение на выходе каскада (**Output variable – V(out)**), тип распределения для номиналов элементов выбрать равномерное (**Use distribution – Uniform**), число статистических испытаний («прогонов») установить не менее 200 (**Number of runs \geq 200**). Пример показан на [рис. 95](#).

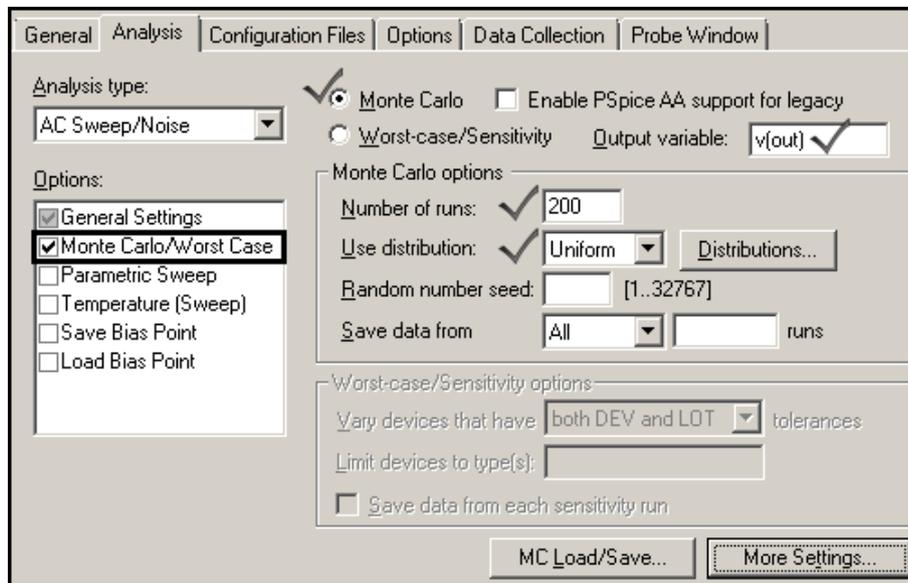


Рис. 95. Настройка анализа Монте-Карло

В поле **Random number seed** задается начальное значение генератора случайных чисел, оно может принимать нечетные значения в диапазоне от 1 до 32767. По умолчанию, начальное значение устанавливается в 17533. При одинаковых значениях результаты анализа Монте-Карло будут повторяться.

В поле **Output Variable** указывается имя выходной переменной, подлежащей статистической обработке

В выпадающем меню **Use distribution** можно выбрать стандартный закон распределения случайных величин:

Uniform – равновероятное распределение на отрезке $(-1, +1)$;

Gauss – распределение Гаусса (нормальное) на отрезке $(-1, +1)$ с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением $CKO=0,25$.

Кроме того, можно задать нестандартный закон распределения случайных величин, щелкнув по клавише **Distributions**.

→ 14.в. Запустить симуляцию.²

Для анализа Монте-Карло случайные значения параметров компонентов рассчитываются по формуле: $x_i = X_i^0 \cdot (1 + \xi \cdot \Delta)$, где X_i^0 – номинальное значение параметра элемента, Δ – допуск параметра элемента, в нашем случае *TOLERANCE (DEV)*, ξ – центрированная случайная величина в диапазоне $(-1, +1)$, формируема генератором случайных чисел в соответствии с заданным законом распределения.

- 14.г. Построить АЧХ каскада по напряжению для всех прогонов. Открыть окно **Add Traces**. В строку **Trace Expression** ввести выражение для коэффициента передачи по напряжению.
- 14.д. Изменить параметры отображения графиков, включив запрет показа символов. Команда **Tools>Options...**, в открывшемся диалоговом окне **Probe Settings** в разделе **Use Symbols** поставить флажок **Never** (рис. 96).
- 14.е. Сохранить полученные графики АЧХ в заготовке отчета.⁵

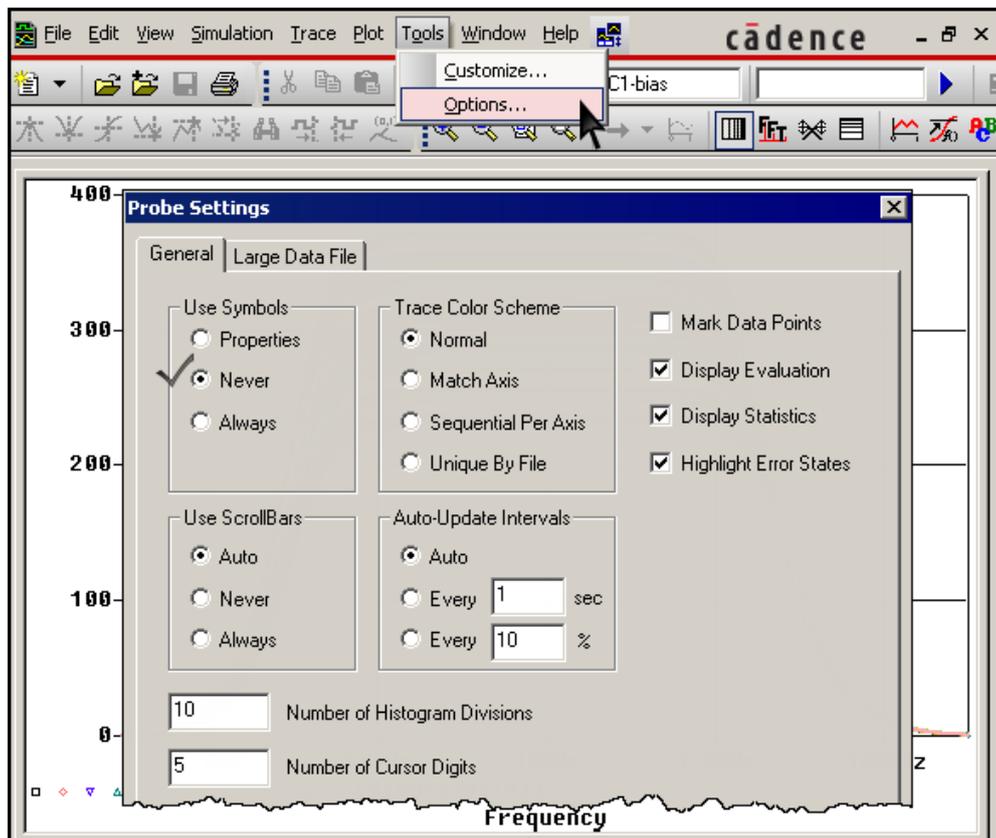


Рис. 96. Окно Probe Settings. Запрет показа символов графиков

- 14.ж. Построить гистограммы статистического распределения коэффициента передачи и ширины полосы пропускания АЧХ.
 - ↑ 14.ж.1. В **PSpice A/D** создать новое окно.¹⁴ Запустить анализ эффективности (**Performance Analysis**).¹⁷
 - ↑ 14.ж.2. Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражение $\text{MAX}(\text{DB}(\text{V}(\text{OUT})/\text{V}(\text{IN})))$.
 - ↑ 14.ж.3. Добавить в текущем окне еще одну систему координат (область построения).¹⁹ Открыть окно **Add Traces**.⁷ В строку **Trace Expressions** ввести выражение $\text{BANDWIDTH}(\text{V}(\text{OUT})/\text{V}(\text{IN}), 3)$.
- 14.з. Сохранить полученные гистограммы и числовые параметры.⁵ Пример показан на рис. 97.

Числовые параметры, полученные в результате анализа Монте-Карло: n samples – число прогонов, n divisions – число столбцов гистограммы; mean,

maximum, minimum, median – среднее (математическое ожидание), максимум, минимум и медиана полученного распределения значений целевой функции; *10th%ile, 90th%ile* – десяти и девяностопроцентные квантили распределения; *sigma* – среднеквадратическое отклонение.

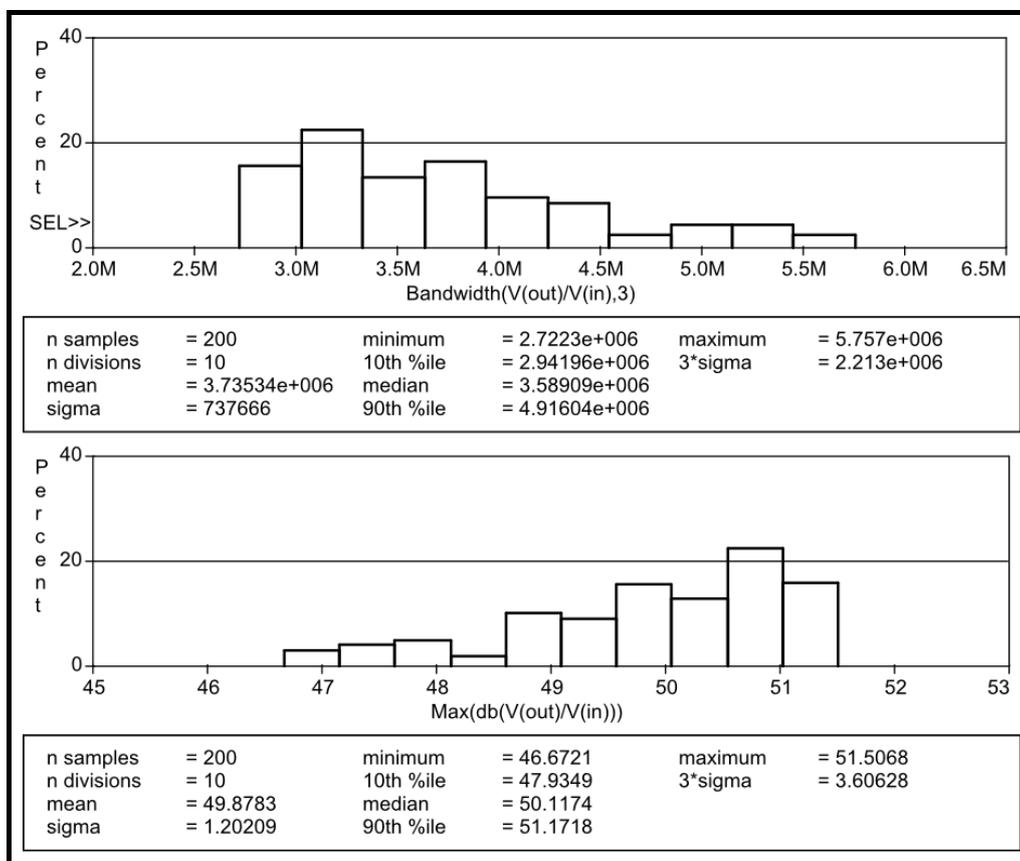


Рис. 97. Гистограммы анализа Монте-Карло

→ 14.и. Открыть выходной файл (**Output File**) найти и скопировать в заготовку отчета раздел с директивами анализа (**Analysis directives**).

Параметрическая оптимизация. Создание целевых функций для оптимизации рабочей точки

15. По выходным характеристикам транзистора, полученным в лабораторной работе №2 выбрать новую рабочую точку неизвестным заранее током базы I_{B0} (рис. 98) и зафиксировать значения напряжения $U_{KЭ0}$ и тока I_{K0} .

Значения напряжения $U_{KЭ0}$ и тока I_{K0} можно определить, трассируя график гиперболы мощности или просто наводя курсор мыши на рабочую точку.

16. Создать новый профиль моделирования.³ Выбрать тип анализа – **Time Domain**. Параметры анализа **Run to time** и **Start saving data after** задать таким образом, чтобы исключить отображение начального момента времени. Амплитуду **VAMPL** задать равной 0.

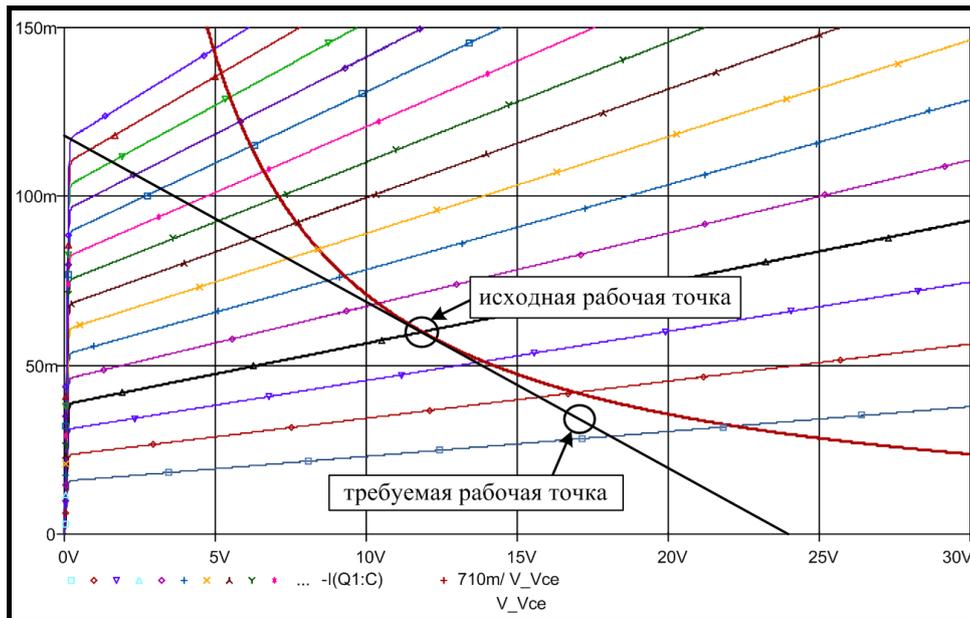


Рис. 98. Выбор новой рабочей точки с неизвестным током базы

- ↓ 17. Построить графики тока и напряжения коллектора.
- 17.а. Добавить в текущем окне еще одну систему координат (область построения).¹⁹
- 17.б. Построить график тока коллектора в одной области, а напряжения коллектора в другой (рис. 99).
- 17.в. Включить трассировку¹⁰ и поставить на построенных графиках метки¹¹ с координатами. Отредактировать метки так, чтобы отображалось только значение по оси Y (рис. 99). Режим редактирования меток запускается двойным щелчком правой клавиши мыши по метке.
- 17.г. Сохранить полученный результат в заготовке отчета.

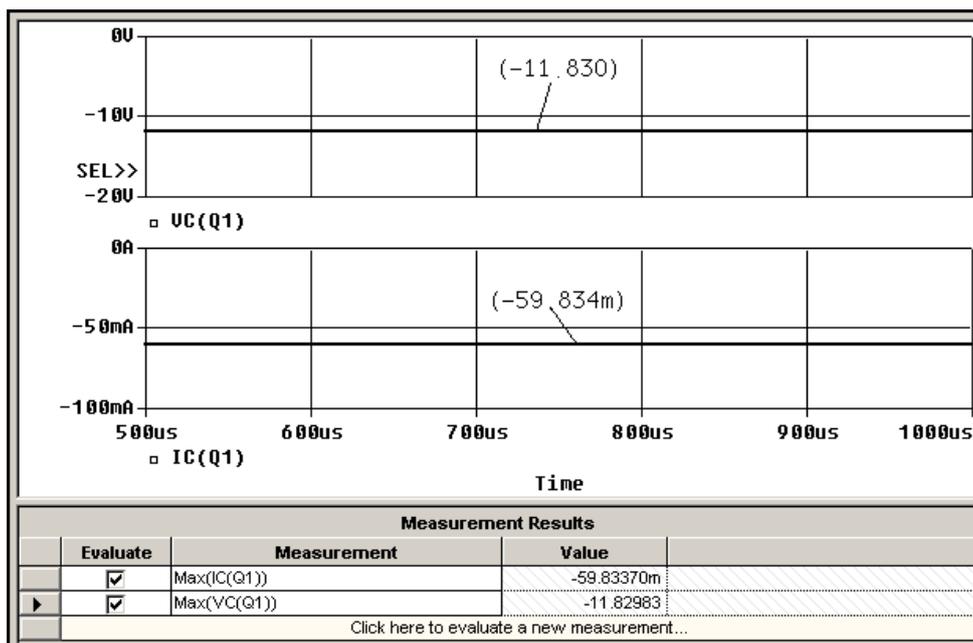


Рис. 99. Добавление области построения

18. Рассчитать целевые функции MAX для напряжения и тока коллектора, VC и IC.¹⁸

Для проведения параметрической оптимизации в OrCAD необходимо предварительно создать профиль моделирования и промоделировать схему, а также рассчитать целевые функции, по которым собственно и будет производиться оптимизация. Однако в OrCAD не предусмотрен расчет целевых функций для режима анализа по постоянному току **Bias Point** и не предусмотрено использование в качестве целевых функций просто кого-нибудь тока или напряжения, поэтому для оптимизации рабочей точки приходится идти окольными путями и производить дополнительные манипуляции.

Параметрическая оптимизация в PSpice Advanced Analysis

↓ 19. Произвести параметрическую оптимизацию для рабочей точки с параметрами определенными в п. 15.

→ 19.a. Запустить модуль PSpice Advanced Analysis (Optimizer). Команда PSpice>Advanced Analysis>Optimizer (рис. 100).

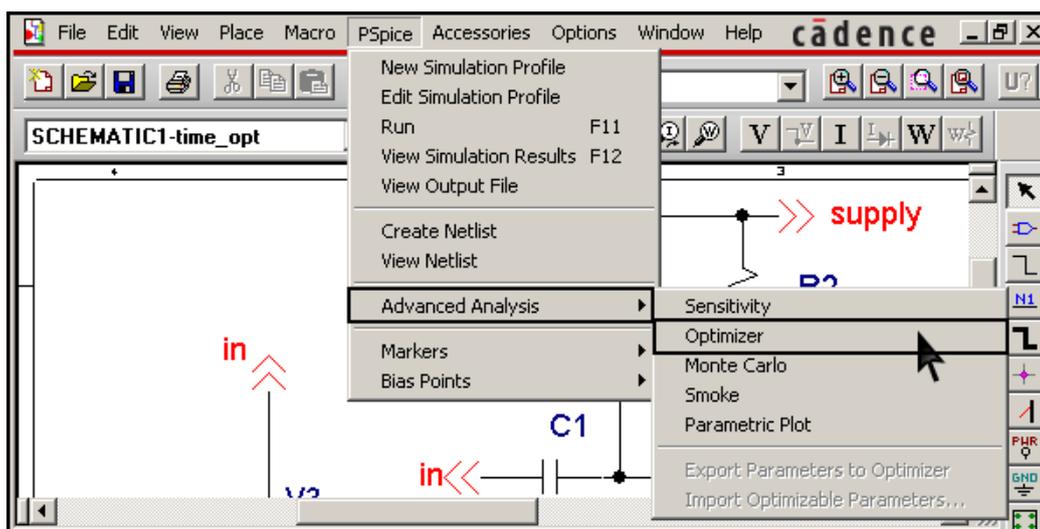


Рис. 100. Запуск модуля параметрической оптимизации PSpice Advanced Analysis

→ 19.б. В отрывшемся модуле оптимизации, щелкнуть по ячейке таблицы **Parameters** содержащей текст «Click her to import a parameters...» (рис. 101). В открывшемся окне **Parameters Selection** выбрать компоненты параметры, которых будут оптимизироваться, в нашем случае это сопротивления, задающие рабочую точку (рис. 101).

В таблице **Parameters** отобразятся исходные (**Original**), минимальные (**Min**) и максимальные (**Max**) параметры компонентов. Значения **Min** и **Max** устанавливаются диапазон, в котором будут меняться параметры, эти значения по умолчанию рассчитываются модулем оптимизации: **Min** как 10% от **Original**, а **Max** – $\text{Original} \times 10$. **Min** и **Max** можно отредактировать вручную, на основе собственной оценки.

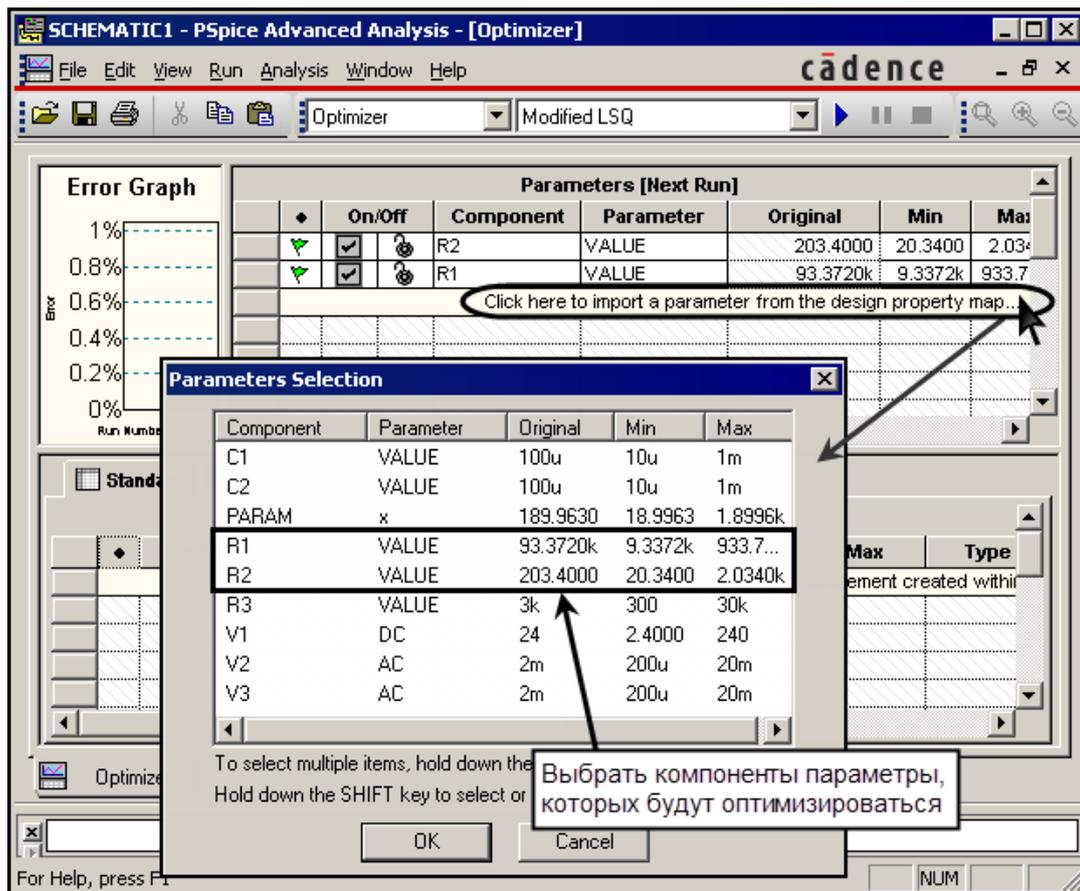


Рис. 101. PSpice Advanced Analysis. Выбор компонентов для оптимизации

→ 19.в. Щелкнуть по ячейке таблицы **Specifications** содержащей текст «Click her to import a measurements...» (рис. 102). В открывшемся окне **Import measurements** выбрать целевые функции (рис. 102).

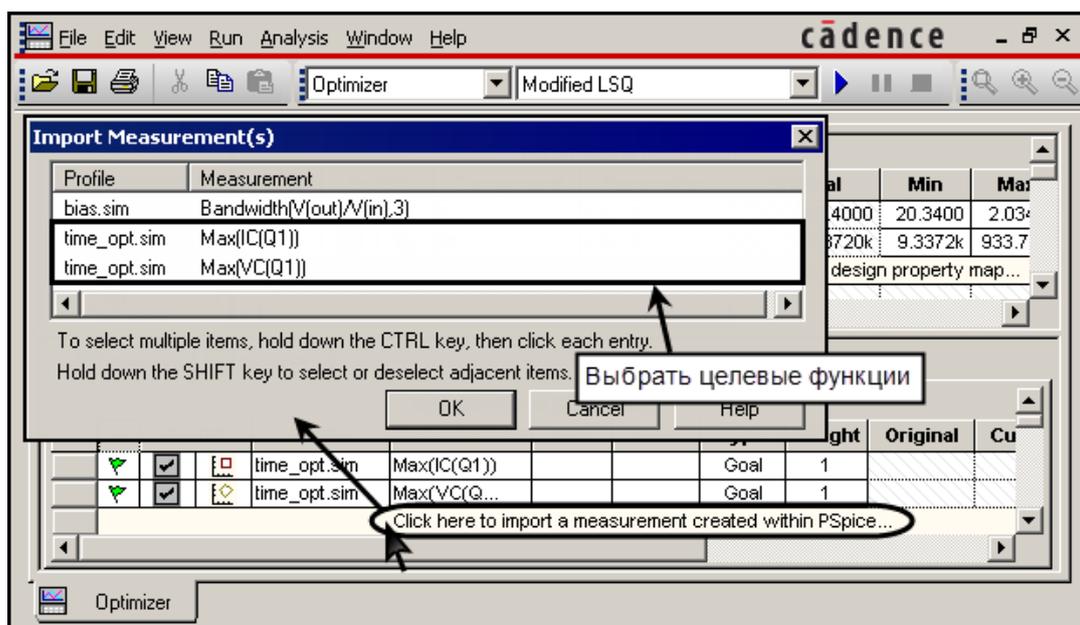


Рис. 102. Выбор целевых функций

- 19.г. В столбцах **Max** и **Min** (рис. 103) таблицы **Specifications** задать ограничения для целевых функций, так, чтобы указанный диапазон включал параметры новой рабочей точки, полученные в п. 15.
- 19.д. Запустить оптимизацию (рис. 103).

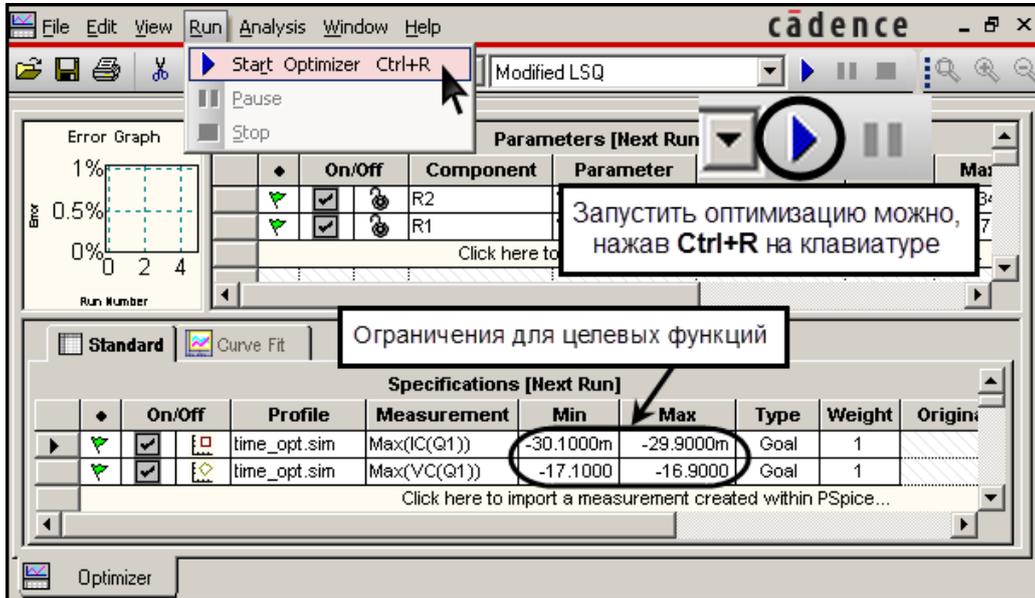


Рис. 103. Задание диапазона значений целевых функций

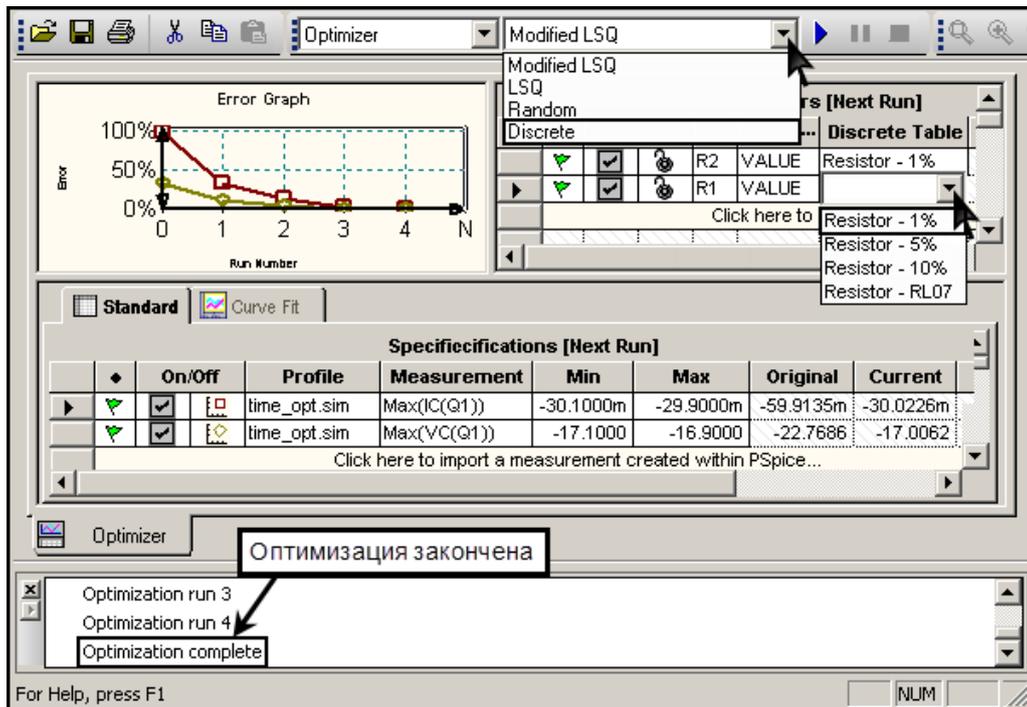


Рис. 104. Выбор и задание параметров для проведения округления значений параметров компонентов к значениям, соответствующим стандартным рядам номиналов

В показанном на рис. 103 примере, заданы диапазоны значений для рабочей точки p-n-p транзистора: $U_{KЭ0} = -17$ В, $I_{K0} = -30$ мА (рис. 103). Диапазон значений целевых функций должен быть с одной стороны узок, чтобы

полученные цифры удовлетворяли поставленной задаче, с другой стороны сужение диапазона может привести к невозможности достижения указанных значений целевых функций.

→ 19.е. По завершению оптимизации поменять метод оптимизации с **Modified Least Squares Quadratic (LSQ)** на **Discrete (рис. 104)**. Выбрать для номиналов сопротивлений 1% ряд точности (рис. 104).

Modified Least Squares Quadratic – модифицированный метод наименьших квадратов. *Discrete* (дискретный) – метод используется в конце оптимизации для округления значений параметров компонентов к значениям, соответствующим стандартным рядам номиналов.

→ 19.ж. Запустить оптимизацию (рис. 103).

→ 19.и. Сделать и сохранить в заготовке отчета скриншот окна PSpice Advanced Analysis (Optimizer).

Параметрическая оптимизация. Оценка результатов

20. В OrCAD Capture продублировать исходную схему усилительного каскада. Скопировать и перенести обычными средствами Windows новые значения сопротивлений в сдублированную схему.

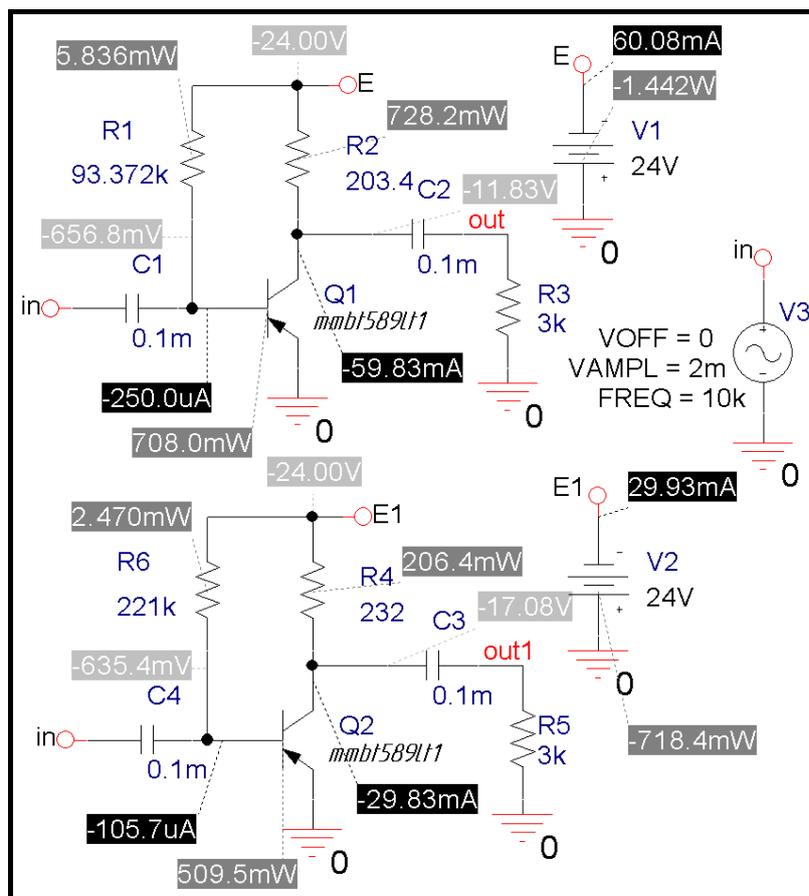


Рис. 105. Результаты анализа двух схем по постоянному току (до и после процедуры оптимизации)

21. Установить амплитуду входного сигнала V_{AMPL} равным $U_{вх}$. Произвести анализ исходной схемы и схемы с оптимизированными параметрами по постоянному току, в частотной области и во временной области, получить и сохранить в заготовке отчета соответственно: скриншот (пример см. [рис. 105](#)), АЧХ по напряжению и эпюры гармонического напряжения на выходах обеих схем. АЧХ и эпюры для двух схем построить в одной координатной сетке частот и времен соответственно (для удобства сравнения).

Обработка экспериментальных данных

Рассчитать на основе полученных данных коэффициенты чувствительности максимума АЧХ и ширины полосы пропускания к изменению параметров элементов. Определить элементы с наибольшей и наименьшей чувствительностью.

Проанализировать характеристики и полученные статистические данные. В выводах привести числовые характеристики, полученные в ходе анализа по методу Монте-Карло и расчета на наихудший случай.

Проанализировать, лежат ли значения, полученные в результате анализа по методу Монте-Карло в пределах диапазона значений полученных в расчете на наихудший случай.

Проанализировать результаты параметрической оптимизации на предмет улучшения-ухудшения характеристик усилительного каскада.

Содержание отчета

Цель работы, исходная схема, скриншоты всех используемых в работе схем выполненных в OrCAD Capture, графики всех полученных характеристик и зависимостей, гистограммы распределения, результаты расчета целевых функций, таблицы приращений и чувствительностей (см. [табл. 10](#) и [11](#)), результаты оптимизации (скриншот окна PSpice Advanced Analysis) выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое чувствительность схемы к изменениям внутренних параметров?
2. Для чего анализируют чувствительность?
3. Суть метода приращений, преимущества и недостатки.
4. Суть расчета на наихудший случай, преимущества и недостатки.
5. Суть анализа Монте-Карло, преимущества и недостатки.
6. Как в PSpice рассчитываются случайные значения параметров компонентов для анализа Монте-Карло.

7. Что называется параметрической оптимизацией?
8. Какие критерии оптимизации использовались в работе?
8. В каких режимах анализа в PSpice можно рассчитать целевые функции для параметрической оптимизации?
9. Что и как сделали, получили в лабораторной работе?
10. Как называется модуль программы OrCAD в котором выполняется параметрическая оптимизация?
11. Какие параметры задаются в OrCAD для проведения анализа на наихудший случай?
12. Какие параметры задаются в OrCAD для проведения анализа методом Монте-Карло?
13. Как в PSpice задается допуск параметра элемента?
14. Какие директивы анализа в PSpice задают расчет на наихудший случай и анализ Монте-Карло?
15. Какие проектные процедуры выполнялись в лабораторной работе?

Список литературы

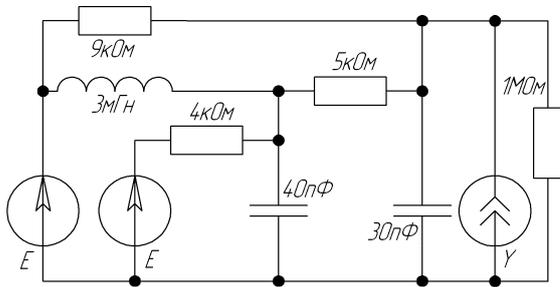
1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов / О. В. Алексеев, А. А. Головков, И. Ю. Пивоваров, Г. Г. Чавка. – М.: Высш. Шк., 2000. – 479с.
2. Автоматизация схемотехнического проектирования: учебное пособие для вузов / В. Н. Ильин, В. Т. Фролкин и др.; под ред. В. Н. Ильина. – М.: Радио и Связь, 1987. – 386 с.
3. Антипенский Р. В. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. – М.: Техносфера, 2007. – 128 с.
4. Атабеков Г. И. Основы теории цепей: учебник / Г. И. Атабеков. – 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2006. – 424 с.
5. Болотовский Ю. И. OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Практика моделирования / Ю.И. Болотовский, Г. И. Таназлы. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 208 с.
6. Болотовский Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга / Ю.И. Болотовский, Г. И. Таназлы. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 200 с.
7. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: пер. с англ. / М. Букингом. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
8. Вепринцев В. И. Основы теории цепей: учеб. пособие / В. И. Вепринцев // Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. – 205 с.
9. Влах И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. / И. Влах, К. Сингхал – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
10. Златин И. Л. Схемотехническое и системное проектирование радиоэлектронных устройств в OrCAD 10.5 / И. Л. Златин. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2008. – 352 с.
11. Калабеков Б. А. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике и связи: Учеб. пособ. для вузов /Б. А. Калабеков, В. Ю. Лапидус, В. М. Малафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
12. Кеон Дж. OrCAD Pspice. Анализ электрических цепей: пер. с англ. / Дж. Кеон. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 640 с.
13. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: учеб. для электротехн. и радиотехн. спец. вузов. / П. Н. Матханов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.
14. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов/ Ю. Ф. Опадчий, А. И. Гуров; Ред. О. П. Глудкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 768 с.
15. Павлов В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: учебник для вузов/ В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 320 с.



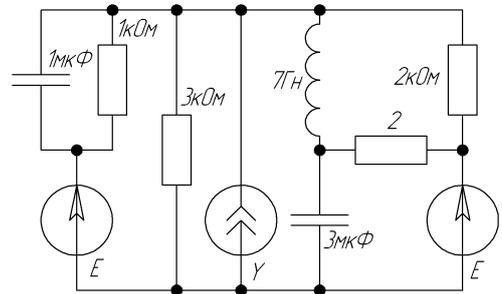
16. Петраков О. М. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов / О. М. Петраков. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 208 с.
17. Попов В. П. Основы теории цепей: учеб. для вузов/ В. П. Попов. – 4-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 575 с.
18. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПВЭМ: в 4-х выпусках / В. Д. Разевиг – М.: Радио и Связь, 1992.
19. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2 / В. Д. Разевиг. – М.: СОЛОН-Р, 2003. – 528 с.
20. Сергин Н. Н. Использование транзисторов и операционных усилителей в устройствах автомобильной электроники: метод. указ. к лаб. раб. / Н. Н. Сергин // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 51 с. – URL: http://window.edu.ru/window/library?p_rid=28724. Дата обращения 25.02.2011.
21. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Основы теории линейных цепей: учебник для электротехн. вузов. / Под ред. П. А. Ионкина. – 2-е изд перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 544 с
22. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE: пер. с нем. / Р. Хайнеман. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 336 с.
23. Электронные твердотельные приборы: конспект курса. Часть 1 / Е. И. Бочаров [и др.] // СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича – URL: <http://dvo.sut.ru/libr/eqp/i001eqp1/>. Дата обращения: 25.02.2011.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

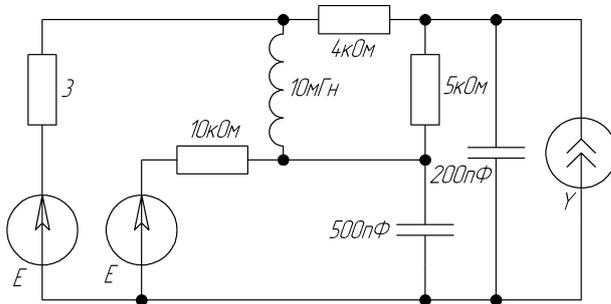
Варианты схем для выполнения лабораторной работы №1



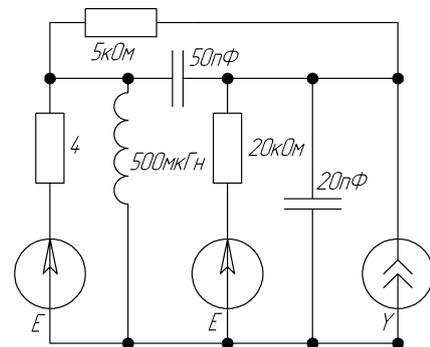
Вариант 1



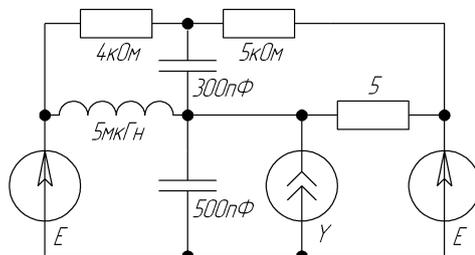
Вариант 2



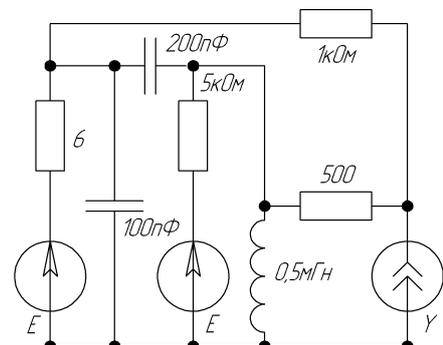
Вариант 3



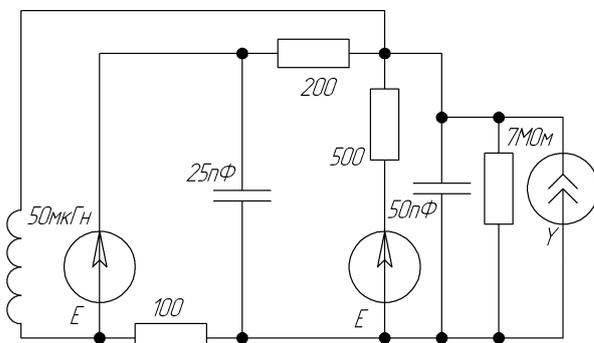
Вариант 4



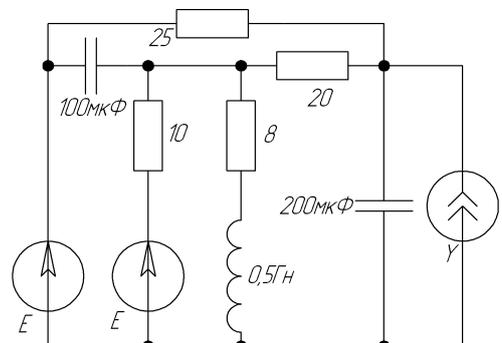
Вариант 5



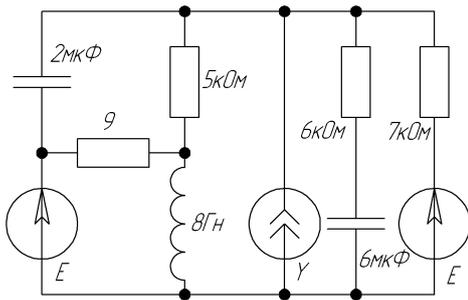
Вариант 6



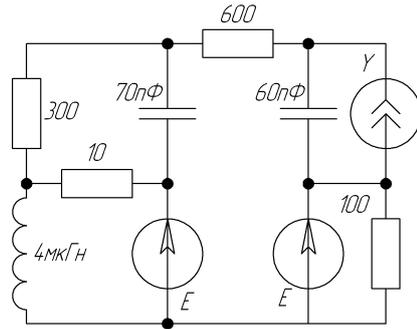
Вариант 7



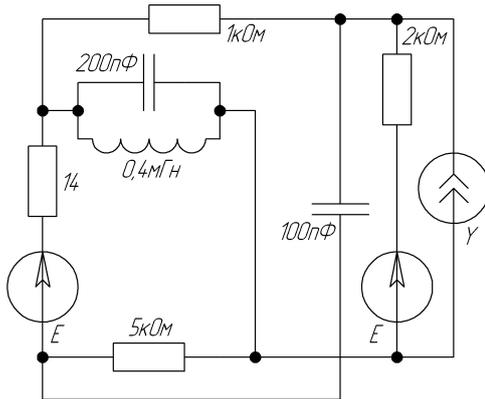
Вариант 8



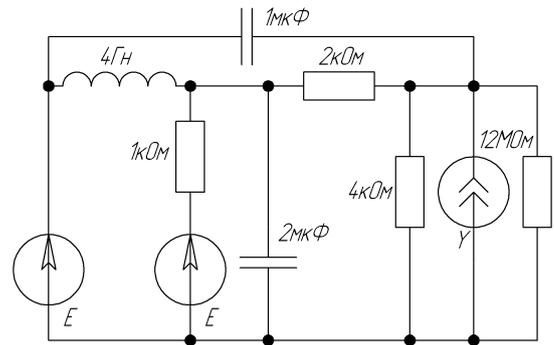
Вариант 9



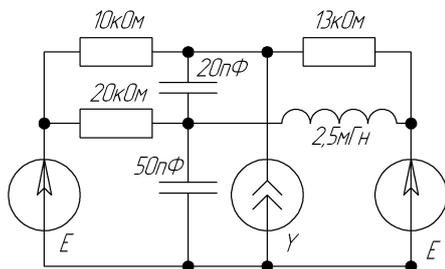
Вариант 10



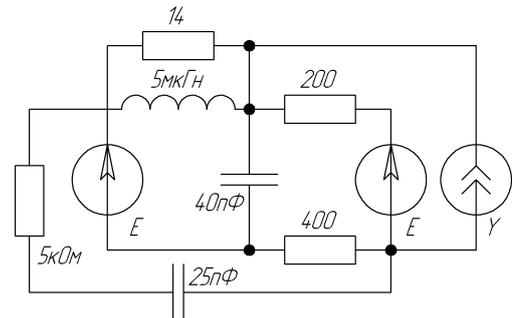
Вариант 11



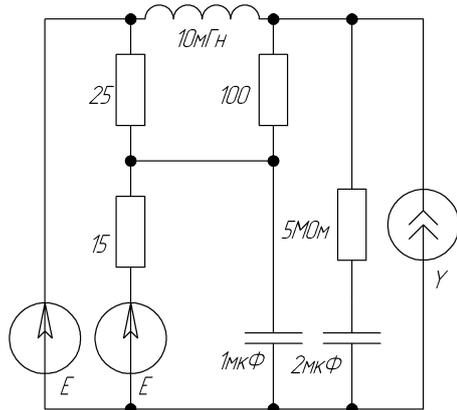
Вариант 12



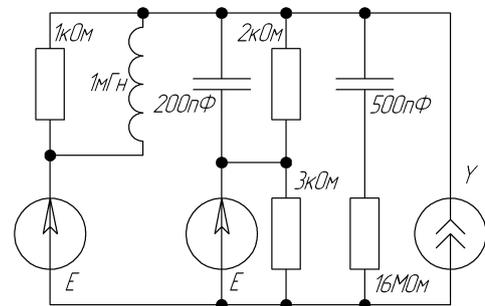
Вариант 13



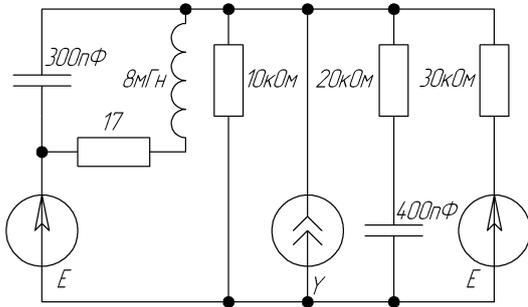
Вариант 14



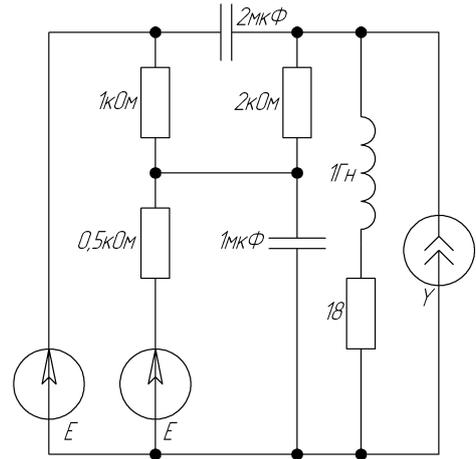
Вариант 15



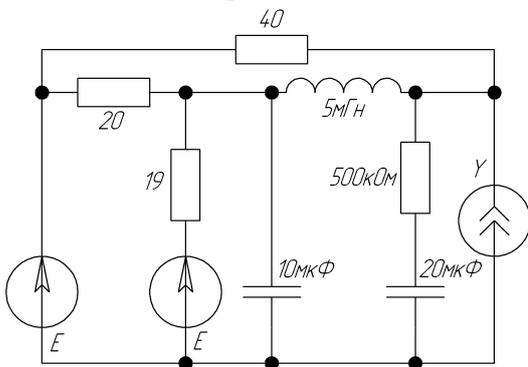
Вариант 16



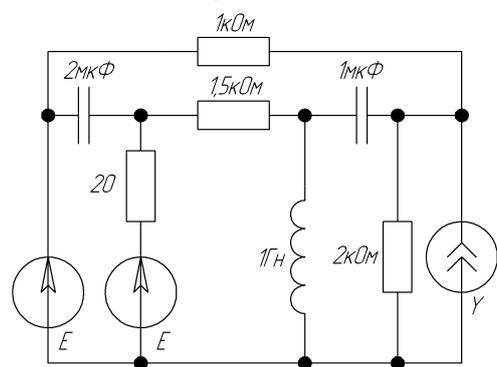
Вариант 17



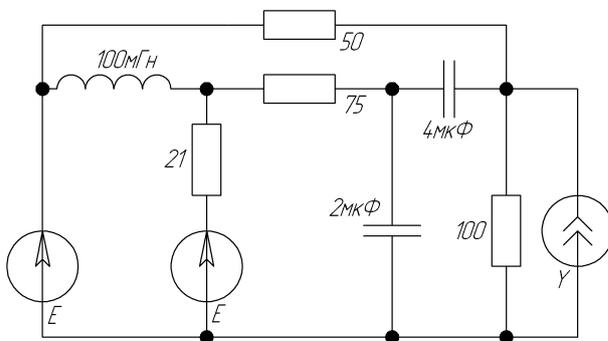
Вариант 18



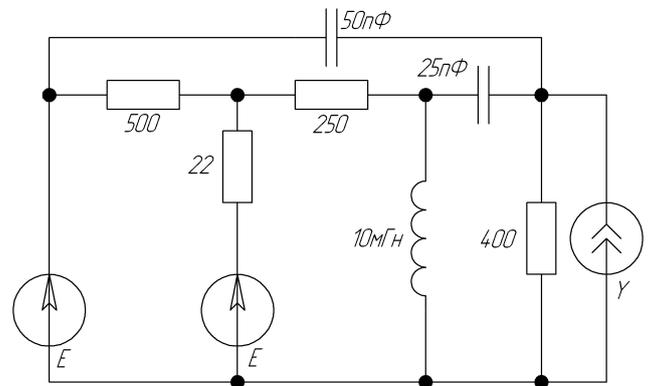
Вариант 19



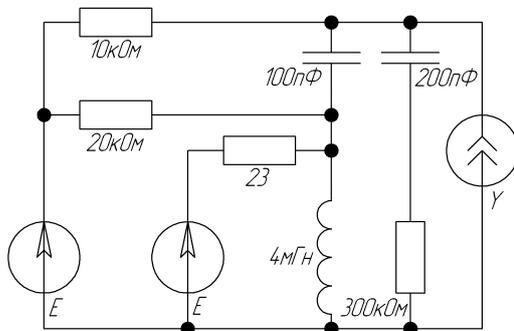
Вариант 20



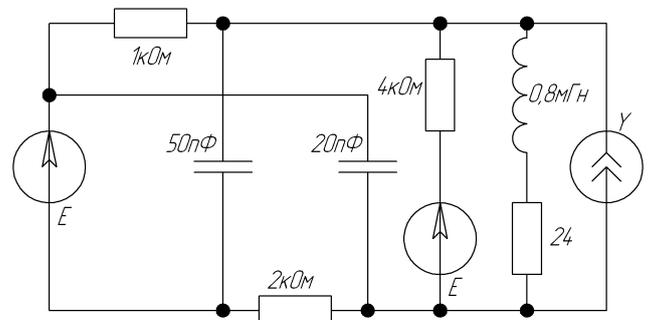
Вариант 21



Вариант 22



Вариант 23



Вариант 24

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Схема, параметры и данные для выполнения лабораторной работы №2

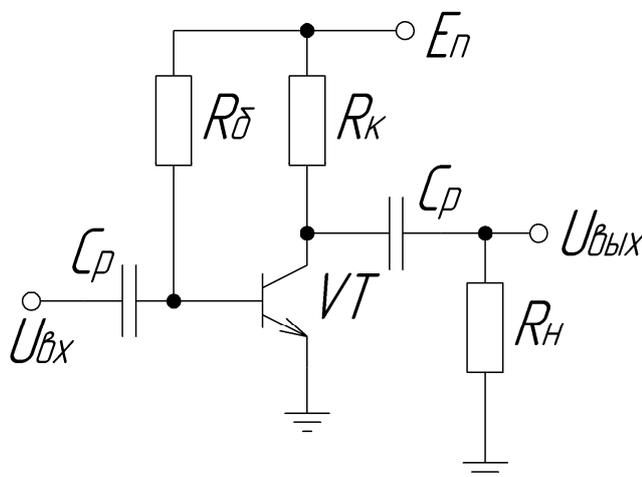


Рис. П2. Анализируемая схема

Исходные данные:

- режим работы транзистора – активный (без отсечки);
 - принимая во внимание предельно допустимые эксплуатационные данные транзистора и режим работы получить максимально возможный коэффициент передачи по мощности;
 - модель транзистора выбрать в соответствии с номером варианта по табл. П2;
 - $C_p = 100\text{мкФ}$;
 - $U_{\text{вых}}$ – максимально возможное для данного режима работы транзистора и нагрузки, $E_{\text{п}} = 80\%U_{\text{кэ max}}$;
 - $R_{\text{н}} = a(\text{кОм})$ – сопротивление нагрузки;
 - $U_{\text{вх}} = b(\text{мВ})$ – амплитуда напряжения на входе;
- где a – последняя цифра зачетки (если 0, то $a = 10$),
 b – номер варианта.

Модели транзистора

Номер варианта	Модель транзистора	Производитель
1	2PB709BRL	NXP Semiconductors
2	BC847CW	NXP Semiconductors
3	MPSW06	ON Semiconductor
4	BCP68T1	ON Semiconductor
5	MMBT3906	Diodes Incorporated
6	PMBT4401	NXP Semiconductors
7	PMBT6428	NXP Semiconductors
8	BSP16T1	ON Semiconductor
9	2SC4617	ON Semiconductor
10	2DD2652	Diodes Incorporated
11	BC807-40W	NXP Semiconductors
12	BCW33	NXP Semiconductors
13	NJT4030P	ON Semiconductor
14	NJT4031N	ON Semiconductor
15	ZXTN25012EFH	Diodes Incorporated
16	2PB709ASW	NXP Semiconductors
17	BCX70K	NXP Semiconductors
18	PZT2907AT1	ON Semiconductor
19	BCP69T1	ON Semiconductor
20	ZUMT718	Diodes Incorporated
21	BCW70	NXP Semiconductors
22	PMBT3904	NXP Semiconductors
23	PMSS3904	NXP Semiconductors
24	BCW69	NXP Semiconductors
25	ZTX449	Diodes Incorporated

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Схема, параметры и данные для выполнения лабораторной работы №3

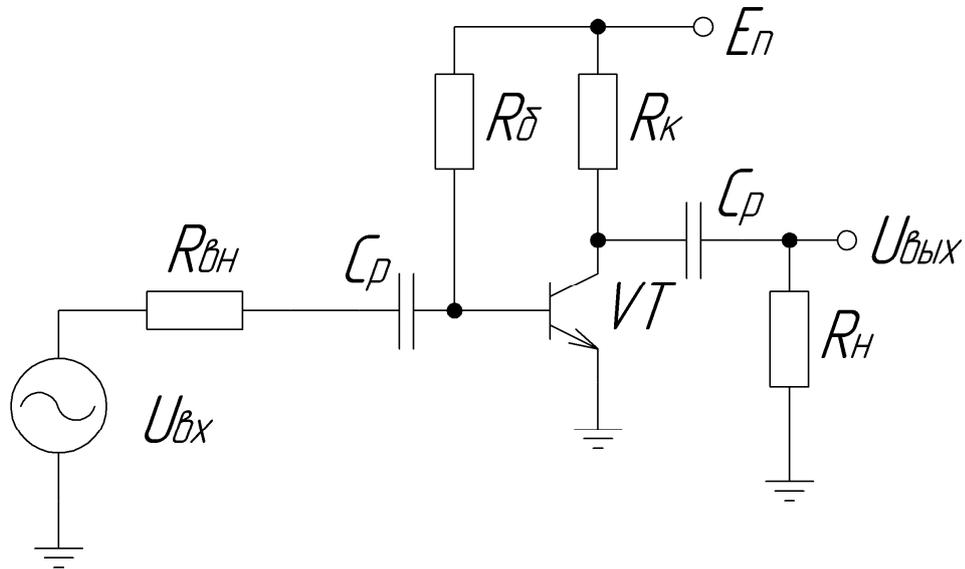


Рис. П3. Анализируемая схема

Внутреннее сопротивление источника сигнала – $R_{вн} = b \cdot 100(\text{Ом})$,
где b – номер варианта.

Остальные параметры схемы и транзистор выбрать в соответствии с [Приложением 2](#).

Примечания

- ¹ В Capture пиктограмма  или команда **PSpice>Edit Simulation Profile**.
- ² В Capture пиктограмма , **F11** на клавиатуре или команда **PSpice>Run**.
- ³ Пиктограмма  или команда **PSpice>New Simulation Profile**.
- ⁴ В PSpice A/D пиктограмма  или команда **View>Output File**.
- ⁵ Команда **Window>Copy to Clipboard**, затем вставить в MO Word
- ⁶ Команда **Plot>Axis Settings** или двойной щелчок по оси.
- ⁷ Пиктограмма , **Insert** на клавиатуре или команда **Trace>Add Trace....**
- ⁸ В PSpice A/D пиктограмма  или команда **Simulation>Edit Profile....**
- ⁹ В PSpice A/D пиктограмма  или команда **Simulation>Run**.
- ¹⁰ Пиктограмма  или команда **Trace>Cursor>Display**.
- ¹¹ Пиктограмма  или команда **Plot>Label>Mark**.
- ¹² Пиктограмма  , **N** на клавиатуре или команда **Place>Net Alias....**
- ¹³ Пиктограммы , ,  или команда **PSpice>Bias Point>....**
- ¹⁴ В PSpice A/D команда **Window>New Window**.
- ¹⁵ Команда **Plot>Add Y Axis** или **Ctrl+Y** на клавиатуре.
- ¹⁶ Пиктограмма  или через окно **Axis Settings**.
- ¹⁷ Пиктограмма  или команда **Trace>Performance Analysis**.
- ¹⁸ Пиктограмма  или команда **Trace>Evaluate Measurement**.
- ¹⁹ Команда **Plot>Add Plot To Window**.