

В.А. Алехин

OrCAD 17.2

Анализ и проектирование электронных устройств

Часть 1. Моделирование аналоговых устройств

Учебное пособие для вузов

Основы работы в Orcad. Цепи постоянного и переменного тока. Переходные процессы. Метод Монте-Карло.

Поведенческие модели. Линии передачи.

Москва 2018

Выходные данные

УДК 004.94

ББК ???

Алехин В.А.

А49 OrCAD 17.2. Анализ и проектирование электронных устройств. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. - с.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор М.Л. Белов, доктор технических наук, доцент Д.А. Перепёлкин

Изложены вопросы анализа и схемотехнического проектирования электронных устройств в системе автоматизированного проектирования OrCAD 17.2 компании Cadence. Это одна из лучших программ сквозного проектирования электронной аппаратуры, представляющая дизайнерам широкие возможности разработки и моделирования электронных схем и создания печатных плат

Подробно рассмотрено моделирование разнообразных электронных схем в бесплатной учебной программе схемотехнического графического редактора проектов OrCAD Capture Lite, предназначенного для создания принципиальных схем и моделирования в программе PSpice 17.2. Изучаются основные методы работы в OrCAD 17.2: создание проектов, режимы моделирования цепей постоянного и переменного тока, переходных процессов, длинных линий, многовариантный анализ, анализ методом Монте-Карло, температурный анализ, анализ шумов, аналоговые поведенческие модели, моделирование цифровых и смешанных схем, создание иерархических проектов.

Рассмотрены вопросы подготовки схем для этапа проектирования печатных плат, приведены примеры ручной маршрутизации в редакторе печатных плат OrCAD PCB Editor и автоматической маршрутизации в OrCAD PCB Router.

Книга написана на основе технической документации компании Cadence и может служить руководством пользователя при работе с последними версиями программы OrCAD (OrCAD 16 и OrCAD 17). Материалы книги использовались в учебном процессе в МИРЭА – Российский технологический университет.

Для студентов, обучающихся по направлению 09.04.01 - «Информатика и вычислительная техника», будет полезно студентам других направлений, изучающих технологии проектирования вычислительных устройств и электронной аппаратуры средствами САПР. Может быть полезно инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области разработки и конструирования электронной аппаратуры.

ББК: ???

Адрес издательства в Интернете WWW.TECHBOOK.RU

© В.А. Алехин, 2018

© Издательство «Горячая линия-Телеком», 2018

Оглавление

Введение	11
Глава 1. Начало работы в OrCAD 17.2	14
1.1. Системные требования	14
1.2. Что такое Spice – модели электронных компонентов	14
1.3. Установка пакета OrCAD 17.2 Lite	15
1.4. Структура и состав пакета программ OrCAD 17.2 Lite	17
1.5. Состав программ OrCAD PSpice	18
1.6. Ограничения в учебных программах OrCAD 17.2 Lite	19
1.7. Процесс моделирования в OrCAD	21
1.8. Создание первого проекта	24
1.9. Поведение менеджера проекта	30
1.10. В чем разница между понятиями <i>a part</i> и <i>a symbol</i>	31
1.11. Создаем первую схему из символов	32
1.12. Моделирование первой схемы	36
1.13. Окно команд TLC	42
1.14. Редактор схем и компонентов	43
1.14.1. Редактор схемных страниц	43
1.14.2. Редакторы схем и компонентов	44
1.15. Панели инструментов Capture	50
1.16. Поиск в режиме Capture	54
1.17. Диалоговое окно «Настройки»	56
1.18. Справочная документация OrCAD	58
1.19. Контрольные вопросы	59
Глава 2. Анализ электрических цепей постоянного тока	60
2.1. Краткие теоретические сведения	60
2.1.1. Элементы, структура и основные законы электрических цепей	60
2.1.2. Основные законы электрических цепей	62
2.1.3. Расчет цепи методом контурных токов (МКТ)	63
2.2. Расчетное задание №2.1.	63

2.3. Компьютерное моделирование задания №2.1	64
2.4. Делитель напряжения	67
2.5. Делитель токов	68
2.6. Метод эквивалентного генератора.	68
2.6.1. Расчетное задание №2.2	69
2.6.2. Компьютерное моделирование задания №2.2	69
2.6.3. Баланс мощности	70
2.7. Согласование нагрузки с генератором. Развертка параметров.	71
2.7.1. Параметрический анализ мощности при изменении значения резистора	72
2.7.2. Использование курсоров	77
2.7.3. Развертка двух параметров	78
2.8. Выходные характеристики биполярного транзистора	79
2.9. Анализ и отображение режима постоянного тока (Bias Point)	85
2.9.1. Сохранение режимов постоянного тока	87
2.9.2. Загрузка сохраненного режима постоянного тока	89
2.10. Контрольные вопросы	91
Глава 3. Анализ на переменном токе	92
3.1. Краткое теоретическое введение	92
3.1.1. Символический метод расчета	92
3.1.2. Мощность в цепи гармонического тока	93
3.1.3. Расчет цепи методом двух узлов	94
3.2. Расчетное задание	95
3.3. Компьютерное моделирование по заданию 3.2	95
3.3.1. Схема моделирования	97
3.3.2. Использование двух курсоров	99
3.4. Активный заграждающий фильтр	101
3.4.1. Моделирование активного заграждающего фильтра	103
3.4.2. Добавление и изменение графиков	106
3.5. Многовариантный анализ активного фильтра	110
3.5.1. Изменение величины резисторов	110
3.5.2. Изменение установки потенциометра обратной связи.	115

3.6. Контрольные вопросы	119
Глава 4. Анализ методом Монте-Карло	120
4.1. Принципы метода Monte Carlo	120
4.3. Исследование влияния точности двух видов компонентов	125
4.4. Повторное использование значений случайных параметров	126
4.5. Создание гистограмм	128
4.6. Контрольные вопросы	129
Глава 5. Анализ наихудшего случая	130
5.1. Функции сравнения для наихудшего случая	130
5.2. Анализ смещения частоты режекции в заграждающем фильтре	130
5.3. Оптимизация схемы по результатам анализа худшего случая	136
5.4. Контрольные вопросы	138
Глава 6. Электрические цепи с магнитной связью	140
6.1. Краткие теоретические сведения и расчет простых неразветвленных цепей	140
6.3. Связанные колебательные контуры	144
6.4. Нелинейные трансформаторы с магнитными сердечниками	147
6.5. Экспериментальное определение гистерезисной кривой	151
6.6. Типовые трансформаторы	152
6.7. Контрольные вопросы	153
Глава 7. Редактор стимулов	154
7.1. Ввод и редактирование стимулов	154
7.2. Стимулы для переходных процессов	155
7.2.1. Экспоненциальные источники	155
7.2.2. Профили моделирования	159
7.2.3. Импульсные источники	161
7.2.4. Синусоидальные сигналы	162
7.2.5. Простая частотная модуляция (SFFM)	163
7.2.6. Кусочно-линейная аппроксимация	165
7.3. Контрольные вопросы	166
Глава 8. Анализ переходных процессов	167
8.1. Краткое теоретическое введение	167

8.1.1. Классический метод расчета переходных процессов	168
8.2. Моделирование переходных процессов	173
8.3. Профиль моделирования переходных процессов	173
8.4. Планирование	177
8.5. Контрольные точки	178
8.6. Формирования временных зависимостей стимула напряжения с использованием текстовых файлов	182
8.6.1. Кусочно-линейные стимулы с однократным повторением	182
8.6.2. Текстовые стимулы с повторением	183
8.7. Контрольные вопросы	187
Глава 9. Проблемы сходимости и сообщения об ошибках	188
Глава 10. Анализ технических характеристик	189
10.1. Измерение времени фронта в RC - цепи	189
10.2. Зависимость времени нарастания от параметров цепи	192
10.3. Контрольные вопросы	195
Глава 11. Линии передачи	197
11.1. Определение линии с распределенными параметрами	197
11.2. Вывод телеграфных уравнений линии с потерями	197
11.3. Уравнения линии для гармонического сигнала.	198
Характеристические параметры линии	198
11.4. Падающие и отраженные волны	199
11.5. Входное сопротивление линии	199
11.6. Уравнения линии без потерь	200
11.7. Режимы работы линии без потерь	200
11.8. Исследование линий передачи в OrCAD-17.2	200
11.8.1. Идеальная линия передачи без потерь	201
11.8.2. Линии с потерями	202
11.9. Примеры моделирования линии без потерь	203
11.9.1. Согласованная линия без потерь	203
11.9.2. Короткозамкнутая линия без потерь	205
11.9.3. Разомкнутая линия без потерь	206
11.9.4. Режим смешанных волн в линии без потерь	207

Рис. 11.7. Режим смешанных волн	207
11.10. Исследование формы волны в линии без потерь	207
11.11. Контрольные вопросы	212
Глава 12. Аналоговые поведенческие модели	213
12.1. Обзор аналогового поведенческого моделирования	213
12.2. Размещение и спецификация компонентов АВМ	215
12.2.1. Имена цепи и имена устройств в выражениях АВМ	215
12.2.2. Необходимость использования глобального определения	216
12.3. Пример удвоителя напряжения	216
12.4. Пример компаратора	217
12.5. Пример умножителя	218
12.6. Пример фильтра нижних частот	219
12.7. Контрольные вопросы	220
Глава 13. Анализ шума	221
13.1. Виды шумов:	221
13.2. Пример исследования шума в транзисторном усилителе	223
13.2.1. Настройка и анализ шума	224
13.3. Контрольные вопросы	230
Глава 14. Температурный анализ	231
14.1. Температурные коэффициенты	231
14.2. Запуск анализа температуры	232
Пример 14.1: Влияние температуры на ВАХ диода	232
14.3. Контрольные вопросы	234
Глава 15. Редактирование и создание PSpice модели	235
15.1. Редактирования параметров PSpice модели	235
15.2. Создание PSpice модели нового компонента	237
15.3. Контрольные вопросы	244
Глава 16. Цифровое моделирование	245
16.1. Модели цифровых устройств	245
16.1.2. Функциональное поведение	245
16.2. Цифровые цепи	248
16.2.1. Моделирование цифрового счетчика	249

16.2.2. Профиль цифрового моделирования	250
16.2.3. Отображение цифровых сигналов	251
16.3. Контрольные вопросы	253
Глава 17. Смешанное моделирование	254
17.1. Исследование аналогового компаратора с цифровым выходом	254
17.2. Исследование цифро-аналогового преобразователя	256
17.3. Контрольные вопросы	259
Глава 18. Создание иерархических проектов	261
18.1. Создание иерархического проекта	261
18.1.2. Создание плоского проекта полусумматора HalfAdd	262
18.1.3. Иерархические порты и off-page разъемы	263
18.1.4. Создание иерархического проекта Full Adder	265
18.1.5. Восходящий метод	266
18.1.6. Создание схемы полного сумматора	266
18.1.7. Добавление в проект аналоговых компонентов	271
18.1.8. Создание и сохранение компонентов для новых проектов	272
18.1.9. Нисходящий метод	274
18.2. Перемещение по иерархической конструкции	280
18.3. Моделирование полного сумматора	280
18.4. Контрольные вопросы	283
Глава 19. Испытательные стенды	284
19.1. Использование частичного моделирования проекта	284
19.2. Работа с тестовым стендом	286
19.2.1. Создание тестового стенда	287
19.2.2. Активация компонентов	288
19.3. Сравнение и обновление основного проекта	290
19.4. Контрольные вопросы	292
Глава 20. Обработка схемы	293
20.1. Добавление ссылок для компонентов	293
20.2. Создание отчёта перекрёстных ссылок	296
20.3. Создание списка материалов	298
20.4. Добавление специфических свойств редактора PCB	300

20.5. Проверка правил проектирования	301
20.6. Контрольные вопросы	305
Глава 21. Проектирование печатных плат с использованием OrCAD PCB Editor	306
21.1. Обзор	306
21.2. Подготовка в Capture	307
21.2.1. Создание списка соединений для редактора печатных плат	307
21.3. Начало работы в PCB Editor	311
21.4. Создание печатной платы	313
21.4.1. Создание контура платы	313
21.4.2. Добавление монтажных отверстий	318
21.5. Размещение компонентов	322
21.5.1. Выбор компонентов с помощью RefDes	322
21.5.2. Поиск компонентов на плате	327
21.5.3. Проверка правил разработки	330
21.6. Использование категории DataTip	331
21.7. Выделение области	333
21.8. Выбор элементов дизайна с помощью Superfilter	334
21.9. Общие параметры на всплывающих меню	336
21.10. Описание режима привязки	337
21.11. Использование панели окна WorldView	338
21.12. Маршрутизация	340
21.12.1. Руководство по маршрутизации	340
21.12.2. Ручная маршрутизация цепей VCC и GND.	340
21.12.3. Маршрутизация остальных сетей вручную	344
21.13. Автоматическая маршрутизация с помощью PCB Editor	347
21.14. Автоматическая маршрутизация с помощью OrCAD PCB Router	348
21.15. Пост-обработка	352
21.15.1. Переименование компонентов вручную	352
21.15.2. Автоматическое переименование компонентов	353
21.15.3. Обратное аннотирование	354
21.16. Кросс-зондирование и кросс-выделение между редактором	357

печатных плат и Capture	357
21.17. Генерация вывода	359
21.18. Выходные файлы	359
21.19. Отчеты	363
21.20. Резюме	363
21.21. Контрольные вопросы	363
Библиография	365

Введение

В настоящее время активно обсуждаются концепции реализации «Четвёртой промышленной революции», названной Индустрия 4.0. Её предпосылкой считают возникновение возможности объединять, импортировать в облако все отдельные процессы и вычисления в изолированных системах, выполняемые не только большими вычислительными машинами, но и персональными устройствами. Это означает, что рабочий процесс, содержание и управление, как отдельной машиной, так и сериями машин, сможет выполняться удалённо. Такая организация управления системами позволит значительно сократить человеческие ресурсы, необходимые для обслуживания предприятия. Индустрия 4.0 будет использовать два концептуальных решения: облачные вычисления и интернет вещей (Internet of Things - IoT). Первое заключается в размещении в Интернете информации и позволяет осуществлять удалённый доступ к приложениям, службам и сохранённым данным. Интернет вещей основывается на этой же концепции, используя облако для хранения и автоматизации процессов в объектах, которые синхронизируются с Интернетом, таких как автомобили с поддержкой Интернета, удалённое домашнее освещение, различная носимая электроника, медицинская техника.

Составлен список из 30 технологий и технических достижений, без которых вообще невозможна Индустрия 4.0. Это список включает, в частности, мобильные устройства, облачные вычисления, платформы интернета вещей, когнитивную робототехнику, системы автоматизированного проектирования, мехатронику, высокоточные приборы, сверхчувствительные сенсоры, интеллектуальные датчики, микроэлектромеханические системы (MEMS), анализ больших данных так далее.

На следующем этапе развития к интернету вещей будут относить: умный транспорт и беспилотники, умный город, умные рабочие места, умные электросети, умные заводы, точное земледелие, умные скважины и многое другое.

Интеграция информационных технологий и концепций, активно развивающихся в XXI веке, создаёт предпосылки к формированию локальных и даже национальных кибер-физических систем.

Кибер-физические системы (Cyber-Physical System, CPS) — это системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, позволяющих представить такое образование как единое целое. В CPS обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами. Компьютеры осуществляют мониторинг и управление физическими процессами с использованием такой петли обратной связи, где происходящее в физических системах оказывает влияние на вычисления и наоборот. Причём, управление кибер-физическими системами будет основываться на предварительном компьютерном моделировании процессов в них.

Вполне очевидно, что Интернет вещей и Индустрия 4.0 могут быть реализованы только на самом современном электронном оборудовании и выпускни-

ки вузов должны владеть средствами автоматизированного проектирования электронных систем.

Современные тенденции развития электроники заключается в применении встраиваемых систем на основе систем на кристалле (System-on-Chip (SoC)) или (СБИС СнК). Такие SoC - решения обычно состоят из встроенного процессора (процессоров), встроенных памяти, аппаратных ускорителей, высокоскоростных коммуникационных интерфейсов и реконфигурируемой логики. Вследствие этого разработки таких радиоэлектронных систем становятся все более сложными, поскольку они предъявляют более жёсткие требования к низкой стоимости, более высокой производительности, качеству продукции, безопасности. Разработчики используют сложные современные программные средства автоматизированного проектирования электронных систем, созданные известными компаниями США: Synopsys,

Mentor Graphics, Cadence, Altera и др. Освоение и применение этих программных сред требует многолетней упорной работы научно-производственных групп и коллективов.

В учебных планах вузов знакомство с отдельными программами названных выше компаний предусмотрено в дисциплинах по технологиям проектирования электронных устройств и систем средствами САПР.

В этом учебном пособии мы изучаем систему автоматизированного проектирования OrCAD 17.2 компании Cadence. Это одна из лучших программ сквозного проектирования электронной аппаратуры, предоставляющая дизайнерам широкие возможности разработки и моделирования электронных схем и создания печатных плат. Первые книги по OrCAD в России были написаны В.Д. Разевигом, однокурсником и хорошим знакомым автора данного учебного пособия [9]. Примерно в то же время в переводе в России была опубликована книга Джона Коена [10]. Причём, в ранних версиях OrCAD отсутствовал графический интерфейс пользователя (Graphical User Interface - GUI), и схему цепи требовалось программировать на языке PSpice. Это существенно замедляло процесс обучения и исследования.

Последние версии OrCAD (16.6, 17.2) имеют всё необходимое для выполнения различных этапов процесса разработки: входное проектирование, функциональное моделирование, синтез, размещение, маршрутизация, моделирование задержек, генерация элемента. Основным недостатком OrCAD является высокая стоимость профессиональных версий. Однако, компания Cadence предлагает бесплатные облегченные учебные версии программы OrCAD Capture CIS Lite, которые мы используем в нашем учебном пособии.

Изучив основы схемотехнического проектирования в учебной программе OrCAD 17.2 Lite, вы сможете в будущем успешно работать и в полных версиях.

При создании этой книги были использованы многочисленные материалы и техническая документация, которые автору удалось найти в Интернете. Компания Cadence заинтересована в привлечении разработчиков к своей продукции и публикует подробные руководства и видеоуроки по OrCAD. Мы будем изу-

чать OrCAD на примерах моделирования аналоговых электрических цепей и электронных схем, цифровых и смешанных (аналогово-цифровых) схем, начиная с простейших цепей постоянного тока. Это позволит читателям восполнить или приобрести знания по электротехнике, электронике и цифровой технике. В последних главах вы познакомитесь с основами проектирования печатных плат.

Материалы этой книги успешно использовались в Российском технологическом университета – МИРЭА при изучении студентами дисциплины «Технологии проектирования устройств и систем вычислительной техники средствами САПР».

Итак, мы приступаем к изучению OrCAD 17.2 !

Желаю успехов !

Доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники
Российского технологического университета – МИРЭА

В.А. Алехин

Глава 1. Начало работы в OrCAD 17.2

В этой главе содержится информация о загрузке и установке нового PSpice OrCAD 17.2 Lite, первые шаги, которые вы должны выполнить, чтобы создать и смоделировать проект.

1.1. Системные требования

Для установки OrCAD 17.2 и работы с этой программой ваше оборудование должно соответствовать следующим требованиям:

- Операционная система:

Windows 7 Professional, Enterprise, Ultimate или Home Premium (64-разрядная версия)

Windows 8 (64-разрядная версия), (все пакеты обновления)

Windows 10 (64-разрядная версия)

Windows Server 2008 R2 R2

Windows 2012 Server (все пакеты обновления)

- Рекомендуемое программное обеспечение:

Microsoft Internet Explorer 11.0 или новее

- Минимальное оборудование

4 ГБ физической памяти

10 ГБ дискового пространства

Виртуальная память должна быть как минимум вдвое больше доступной физической памяти

Разрешение экрана 1024 x 768 для истинного цвета (16-битный цвет)

- Рекомендуемое оборудование:

Intel 4-го поколения Core или AMD Kaveri

4 ГБ физической памяти

10 ГБ свободного места на диске

Разрешение экрана 1280 x 1024 с истинным цветом (не менее 32-битного цвета)

Рекомендуется использовать выделенную графическую карту.

1.2. Что такое Spice – модели электронных компонентов

Реальные электронные устройства в настоящее время разрабатывают с использованием компьютерных программ сквозного проектирования, в которых электронные компоненты моделируются Spice – моделями.

Первая версия программы Spice (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) в переводе означает «Программа моделирования, предназначенная для интегральных схем» была разработана в середине 70-х годов прошлого века в Калифорнийском университете США. Она позволяла анализировать линейные и нелинейные цепи во временной и частотной области, рассчитывать частотные характеристики линейных цепей. Для анализа линейных цепей использовался метод узловых потенциалов. Библиотека моделей включала модели диода и биполярного транзистора. С течением времени программа совершенствовалась, расширялся список моделей компонентов. В 1984 году корпорация MicroSim представила программу Spice для персональных компьютеров, назвав её PSpice. В начале 90-х годов были созданы версии, позволяющие моделировать не только аналоговые, но и смешанные аналого-цифровые устройства. Программа получила удобный интерфейс, обеспечивающий графический ввод схем.

PSpice широко применяется в промышленности, позволяя исследовать работу схем без создания реальных макетов в лаборатории. При этом достигается существенная экономия материалов и рабочего времени. Если проект требует изменений или улучшений, результаты легко могут быть получены на компьютере при изменении исходных условий. Разработчик просто заменяет компоненты, которые обычно используются в реальных цепях, и после этого снова исследует работу и электрические свойства устройства. Обычно трудно бывает предсказать, сколько таких компонентов должно быть заменено. Когда же этим занимается компьютерная программа, она производит утомительные вычисления с меньшей вероятностью ошибок и намного быстрее, чем человек.

В последние годы несколько компаний разработали на основе программы PSpice новые программные продукты - OrCAD, TINA, Proteus и др. В этих программах также используются стандартные Spice – модели электронных компонентов. Причём, в разработке Spice – моделей участвуют ведущие производители электронных компонентов: Analog Devices, Burr-Brown, Motorola, National Semiconductor, Texas Instruments, Zetex и многие другие

1.3. Установка пакета OrCAD 17.2 Lite

Загрузить бесплатную программу OrCAD 17.2 Lite можно с сайта www.orcad.com.

На вкладке Overview найдите вкладку Try OrCAD for Free , а на ней откройте вкладку Download OrCAD 17.2 Lite Now (рис. 1.1).

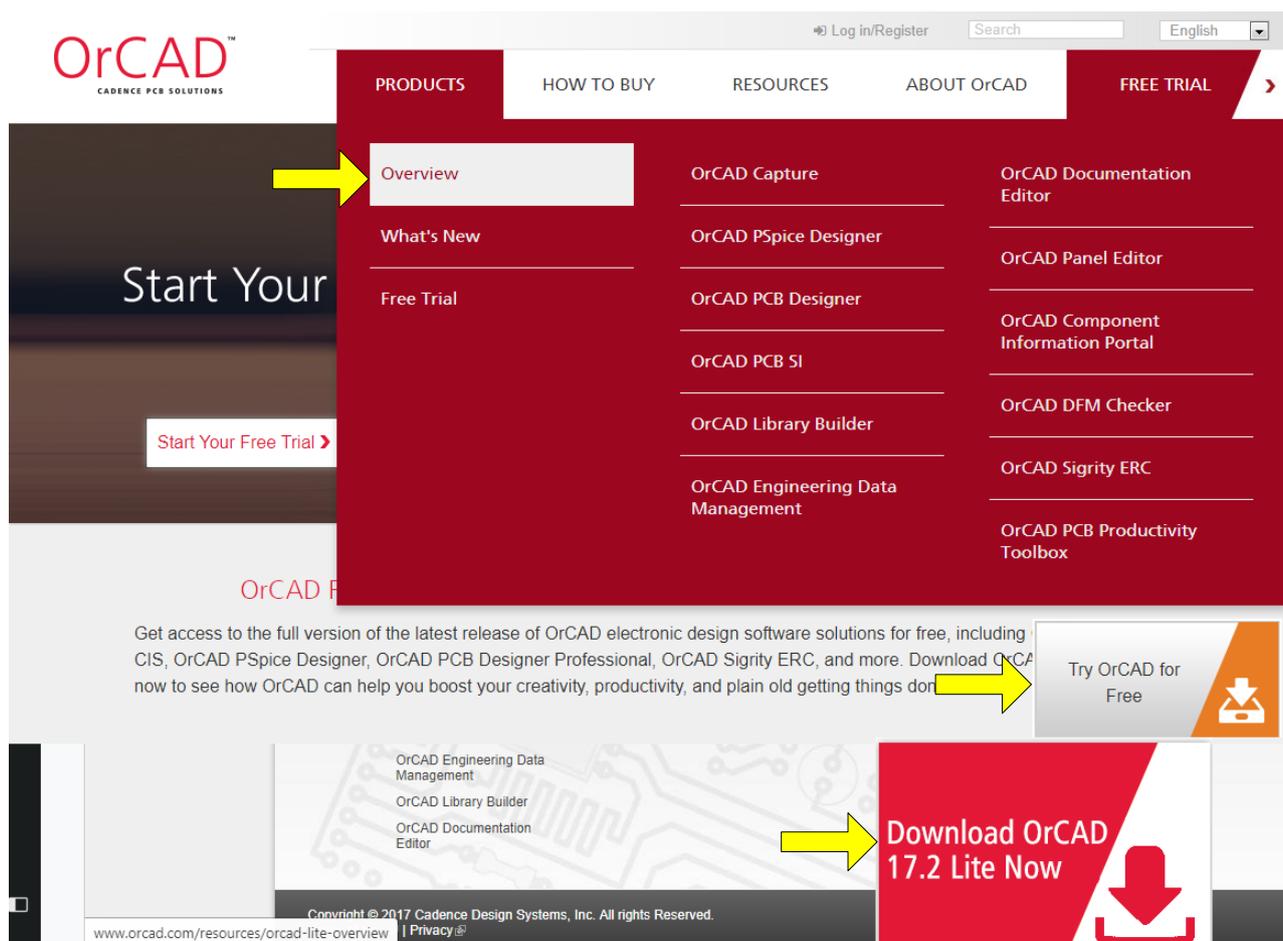


Рис. 1.1. Загрузка программы OrCAD 17.2 Lite

Заполните и отошлите запрос на загрузку программы и Cadence даст Вам такую возможность. Важно отметить, что эта учебная программа работает без ограничения по времени и с её помощью можно изучить очень многое.

После того, как вы загрузили программное обеспечение, разархивируйте его и нажмите Setup (Приложение) или 17.2-2016-OrCAD-PSpice-Designer-Lite.exe. После этого выполняйте рекомендуемые инструкцией шаги для успешного завершения установки:

выберите установку приложения для всех пользователей этого компьютера;

выберите директорию, в которую вы хотите установить программу или директорию будет назначена по умолчанию;

на следующей вкладке нажмите Install.

Установка займёт некоторое время. Затем нажмите «Готово».

После установки вы найдёте на вкладке Пуск – Все программы в папке Cadence Release 17.2-2016 структуру только что установленного программного обеспечения (рис. 1.2).

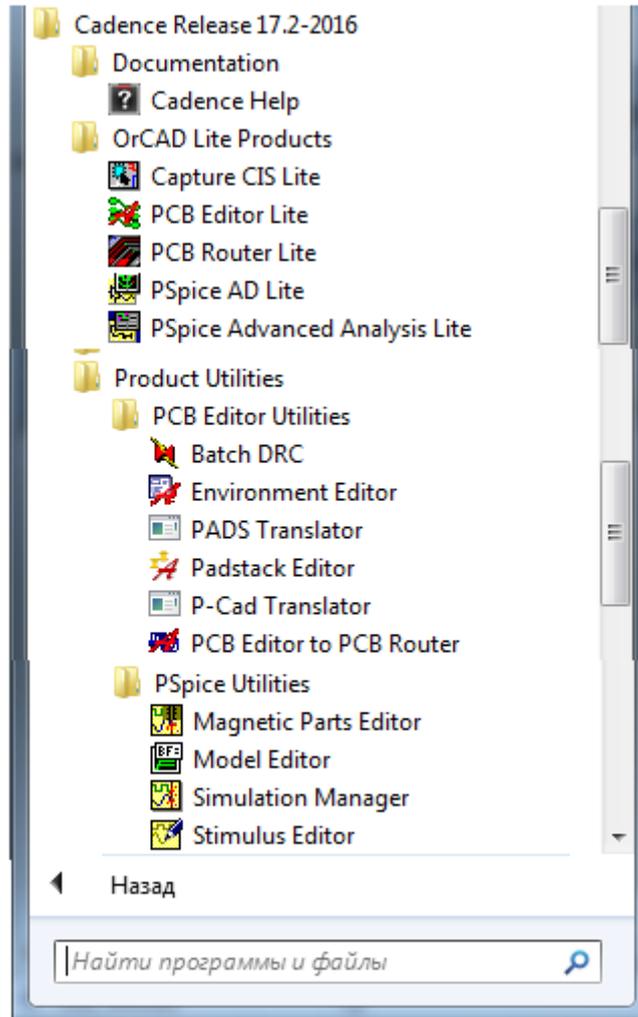


Рис. 1.2. Структура установленного ПО

1.4. Структура и состав пакета программ OrCAD 17.2 Lite

Установленный пакет OrCAD 17.2 Lite включает (Рис.1.2):

- Capture CIS Lite: (CIS - Component Information System) — схемотехнический графический редактор проектов, предназначенный для создания моделей электрических схем из моделей элементов. Возможности этой программы расширены за счет того, что справочная информация может получаться через Internet. При этом зарегистрированный пользователь получает доступ к информации о приблизительно 200 тысячах электронных компонентов.
- PCB Editor Lite: графический редактор для проектирования печатных плат (PCB - Printed Circuit Board).
- PCB Router Lite: использует маршрутизацию на основе *Shape-Based* или *бессеточной технологии* и является более быстрым инструментом маршрутизации (разводки печатных плат).

- PSpice AD Lite: — универсальная программа моделирования с возможностями аналого-цифрового моделирования, выполняет симуляцию и вывод результатов.
- PSpice Advanced Analysis Lite: — универсальная программа моделирования с возможностями аналого-цифрового моделирования, имеет набор возможностей анализа для оптимизации параметров, прогнозирования надёжности и улучшения качества и производительности;
 - Утилиты PSpice: набор инструментов, которые будут использоваться в сочетании с Capture и PSpice (редактор магнитных деталей, редактор моделей, диспетчер моделирования, редактор стимулов).

1.5. Состав программ OrCAD PSpice

OrCAD 17.2 использует несколько программ, основанных на PSpice. К ним относятся следующие.

OrCAD PSpice — программа моделирования в среде OrCAD. Эта программа создавалась как самостоятельное средство моделирования и достаточно широко применяется в различных средах моделирования. В OrCAD 16 и 17 применяются три версии OrCAD PSpice:

- OrCAD PSpice — программа, предназначенная для проведения только аналогового моделирования;
- OrCAD PSpice A/D Basic — упрощенная универсальная программа моделирования с возможностями аналого-цифрового моделирования;
- OrCAD PSpice A/D — универсальная программа моделирования с возможностями аналого-цифрового моделирования.

OrCAD Probe — программа, позволяющая осуществлять обработку результатов моделирования в виде осциллограмм.

OrCAD PSpice Model Editor — инструмент, предназначенный для создания и редактирования математических моделей электронных элементов.

OrCAD Stimulus Editor — инструмент, использующийся при создании и редактировании моделей источников сигналов.

OrCAD PSpice Optimizer — программа параметрической оптимизации режимов работы моделей методом наискорейшего спуска.

PSpice Simulation Manager — программа, обеспечивающая очередность работы со схемами, ожидающими моделирования и находящимися в процессе моделирования. Пользователь имеет возможность приостановить текущее моделирование, запустить анализ другой схемы, а затем вернуться к первой. Возможна расстановка приоритетов в очереди.

1.6. Ограничения в учебных программах OrCAD 17.2 Lite

Вполне понятно, что бесплатная учебная программа будет по функциональным возможностям слабее дорогой профессиональной. Версия Lite (облегченная) для продуктов OrCAD имеет определенные ограничения, связанные с размером и сложностью дизайна. Если ваш дизайн превышает эти ограничения, вы не сможете сохранить свою работу или получить свой дизайн посредством выполнения потока операций.

Рассмотрим подробнее ограничения учебных программ

Ограничения в программе OrCAD Capture CIS Lite

- Вы не можете сохранить проекты с более чем 75 цепями, в том числе иерархические блоки в дизайне. Вы можете попрежнему просматривать или создавать большие конструкции.
- Вы не можете сохранить дизайн с более чем 60 компонентами, включая иерархические блоки в дизайне. Вы можете только просматривать или создавать большие конструкции.
- В базе данных Capture CIS не может быть более 1000 компонентов.
- Вкладка Internet Component Assistant (ICA) (ICA) в CIS Explorer открывает окно About ActiveParts (www.activeparts.com), а не страницу поиска компонентов.
- Вы не можете создавать детали с более чем 100 контактами.
- Процесс создания FPGA в Capture недоступен.
- Вы не можете проверить набор электрических ограничений.
- Функции CIS и SI недоступны, если вы устанавливаете PSpice Lite. Для доступа к этим функциям, установите PCB Designer Lite.
- Переводчик Altium недоступен.
- Полный учебник по обучению может быть недоступен в зависимости от установленной версии Lite.

Ограничения в программе PSpice Lite

PSpice 17.2 Lite имеет ограничения по сложности проекта и его функционированию. Перечислим наиболее существенные:

- Моделирование схем ограничено цепями с 75 узлами, 20 транзисторами, без ограничения подсхем, но допустимо 65 цифровых примитивных устройств и 10 линий передачи (идеальных или неидеальных) с не более чем четырьмя попарно связанными линиями.
- Характеристика устройства и параметризованное создание деталей с использованием PSpice® редактора моделей ограничено диодами.
- Включает все библиотеки, в том числе параметризованные библиотеки.
- Отсутствие ограничений для генерации стимулов с использованием редактора стимулов.

- Предоставлены примерная библиотека моделей с именем `eval.lib` (содержащая аналоговые и цифровые части) и `evalp.lib` (содержащие параметризованные части).
- Максимальное количество узлов в цифровой цепи может быть равно или меньше 250.

Ограничения в программе PSpice Advanced Analysis Lite

Расширенный анализ *PSpice Advanced Analysis Lite* имеет следующие ограничения:

- Анализ «дыма» (Smoke analysis) предупреждает о напряжённых компонентах из-за рассеивания мощности, увеличения температуры перехода, вторичных пробоев или нарушений пределов напряжения/тока. Этот анализ может работать только на диодах, резисторах, транзисторах и конденсаторах.
- Оптимизатор может использовать только метод случайных чисел (Random) и модифицированный метод наименьших квадратов (MLSQ).
 - Можно оптимизировать значения до двух параметров компонента.
 - Поддерживаются максимум одна спецификация измерения и одна кривая спецификации.
 - Поддерживается только один метод расчёта ошибок для оптимизации кривой.
- Параметрический плоттер:
 - Может измерять значения только двух параметров проекта и/или модели.
 - Поддерживается только линейная развёртка.
 - Допускается не более 10 развёрток.
 - Может оценивать влияние изменения значений параметров только на одно выражение измерения или следа.
 - Дисплей не доступен.
- Монте-Карло и анализ «худшего случая»
 - Допускается только одна спецификация измерений.
 - Поддерживается максимум три устройства с допуском.
 - Поддерживается максимум 20 проходов Монте-Карло.
- Анализ чувствительности
 - Допускается только одна спецификация измерений.
 - Поддерживается максимум три устройства с допуском.
 - Поддерживается максимум 20 прогонов.
 - Шифрованные параметризованные модели нельзя моделировать.
 - Оптимизатор Random Engine может выполнять до 5 прогонов.

Ограничения программы OrCAD PCB Editor Lite

- Вы не можете сохранить платы с более чем 50 компонентами и / или 100 цепями. Тем не менее, вы все равно можете просмотреть более крупные проекты.

- Файлы руководств и учебников будут доступны с ограничениями Lite.

- Предоставляется ограниченная библиотека образцов.

Ограничения программы OrCAD PCB Router Lite

- Вы не можете сохранить результаты сеанса маршрутизации

1.7. Процесс моделирования в OrCAD

Процесс моделирования схемы можно условно поделить на несколько этапов, каждый из которых в свою очередь подразделяется на несколько промежуточных.

Процесс моделирования простого электронного устройства показан на рис. 1.3 и включает в себя создание библиотек компонентов в OrCAD Capture, создание библиотеки PSpice – моделей компонентов в Model Editor, создание проекта в OrCAD Capture, создание и настройка профиля моделирования, запуск моделирования, анализ полученных результатов в PSpice.

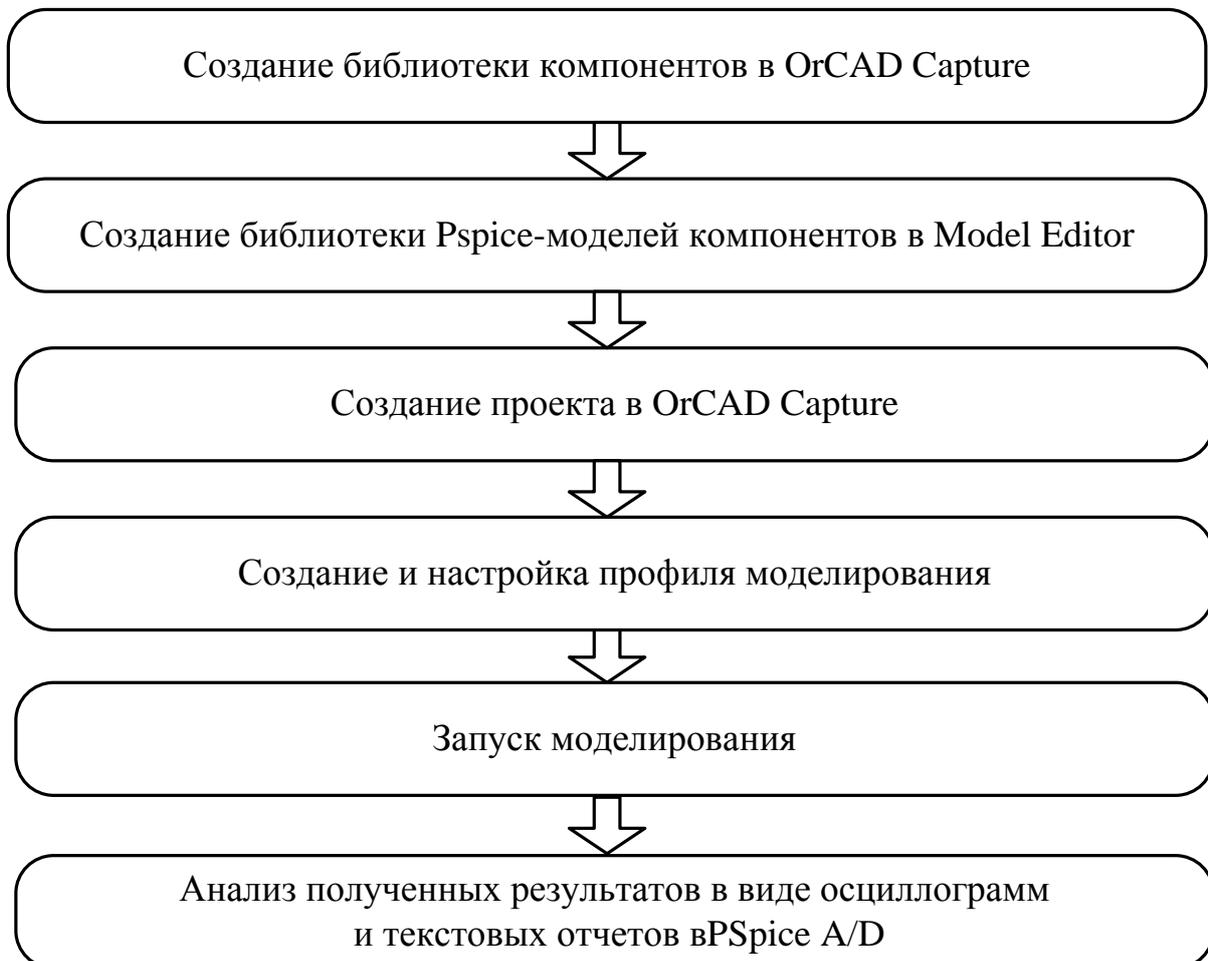


Рис. 1.3. Процесс моделирования простого проекта

Простые проекты без оптимизации, как правило, выполняются в последовательном потоке до получения результатов.

Перед началом работы необходимо удостовериться в том, что имеются все необходимые для схемы библиотеки компонентов. Если какие-либо библиотеки отсутствуют, их можно создать в приложениях OrCAD Capture и Model Editor. Рекомендуется загружать библиотеки компонентов, которые находятся на сайтах разработчиков компонентов, либо искать их на сайте www.orcadcapturemarketplace.com.

Стандартные библиотеки PSpice содержат более 16000 аналоговых и 1600 цифровых и смешанных моделей устройств, выпускаемых в Северной Америке, Японии и Европе.

Используйте компоненты из стандартных библиотек PSpice или PSpice Advanced Analysis библиотек, если вы хотите проанализировать компоненты с помощью PSpice.

Стандартные библиотеки PSpice устанавливаются в следующих каталогах:

- Символы Capture для стандартных библиотек PSpice в \ Tools\ Capture \ Library \ PSpice \ . Файлы этих библиотек имеют расширение .OLB и используются для моделирования в PSpice Capture.

- Стандартные библиотеки моделей PSpice в \ Tools \ PSpice \ Library \ имеют расширение .LIB . Последние можно применять и для моделирования схемы, и для проектирования печатных плат.

Библиотеки расширенного анализа (PSpice Advanced Analysis libraries) содержат более 4300 аналоговых компонентов. Библиотеки расширенного анализа содержат параметризованные и стандартные детали. Большинство компонентов параметризуются.

Параметризованные части имеют точность (толерантность), вероятностное распределение, могут быть оптимизированы и иметь параметры «дыма», необходимые для PSpice Advanced Analysis.

Расположение библиотек.

- Символы Capture для библиотек расширенного анализа в \ Tools\ Capture \ Library \ PSpice \ AdvAnls \

- Библиотеки моделей расширенного анализа PSpice в \Tools\ PSpice \ Library. Файлы из этого каталога имеют расширение .LIB.

В настоящее время Cadence предоставляет широкий набор программных средств для проектирования современных электронных устройств от интегральных схем и ПЛИС до систем на кристалле (СНК) и Интернета вещей [11].

На рис. 1.4. показаны этапы проектирования систем на кристалле, включающие:

- Системное проектирование;
- Аппаратное проектирование;
- Проектирование топологии интегральной схемы (ИС);

- Проектирование корпуса ИС;
- Проектирование печатной платы;
- Разработка программных средств;
- Отладка и тестирование системы.



Рис. 1.4. Этапы проектирования СМК

На рис. 1.5. показан маршрут проектирования сложной электронной системы [11]. Сначала проводится системное проектирование на языках C++ и SystemC с использованием библиотек, стандартов, сложных заказных готовых IP (Intellegence Properties) блоков. Затем проводят одновременно аппаратное и программное проектирование цифровых и смешанных аналогово-цифровых и заказных блоков с использованием языков Verilog, VHDL, AMS, выполняют логический синтез FPGA (field-programmable gate array - программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС)) и ASIC (application specific integrated circuit – интегральная схема специального назначения). Проводят физическое прототипирование, создают библиотеку производителя, проектируют топологию, выполняют верификацию топологии с возвратом для уточнения на системное прототипирование, эмуляцию и системное программирование. Такой замкнутый цикл может повторяться многократно, пока не будут достигнуты надежные требуемые параметры устройства. Только после этого проект передают в производство, корпусирование и разработку печатной платы.

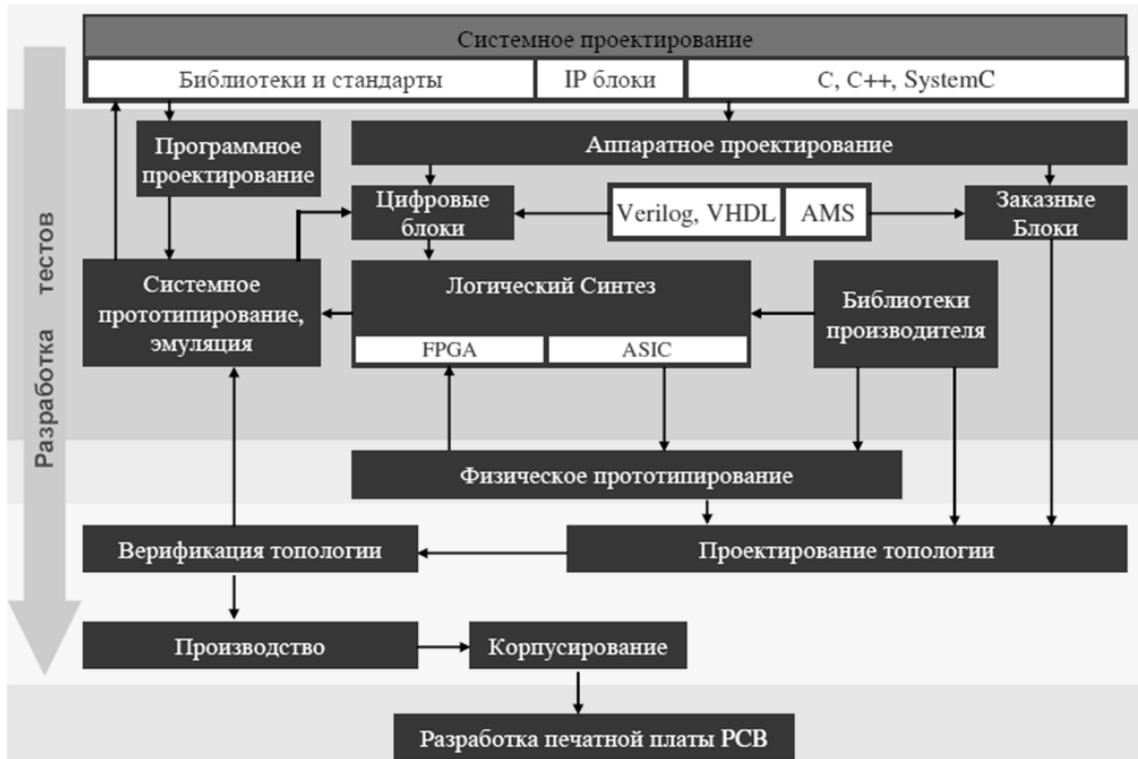


Рис. 1.5. Маршрут проектирования Cadence

Чтобы научиться этому, надо начать с простых электронных устройств и изучить OrCAD 17.2.

1.8. Создание первого проекта

Перед началом работы надо создать в компьютере папку, в которой будут храниться файлы проекта. В OrCAD применяют такие термины:

- Проект (Project);
- Разработка (Design);
- Библиотека (Library);
- Текстовые или VHDL файлы.

Файл проекта (расширение .OPJ) содержит указатель на один файл разработки (.DSN), а также библиотеки, VHDL файлы, выходные файлы отчетов, связанные с файлом разработки.

В файле разработки находится одна или несколько папок (schematic folders), содержащих по одному или несколько листов (schematic pages), а также кэш разработки, который подобно библиотеке, содержит копии всех элементов, использованных в разработке.

Итак, создаем папку для нашего первого проекта, например : C:\PR-1.

Запускаем программу Capture CIS Lite из меню Пуск или с рабочего стола, дважды щелкнув по ярлыку. После загрузки программы откроется стартовая страница (рис. 1.6).

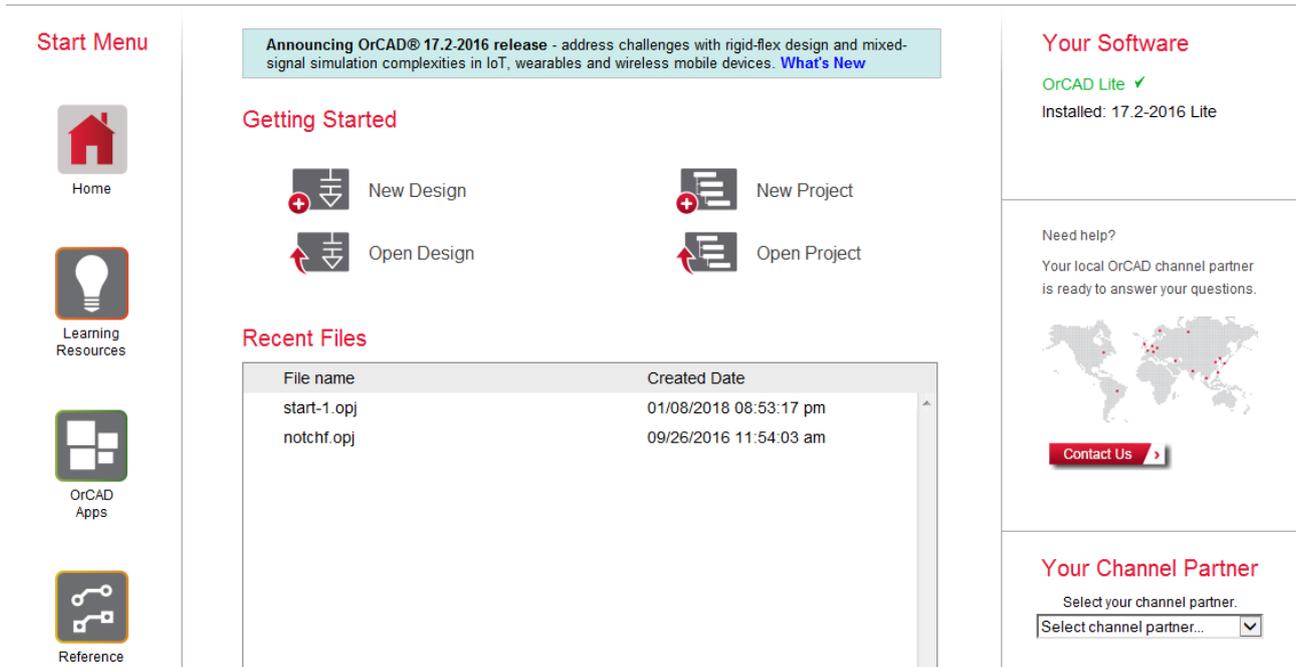


Рис. 1.6. Стартовая страница

Если у Вас уже есть готовые проекты, можно открыть любой из них, выбрав Open Project (для всего проекта) или Open Design (для разработки из проекта) и загрузив нужный файл из проводника.

Мы создаем первый проект и выбираем New Project. В окне New Project задаем имя проекта (например, PR-1), расположение в папке C:\PR-1 (хотя совпадение имен необязательно). Выбираем программу моделирования PSpice Analog or Mixed A/D для моделирования аналоговых, цифровых и смешанных схем (рис. 1.7). Такой проект можно будет использовать для создания печатной платы разработки.

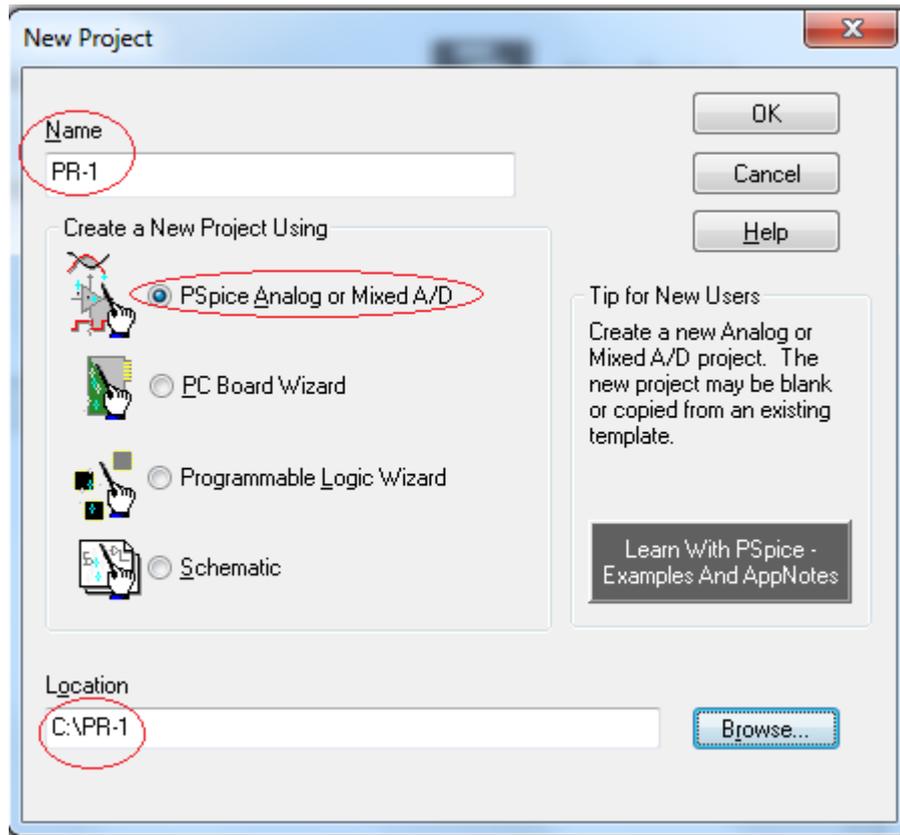


Рис. 1.7. Выбор типа проекта.

Нажав ОК, мы получаем предложение выбрать, на каком из существующих проектов будет базироваться новый.

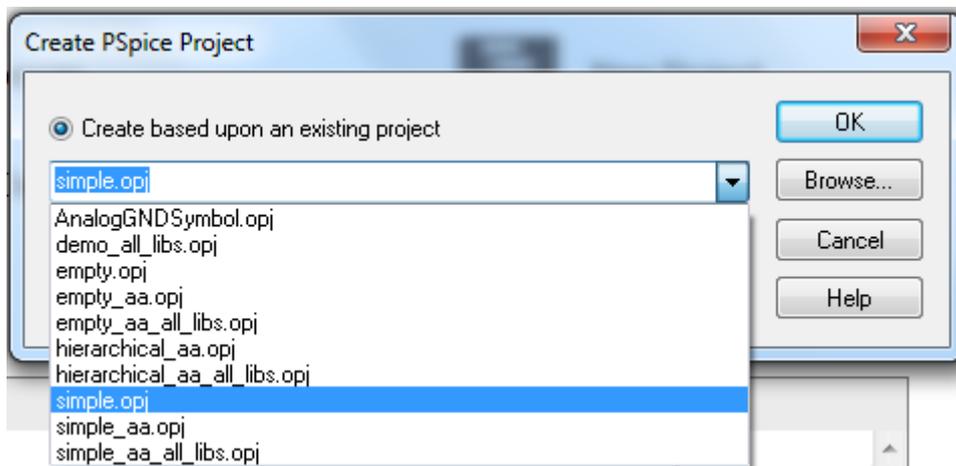


Рис. 1.8. Выбор базового проекта

Появляется окно, где нужно выбрать пункт меню Create based upon an existing project (создать проект на основе имеющихся шаблонов). В выпадающем списке выбираем один из 42 готовых для моделирования проектов, которые находятся в подкаталоге \tools\capture\templates\pspice каталога с установленной программой. Сюда можно добавить свой собственный проект, и при создании нового проекта его также можно будет выбрать в этом списке.

По именам файлов проектов можно судить об их особенностях. Например, `simple.orj` или `empty.orj` – это простые проекты с одним схемным листом и подключенными базовыми библиотеками компонентов с PSpice-моделями. Шаблоны, начинающиеся со слова `hierarchical`, – это иерархические проекты с двумя подсхемами по одному листу в каждой (об этом мы будем говорить позже). Проекты типа `empty_aa`, `simple_aa`, `hierarchical_aa` и т.д. – это проекты с предустановленными библиотеками компонентов, пригодными для проведения дополнительных видов анализа (Advanced Analysis). К шаблонам с окончанием `all_libs` подключены все библиотеки выбранного типа.

Основные библиотеки, которые применяются чаще всего, – это `analog.olb` (базовые пассивные компоненты) и `source.olb` (источники питания и сигналов).

Наиболее часто используемый вариант для новых простых проектов `simple.orj`, который добавляет для проекта следующие пять библиотек по умолчанию (рис. 1.9).

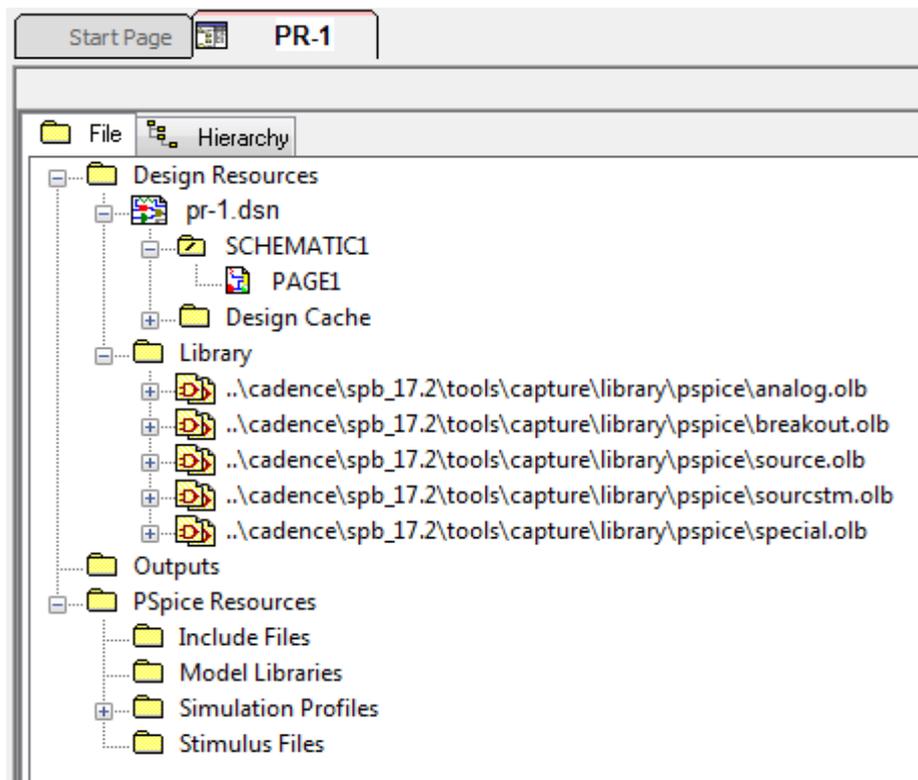


Рис. 1.9. Библиотеки шаблона `simple.orj` в окне менеджера проектов (МП)

Эти библиотеки содержат наиболее часто используемые элементы для PSpice проектов и рекомендуются для новых проектов. Существует также возможность создавать обновлённые версии существующего проекта, то есть создать новую версию 2, основанную на оригинальном проекте версии 1. Для этого в окне `Create PSpice Project` проекта (рис. 1.8), выберите функцию *Create based upon an existing project* и затем *Browse*, чтобы выбрать существующий

проект. Эти действия будут копировать существующий проект и все связанные с ним файлы в новый проект. Это похоже на операцию File> Save As функции.

При выборе Create a blank project библиотеки Capture-PSpice не добавляются к проекту. Эти библиотеки могут быть добавлены позже.

При создании нового проекта создаётся окно Менеджера проекта (МП) (Рис. 1.9), который показывает абсолютный путь к библиотекам. Помните, что это символы Редактора проектов, которые определяют графику для компонентов (рис. 1.10). Они не являются PSpice моделями библиотеки Capture, и не установленные по умолчанию, могут быть найдены и добавлены в проект позже.

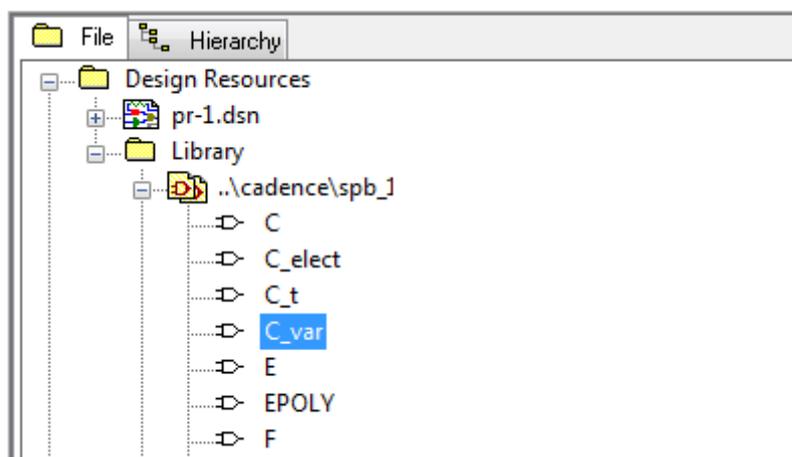


Рис. 1.10. Библиотека графики аналоговых элементов

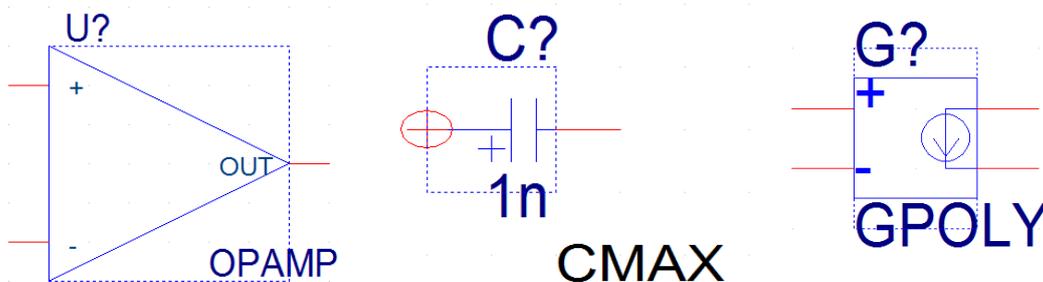


Рис. 1.11. Примеры графики элементов библиотеки

Для добавления новой библиотеки в проект надо выделить папку Library, в выпавшем меню нажать Add File, в каталоге библиотек выбрать нужный файл и нажать «Открыть».

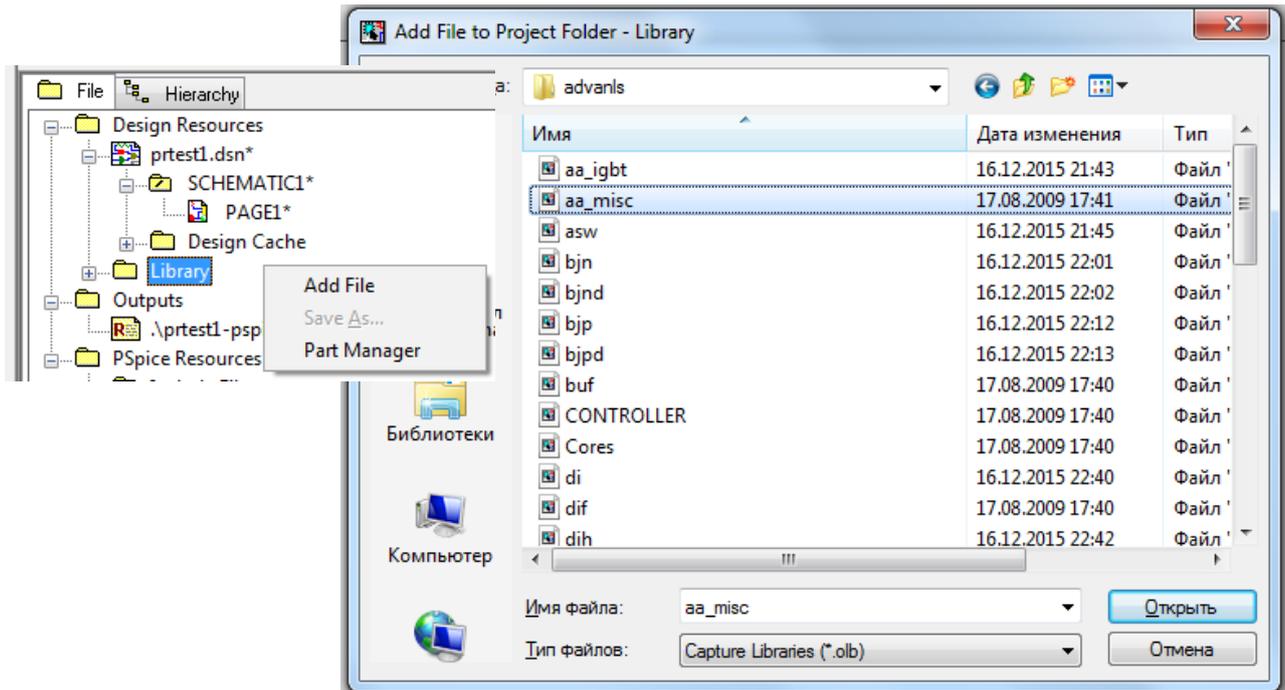


Рис. 1.12. Добавление файла в библиотеку

Если при создании проекта выбрать шаблон `simple_aa_all_libs.opj`, то в проект подключатся практически все библиотеки из каталога `\tools\capture\library\pspice\...`

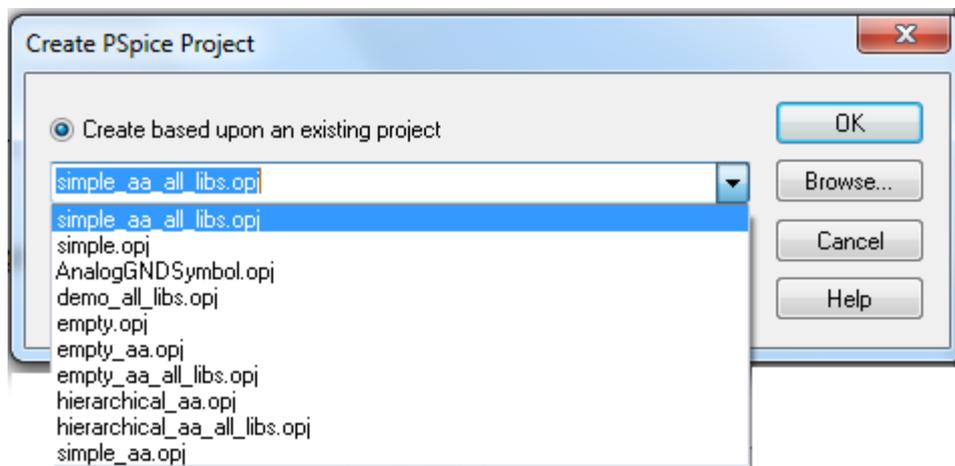


Рис. 1.13.

Фрагмент списка библиотек из папки `\advanls\` показан на рис. 1.14.

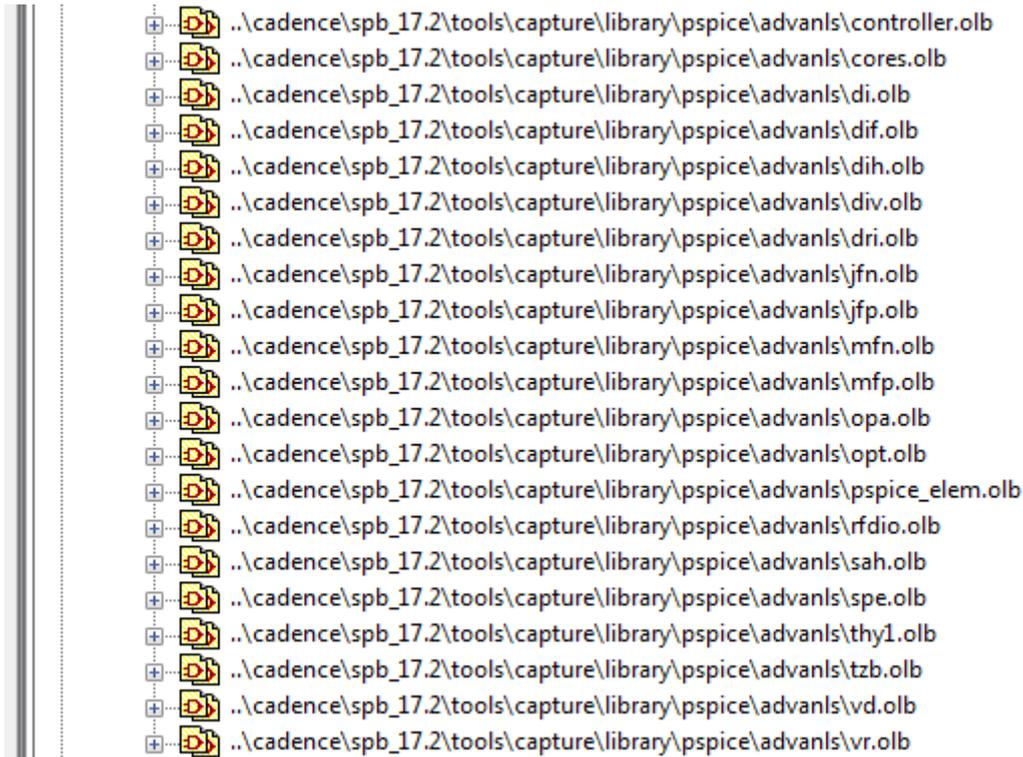


Рис. 1.14. Фрагмент списка библиотек

Кроме библиотек менеджер проекта содержит папку SCHEMATIC1, страницу схемы PAGE1, папки выходных файлов Outputs и PSpice Resources.

Если окно Менеджера проектов не отображается, выбираем Windows-<project name>opj-file.\

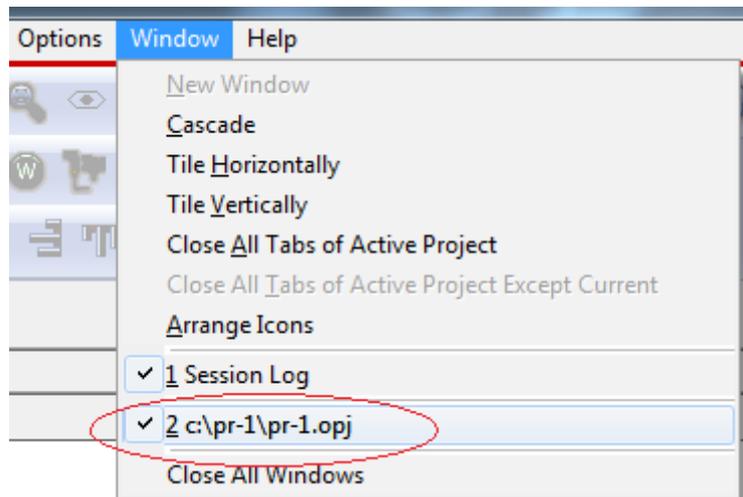


Рис.1.15. Открытие окна менеджера проекта

1.9. Поведение менеджера проекта

Внутри менеджера проекта вы можете развернуть или свернуть структуру, которую вы просматриваете, нажав на знак «плюс» или «минус» слева от папки. Знак «плюс» означает, что в папке есть содержимое, которое не является

в настоящее время видимым; знак «минус» указывает, что папка открыта и ее содержимое видно, в виде перечисленных ниже папок.

При двойном щелчке по папке схемы Capture отображает страницы схемы в этой папке. Если папка является моделью VHDL, Capture отображает каждый определенный объект в этой модели. Если папка Verilog model, Capture отображает каждый определенный модуль в модели.

Когда вы дважды щелкаете по странице схемы, объекта VHDL или модели Verilog, вы открываете этот объект в соответствующем редакторе. Например, двойной щелчок по объекту VHDL открывает файл модели VHDL на расположении определения этого объекта в редакторе VHDL Capture.

Каждый проект, который вы открываете, имеет собственное окно менеджера проектов. Вы можете перемещать или копировать папки или файлы между проектами, перетаскивая их из одного окна менеджера проекта в другое (а также из Проводника Windows). Если вы закроете окно менеджера проектов, вы закроете проект.

Каждый проект может содержать один дизайн (.DSN). Дизайн может состоять из любого числа схемных папок, схемных страниц или моделей VHDL или Verilog, но должен иметь один корневой модуль. Корневой модуль - это модуль, который определяется как объект верхнего уровня для дизайна. То есть все остальные модули в дизайне указаны в корневом модуле.

1.10. В чем разница между понятиями *a part* и *a symbol*

Перед созданием схемы полезно узнать разницу между понятиями *a part* и *a symbol*

Используют следующие термины:

Part – (часть-компонент) является основным строительным блоком конструкции. **Part** может представлять один или несколько физических элементов или может представлять собой функцию, имитационную модель или текстовое описание для использования внешнего приложения. Поведение компонента описывается моделью SPICE, прилагаемой папкой со схемой, записью HDL или другими средствами. Компоненты обычно соответствуют физическим объектам-затворам, разъемам и т. д., которые входят в пакеты одной или нескольких частей. Пакеты с более чем одним элементом иногда называют «пакетами с несколькими элементами».

Part (компонент) понимают также, как графическое изображение на схеме реально существующего электронного изделия, которое, как правило имеет промышленную маркировку, реальный корпус и т.п. Компоненты могут состоять из одной или нескольких секций. Компоненты имеют PSice или VHDL модели.

Компоненты надо выбирать из меню Place>Part.

Начиная с версии 16.6, в OrCAD Capture появилась возможность размещать на схеме наиболее часто используемые при моделировании компоненты через специальное меню Place → PSpice Component.

Это избавляет разработчика от долгого поиска пассивных и дискретных компонентов через панель Place Part. Компоненты из меню PSpice Component называют Symbol (символы).

Symbol — упрощенное графическое изображение одной секции компонента на электрической принципиальной схеме. Это упрощенная и обобщенная PSpice модель, которую используют для моделирования процессов. Символы не имеют промышленной маркировки, их изображение более обобщенное, чем у компонентов из меню Part.

Символы вы должны выбирать из меню Place и Place>PSpice Component.

1.11. Создаем первую схему из символов

В проекте создаем первую схему из символов. Открываем первую страницу схемы.

Кнопка Place становится активной.

Познакомимся сначала с символами.

На вкладке Place выбираем PSpice Components-Digital-Gates-And (рис. 1.16) и помещаем модель в схему. Также поместим символ транзистора и конденсатора.

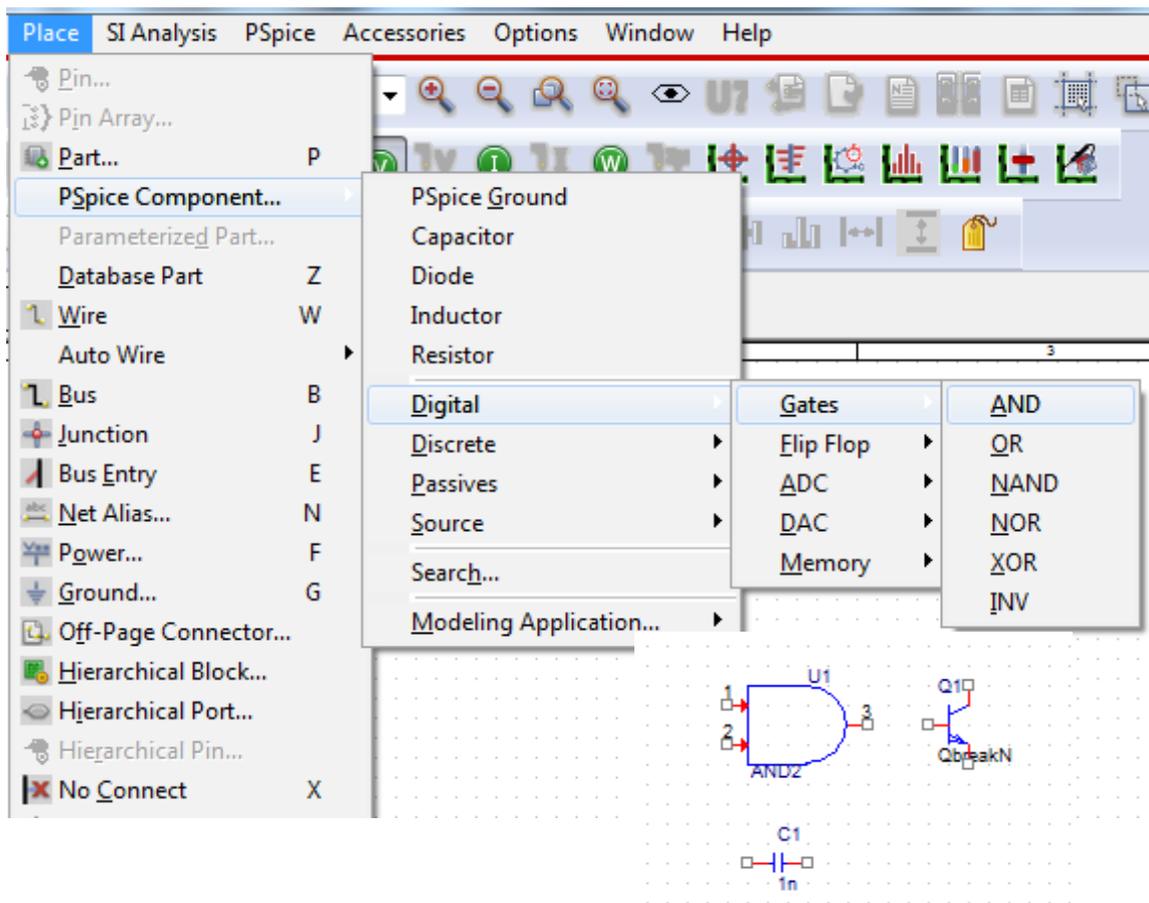


Рис. 1.16. Размещение символов в схеме

Обратите внимание на то, что на изображениях символов отсутствует промышленная маркировка серий логических элементов и транзисторов.

Составим простую схему из двух резисторов, источника напряжения и земли.

Выбираем источник постоянного напряжения из меню Place> PSpice Component>Sources>Voltage Sources>DC (Рис. 1.17).

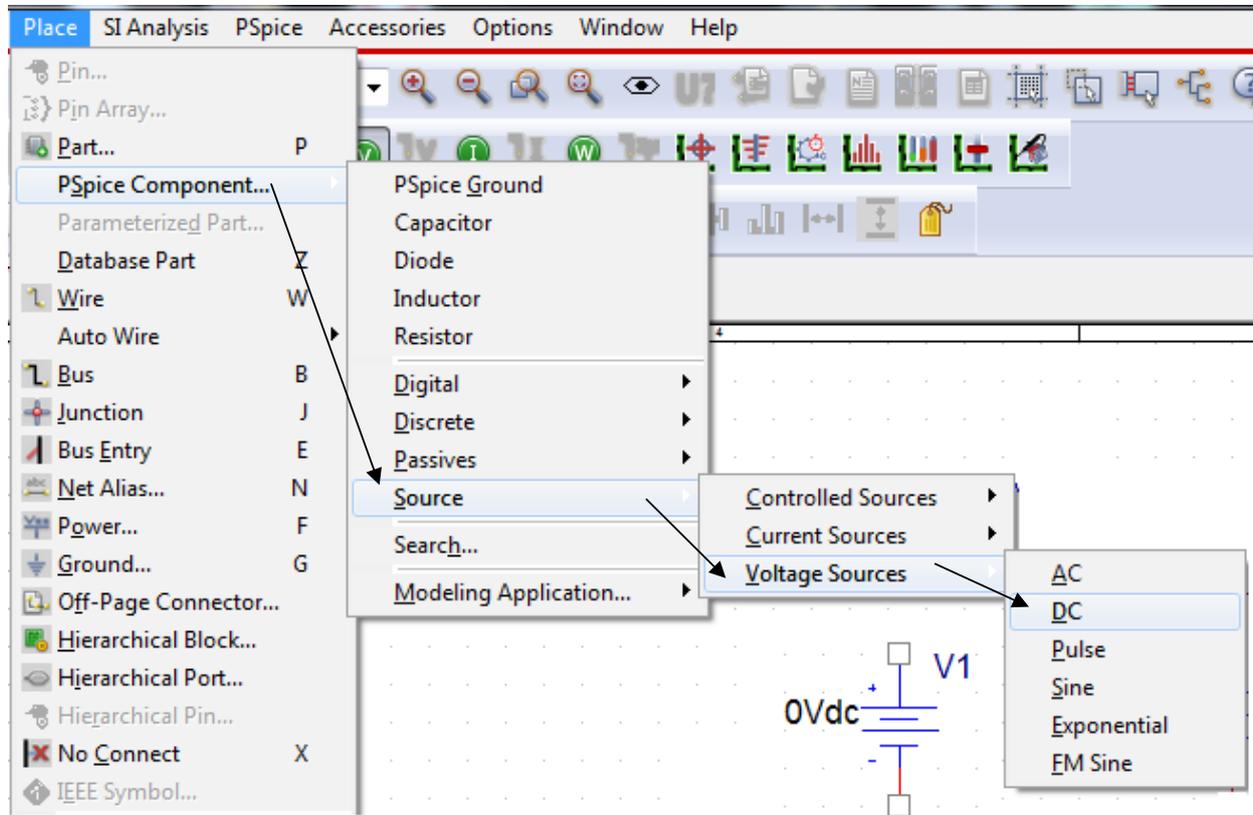


Рис. 1.17. Выбор источника напряжения и резисторов

В схеме обязательно должна быть «Земля» с нулевым потенциалом. Для PSpice моделирования необходимо установить землю со знаком «0» из библиотеки CAPSYM. Для этого в меню Place выбираем Ground и нужный символ земли (рис. 1.18)

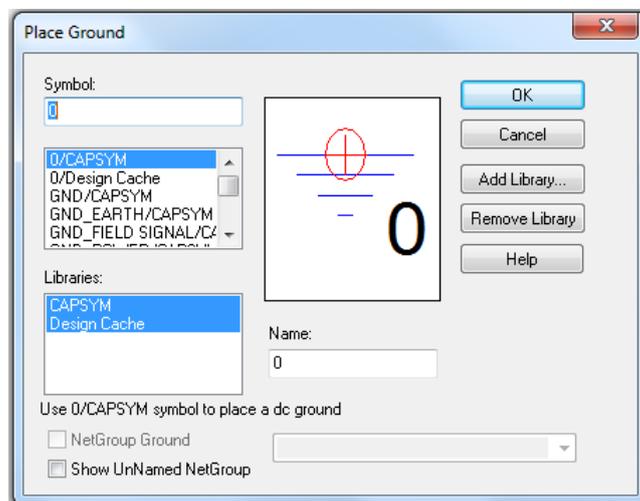


Рис. 1.18. Выбор символа земли

Далее выполняем Place>PSpice Component> Resistor и соединяем символы в схему. Для этого на правой панели инструментов выбираем значок Place wire  или нажимаем горячую клавишу «w». Для окончания соединения выбираем End Mode.

Получим схему (рис. 1.19)

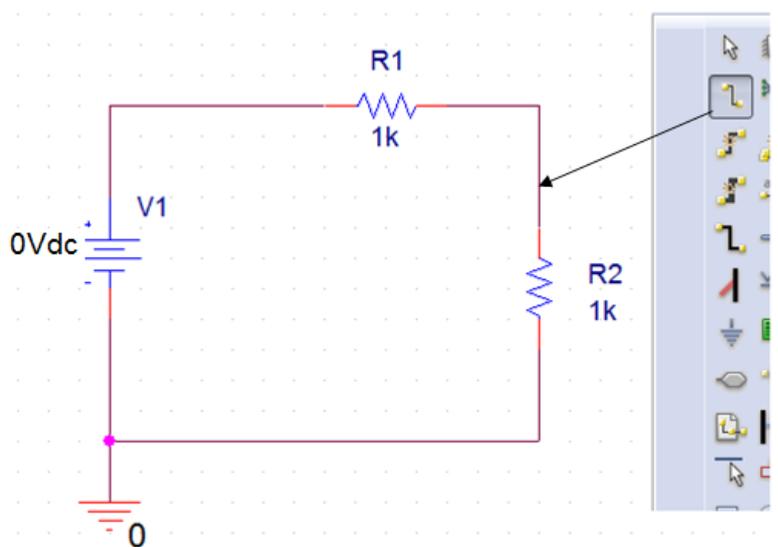


Рис. 1.19. Первая схема из символов

Лишние элементы можно удалить, выделив их указателем  и нажав delete.

Значение символа или компонента

Каждый символ или компонент должен иметь значение его величины, установленное в окне Properties (Свойства).

Примерами являются 1.2K, 10.0uF и 74ALS374. CIS поддерживает использование общих принятых обозначений (например, K и uF).

Важное замечание: в OrCAD в десятичных числах целая часть отделена точкой.

Запрос базы данных использует интеллектуальное преобразование единиц для интерпретации общих идентификаторов определения величин, поскольку записи в базах данных деталей часто имеют несогласованность (например, значение для 2.7K резистор может быть 2.7K, 2.700, 2.70K, 2.700K, 2700.0, 0,0027 M и т. Д.). Единицы измерения (например, F для фарадов или H для генри) игнорируются в переводе.

Идентификаторы величин, поддерживаемые в CIS, включают следующие:

Идентификатор	Десятичная приставка	Величина
f	фемто	10^{-15}

p	пико	10^{-12}
n	нано	10^{-9}
u	микро	10^{-6}
m	милли	10^{-3}
K	кило	10^3
M	мега	10^6
G	гига	10^9
T	тера	10^{12}

В меню источника напряжения открываем Edit Properties и устанавливаем 10V (рис. 1.20).

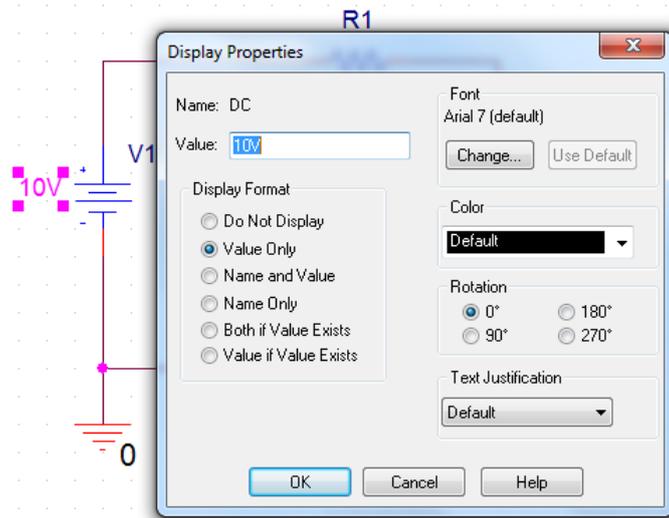


Рис. 1.20. Установка напряжения источника.

В окнах Place Power и Place Ground (рис 1.18) есть набор библиотек источников и «заземлений», которые применяются для разных целей, в том числе есть символы цифровых уровней HI, LO и цифровой земли 0 V.

Напомним, символы помещены в меню Place, а компоненты размещены в Place> Part. Также отметим, что обе библиотеки компонентов и библиотеки Symbol имеют расширение .olb и являются частями схемного графического редактора.

Схемный редактор автоматически маркирует соединение каждого провода, также, как и номер узла, который по умолчанию не отображается на схеме. Однако, вы можете назначить свои собственные метки для проводников узлов, которые дадут обозначение узлу (например, вход или выход), и это полезно, когда вы хотите анализировать различные узлы в цепи. Эти метки известны как псевдонимы и размещаются на проводе. Выделив провод, а затем выбрав Place>Net alias (или выбрав иконку сетевого псевдонима abc) можно маркировать провод метками.

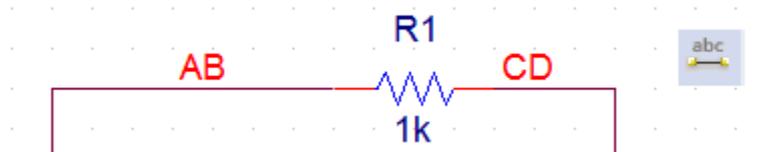


Рис. 1.21. Маркеровка проводников

Панели инструментов Capture содержат кнопки инструментов с пиктограммами, которые помогают ускорить работу со схемой (рис. 1.22) и дублируют команды меню Place.



Рис. 1.22. Некоторые инструменты панели

1.12. Моделирование первой схемы

OrCAD позволяет проводить самые разнообразные исследования электронных схем. Поэтому перед началом моделирования надо выбрать и установить желаемый новый профиль моделирования или отредактировать существующий.

Для этого в главном меню выполняем PSpice>New Simulation Profile, вводим имя профиля (например, PR-1) и нажимаем Create .

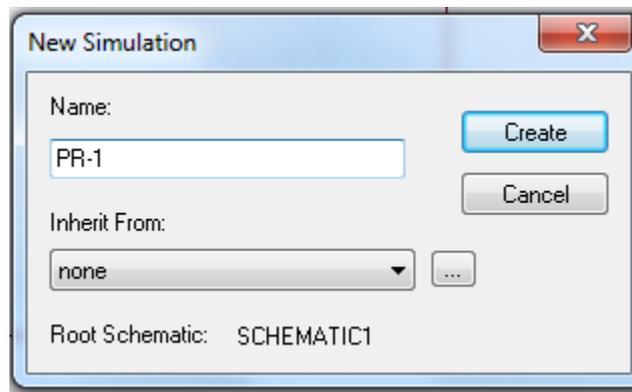


Рис. 1.23. Создание профиля моделирования

На вкладке General отображено название профиля, проекта и размещение файлов.

На вкладке Analysis устанавливаем для цепи постоянного тока тип анализа Bias Point (рис.1.24). Это анализ режима по постоянному току в точке смещения или, как говорят, в рабочей точке электронного компонента. Дополнительные опции использовать не будем.

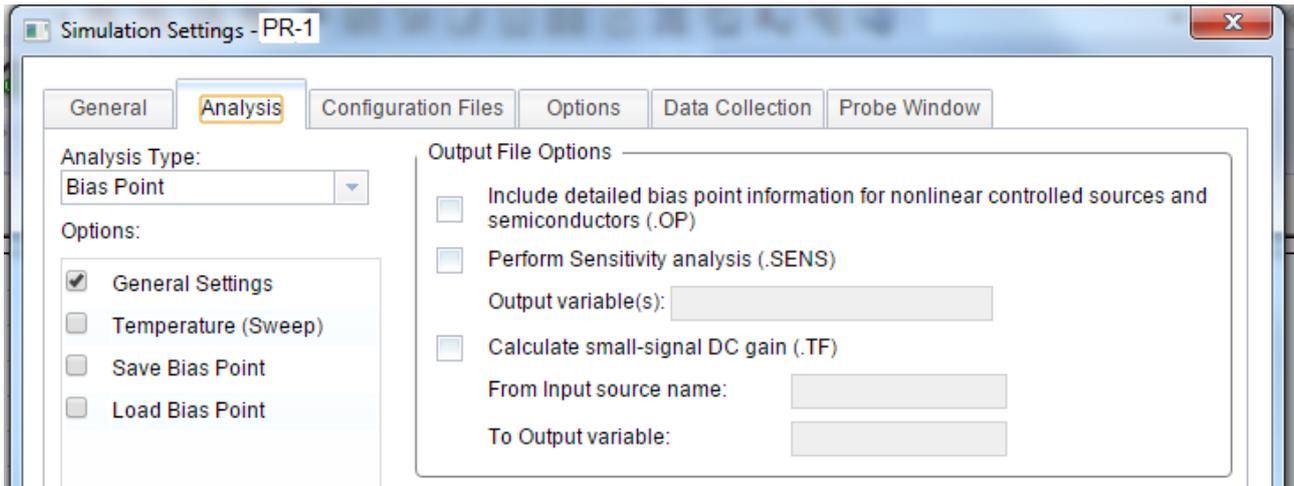


Рис. 1.24. Установка типа анализа

На вкладке Configuration Files выбираем Library и находим в каталоге C:\Cadence\SPB_17.2\pspice\library\nomd.lib (рис. 1.25). Открываем эту библиотеку. Этот файл «основной библиотеки» вызывает другие библиотеки, поставляемые Cadence вместе с установкой. Это библиотека индексов, в которой собраны все библиотеки Cadence PSpice. Эти кассетные библиотеки PSpice будут использоваться в симуляции, поэтому файл надо добавить глобально.

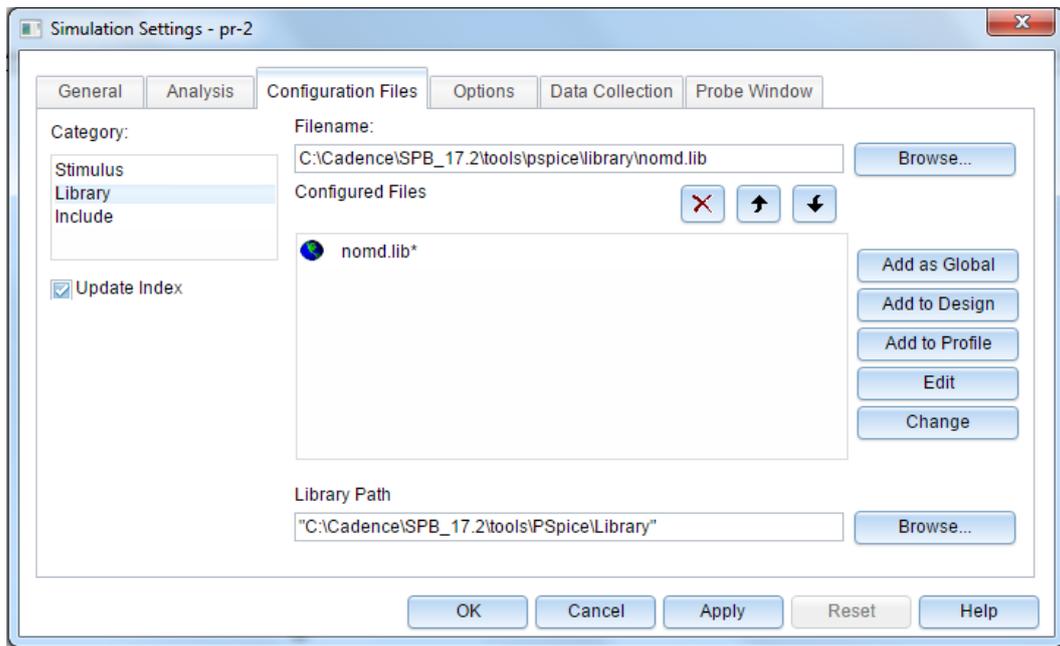


Рис. 1.25. Установка файлов конфигурации

На вкладке Options установим Analog Simulation (Рис. 1.26).

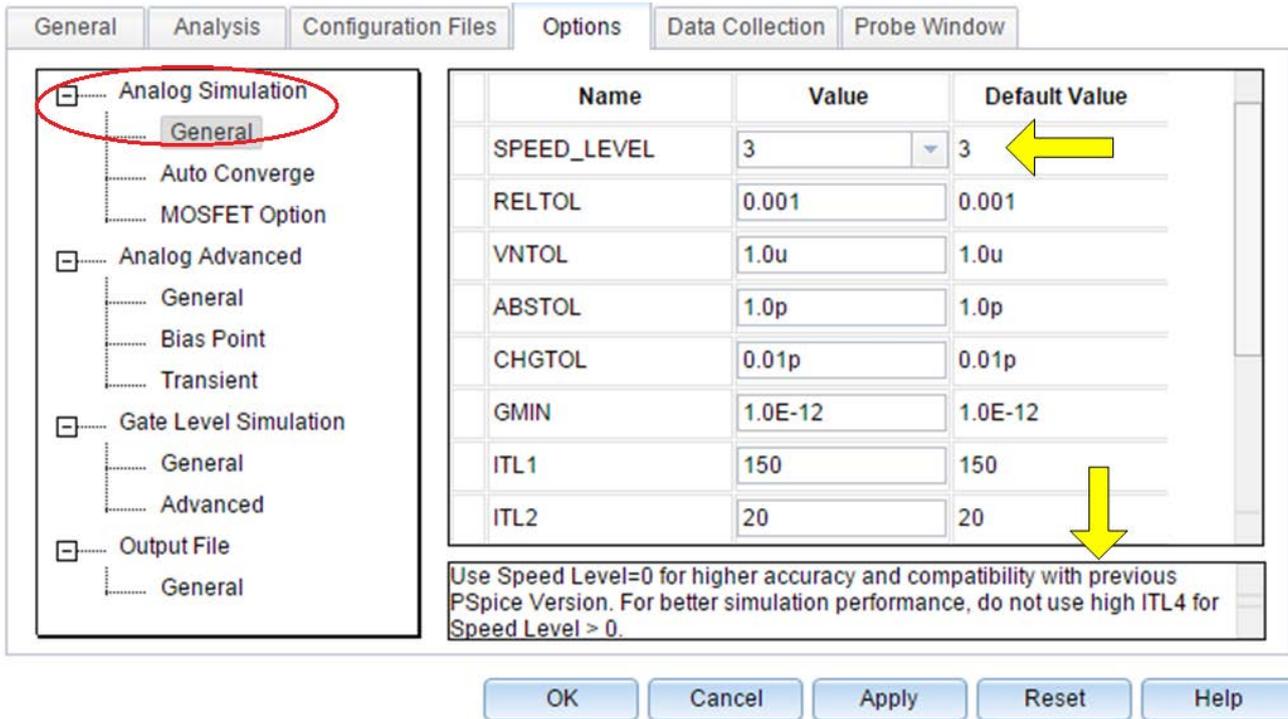


Рис. 1.26. Установка опций

Вкладка Options содержит установки параметров моделирования. Выделив конкретный параметр, можно прочитать его назначение и рекомендуемые величины. Так, например,:

SPEED_LEVEL – скорость моделирования;

RELTOL - относительный допуск напряжения и тока;

VNTOL - допуск напряжения, описывает наилучшую точность напряжений в симуляция;

ABSTOL - токовый допуск, описывает наилучшую точность токов в симуляция;

CHGTOL - допуск заряда, описывает лучшую точность зарядов;

GMIN - указывает минимальную проводимость, используемую для любой ветви;

ITL – предельное количество итераций для разных режимов моделирования.

На вкладке Data Collection выберем напряжение, ток и мощность (рис. 1.27).

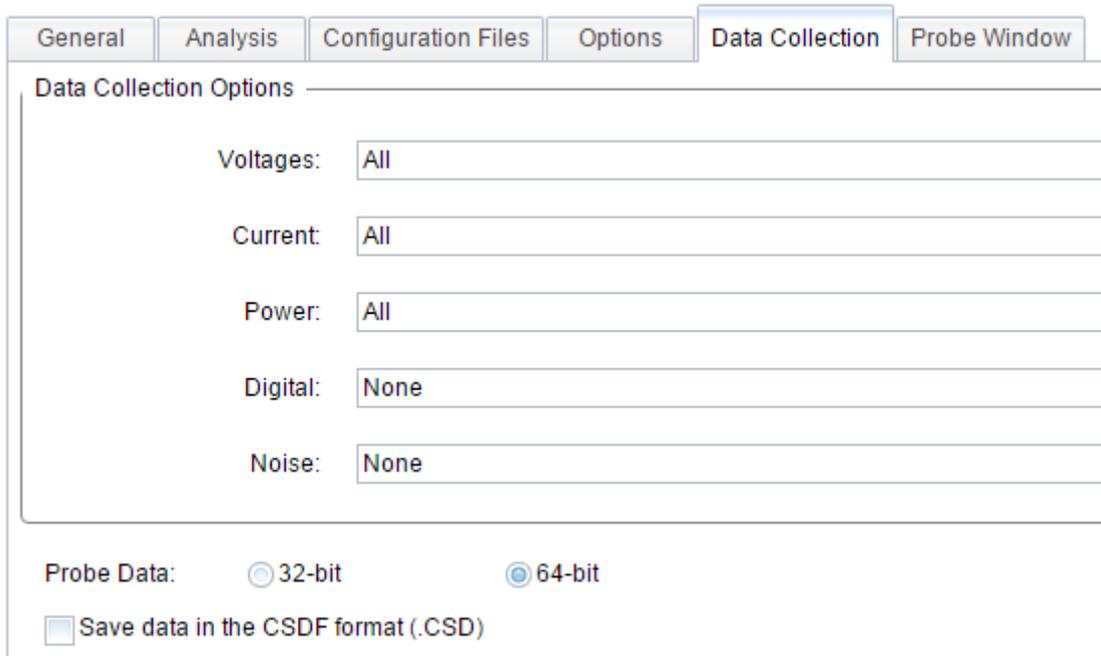


Рис. 1.27.

На вкладке Probe Windows установим открытие окна после выполнения моделирования.

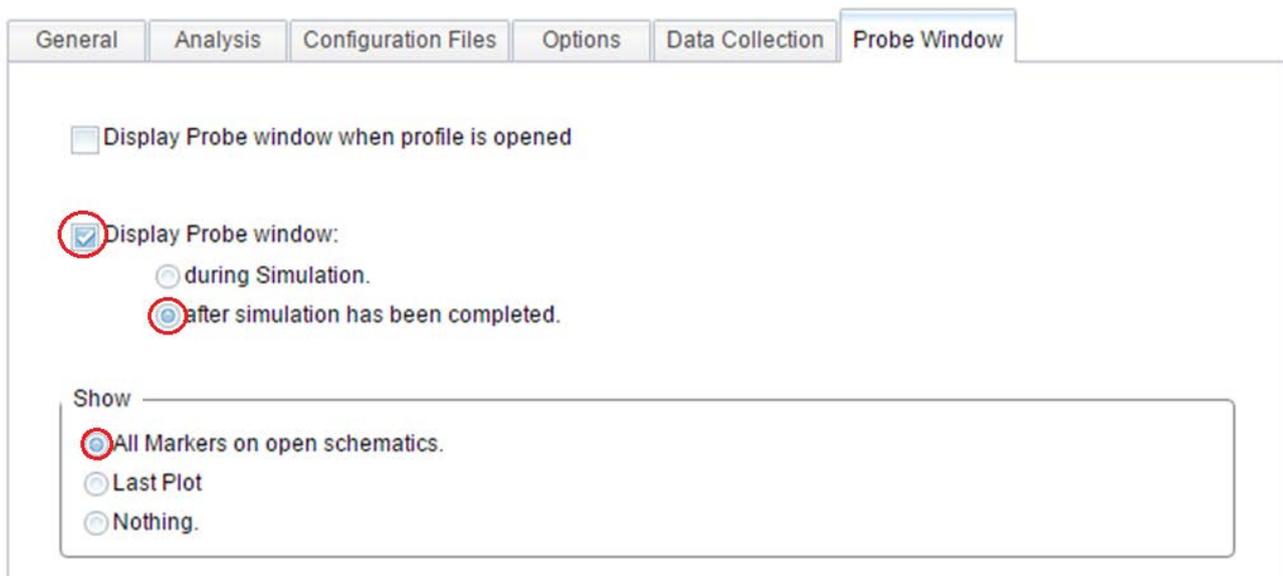


Рис. 1.28. Установка окна Probe

Нажимаем Apply>ОК.

После этого в менеджере проектов появляется введенный нами профиль SHEMATIC-PR-1. Там же могут быть профили, загруженные по умолчанию или ранее. Чтобы выбрать нужный профиль, выделяем его и выбираем Make active (рис. 1.29).

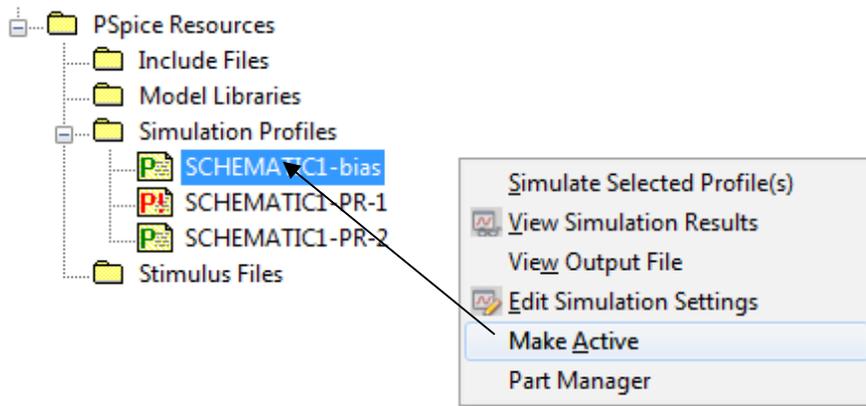


Рис. 1.29. Выбор активного профиля

После этого возвращаемся на страницу разработки, выполняем сохранение и нажимаем RUN. После окончания моделирования включаем измерительные приборы и наблюдаем результаты (рис. 1.30).

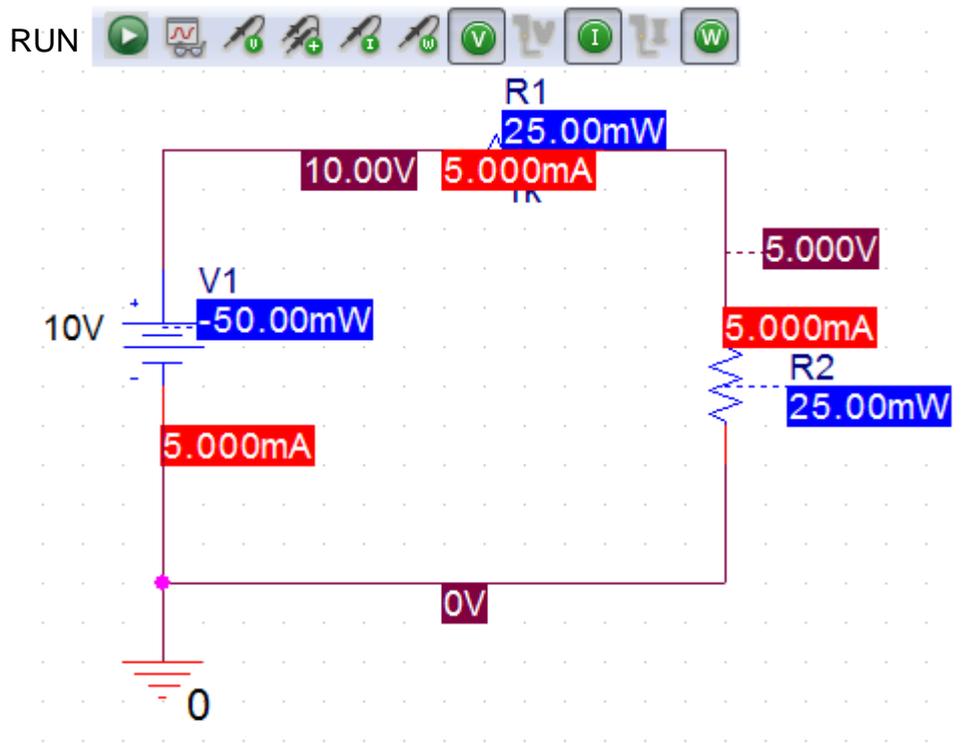


Рис. 1.30. Результаты моделирования

В окне Probe в меню View>Output File можно посмотреть печатный отчет о результатах (рис. 1.31). Так как мы моделировали стационарный режим постоянного тока в окне Probe никакие графики не отображаются.

```

*****
NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE    NODE    VOLTAGE
(  AB)   10.0000  (  CD)    5.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME           CURRENT
V_V1          -5.000E-03
TOTAL POWER DISSIPATION  5.00E-02 WATTS

JOB CONCLUDED
*****
01/23/18 13:08:56 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 *****
** Profile: "SCHEMATIC1-PR-2" [ C:\PR-2\PR-2-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\PR-2.sim ]

***** JOB STATISTICS SUMMARY
*****

```

Рис. 1.31. Выходной файл результатов моделирования

В менеджере проекта файл Outputs содержит данные о компонентах схемы и условиях работы (рис. 1.32)

```

1: * source PR-2
2: R_R1          AB CD  1k TC=0,0
3: R_R2          0 CD  1k TC=0,0
4: V_V1          AB 0 10V
5:

```

Рис. 1.32. Выходной файл менеджера проектов

Итак, первая схема смоделирована. Чтобы узнать, какие ещё схемы мы сможем исследовать выбираем в главном меню File>Open>Demo Designs и в таблице видим, какие компоненты можно моделировать в Capture, в PSpice и других программах.

Name	Capture	CIS	PSpice	PSpiceAA	Allegro	Lite	Info
8-bit Analog to Digital converter	Y	N	Y	N	N	Y	?
8-bit BCD counter using Actel devices	Y	N	N	N	N	Y	?
8-bit BCD counter using Altera devices	Y	N	N	N	N	Y	?
8-bit BCD counter using Xilinx devices	Y	N	N	N	N	Y	?
8-bit Digital to Analog converter	Y	N	Y	N	N	Y	?
80C51 Board Schematic	Y	N	N	N	N	Y	?
AC Analysis of RC circuit	Y	N	Y	N	N	Y	?
ADC parameterizing circuit	Y	N	Y	N	N	Y	?
Amplitude and Balanced Modulation	Y	N	Y	N	N	Y	?

Рис. 1.33. Таблица схем Demo

Каждую схему можно изучить подробнее, посмотреть теорию, расчеты и результаты моделирования (рис. 1.34)

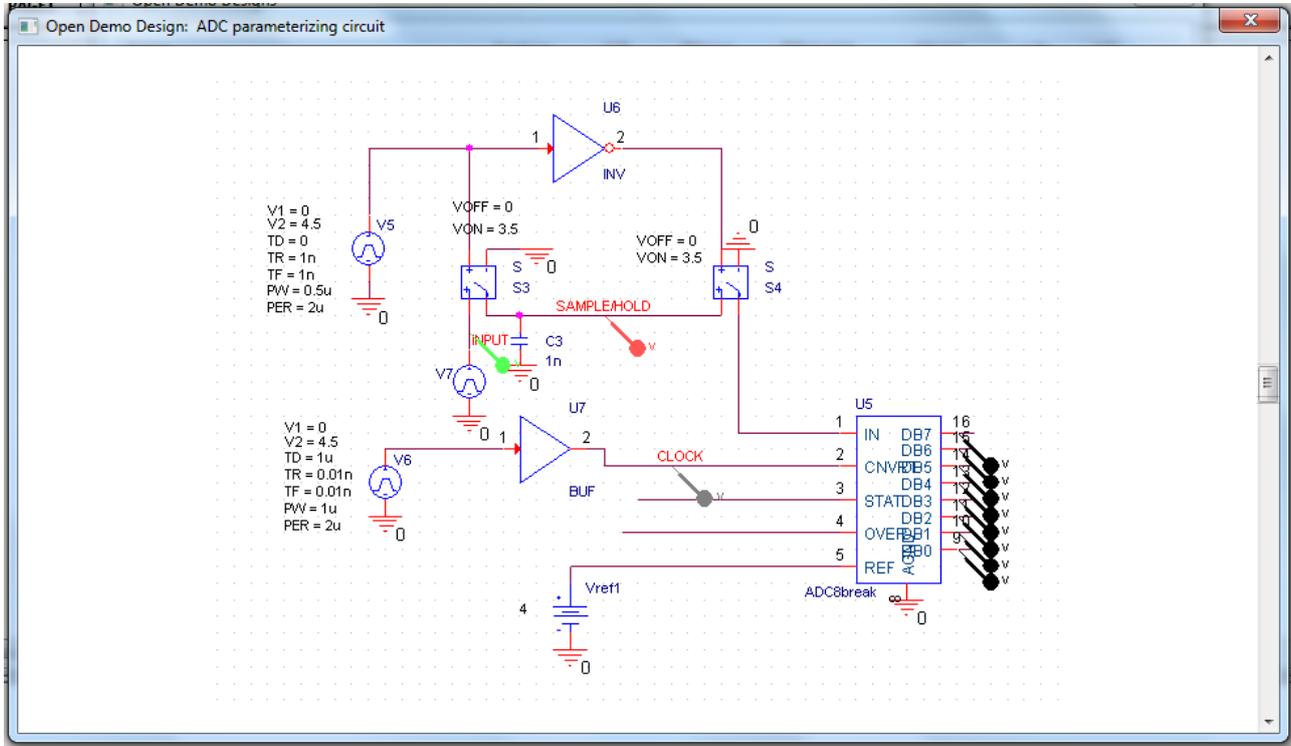


Рис. 1.34. Пример схемы аналого-цифрового преобразователя

1.13. Окно команд TCL

Tcl (Tools Command Language - командный язык инструментов) разработан как язык для интеграции приложений и популярный язык сценариев, встроенный в различные инструменты EDA (Electronic Design Automation).

Среда Capture включает в себя окно Command. Вы используете это окно для выполнения TCL команд. Кроме того, когда вы выполняете операцию (функцию) в Capture, соответствующую команде зарегистрированной в TCL-интерпретаторе, то команда регистрируется в окне Command.

Чтобы отобразить окно команд:

1. В меню View окна Probe откройте каскадное меню панели инструментов.

2. В каскадном меню панели инструментов выберите Command Windows.

Чтобы очистить окно командной строки, в командной строке введите cls и нажмите Enter.

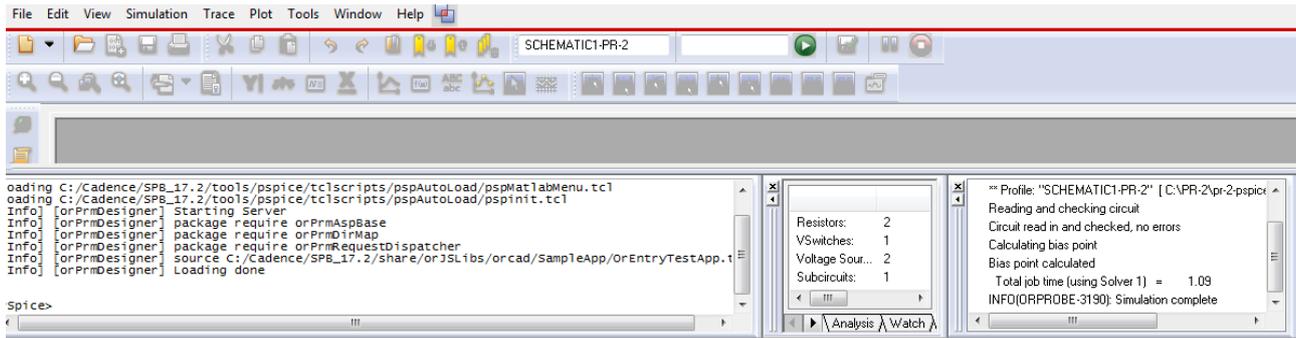


Рис. 1.35. Окно команд инструментов

1.14. Редактор схем и компонентов

Capture включает в себя ряд редакторов, включая текстовый редактор с функциями для создания моделей VHDL, редактор схем и редактор компонентов. Эти редакторы в основном функционируют в соответствии с общими принятыми в Windows инструментами. Однако есть определенные уникальные черты (особенно в отношении масштабирования и прокрутки), которые отличают редакторы Capture от других редакторов Windows.

Кратко рассмотрим основные особенности редакторов Capture/

1.14.1. Редактор схемных страниц

Вы редактируете страницы схемы в окне редактора схемных страниц. В этом окне есть два вида разделителей.

Разделитель в правом верхнем углу



разделяет страницу по горизон-

тали. Разделитель в левом нижнем углу



делит страницу по вертикали.

Каждый вид имеет свои собственные полосы прокрутки, поэтому вы можете просматривать отдельные области на одной странице.

Чтобы снять разделение, надо передвинуть разделительную полосу в исходное состояние.

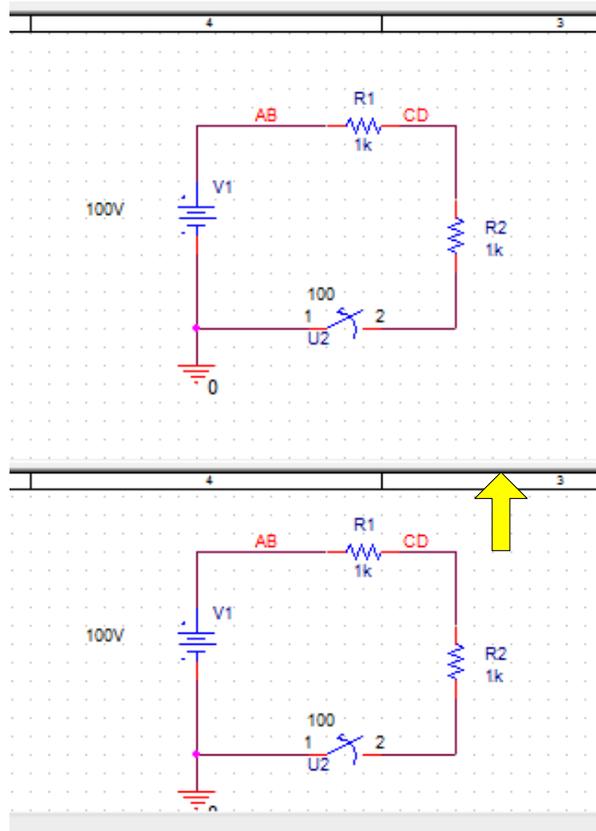


Рис. 1.36. Разделение страницы

1.14.2. Редакторы схем и компонентов

Capture включает в себя ряд редакторов, включая текстовый редактор с функциями для создания моделей VHDL, редактор схем и редактор компонентов. Эти редакторы в основном функционируют в соответствии с общими принципами, которые можно было бы ожидать в инструментах Windows. Однако есть определенные уникальные черты (особенно в отношении масштабирования и прокрутки), которые отличают редакторы Capture от других редакторов Windows.

В режиме Capture вы можете прокручивать изображение схемы вверх или вниз, или влево и вправо, чтобы сосредоточиться на другой части активного окна. Хотя некоторые объекты в меню Place прикреплены к вашему указателю, во время размещения вы все равно можете прокручивать их.

Перемещать схему в окне можно движками прокрутки, кнопками Page Up и Page Down, стрелками, а также сочетанием клавиши Ctrl с перечисленными выше, вращением колесика мыши. Если нажать Shift, то вращение колесика будет перемещать схему влево и вправо. Если нажать правую кнопку мыши и колесико одновременно, схему можно перетаскивать движением мыши.

Чтобы изменить область отображения:

1. При рисовании, размещении или перемещении объектов или при рисовании области выделения переместите указатель на край окна и используйте движки прокрутки, чтобы изменить изображение.

Чтобы настроить расстояние панорамирования и масштаб:

1. Выберите Options - Preference, затем выберите вкладку Pan and Zoom (Рис. 1.37).

2. В текстовом поле Scroll Percent введите процент горизонтального или вертикального размера окна, на который оно будет прокручиваться на дисплее. Обратите внимание, что вы можете указать отдельные значения для страницы схемного редактора и редактора символов.

3. Установите Zoom Factor. Он показывает, во сколько раз увеличивается или уменьшается изображение при нажатии клавиш с буквами I или O.

4. Нажмите «ОК».

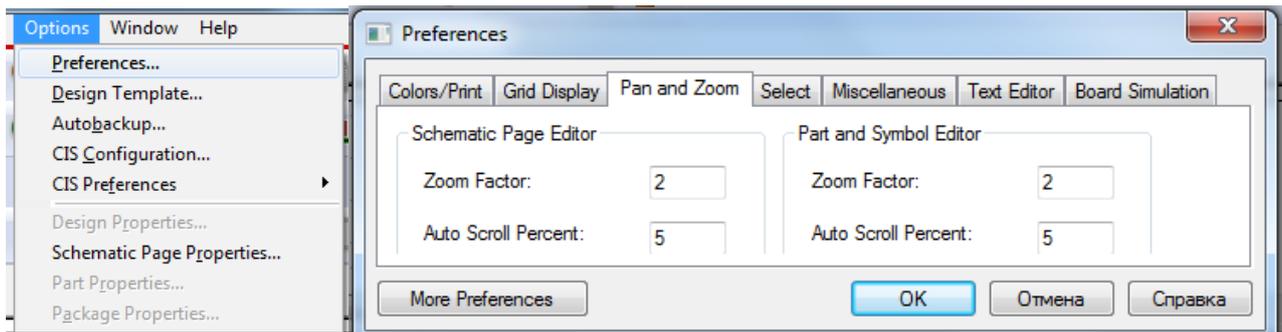


Рис. 1.37

Перемещение по местоположению, ссылке или закладке

Вы можете использовать команду Go To для перемещения курсора в определенные места (координаты сетки, ссылки или закладки) в конкретном редакторе. Координаты X и Y текущего местоположения вашего указателя отображаются на правую часть строки состояния. Сетки ссылок отображаются слева и сверху краев страницы схемы в редакторе схемных страниц.

Чтобы перейти в определенное место:

1. Выберите View - Go To.
2. Выберите вкладку Location.
3. Введите значения X и Y, выберите параметр Absolute option и нажмите «ОК». Координаты измеряются в дюймах или метрических единицах, в зависимости от того, что вы указали на вкладке Design Template / Design Properties dialog box.. Ваш указатель перемещается в новые координаты.

Чтобы переместить на определенное расстояние:

1. Выберите View - Go To.
2. Выберите вкладку Location.
3. Введите значения X и Y, на которые вы хотите переместить указатель, выберите параметр Relative, затем нажмите ОК. Расстояние перехода измеряется в дюймах или метрических единицах. Ваш указатель переместится на указанное расстояние.

Чтобы перейти к определенной ссылке на сетку:

1. Выберите View - Go To.
2. Выберите вкладку Grid Reference.

3. Введите горизонтальную и вертикальную информацию, соответствующую ссылке на сетку, затем нажмите «ОК».

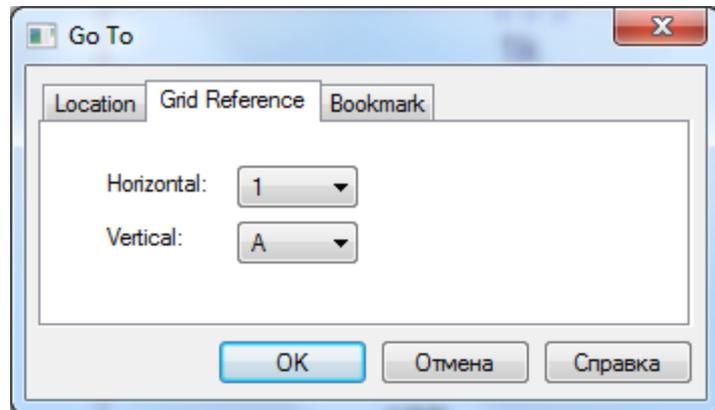


Рис. 1.38. Переход по ссылке на сетку

Чтобы перейти к определенной закладке:

1. Выберите View - Go To.
2. Выберите вкладку Bookmark - «Закладка».
3. Введите имя закладки и нажмите «ОК».

Использование масштаба Zoom

В редакторе схемы и редакторе разделов вы можете увеличить масштаб, чтобы внимательно посмотреть на конкретную область.

Когда вы нажимаете клавишу буквы I для увеличения масштаба, Capture центрирует вашу схему по текущей позиции указателя.

Вы также можете масштабировать определенный объект на странице с помощью правой кнопки мыши. Нажмите на пустой области, близкой к объекту, и удерживая нажатой кнопку мыши, перетащите область над той частью, которую вы хотите увеличить. Коэффициент масштабирования - 3.

Чтобы увеличить масштаб выберите View - Zoom, затем выберите команду Zoom In. Текущий масштаб умножается на коэффициент масштабирования. Так, например, коэффициент масштабирования в 2 приводит к тому, что изображение будет отображаться в два раза большим и отображает на половину площади предыдущего вида.

Или удерживайте клавишу CTRL и поверните колесико мыши.

Как установить коэффициент масштабирования, показано на рис. 1.39.

Увеличить масштаб можно кнопкой  из панели инструментов или вводом буквы «I».

Уменьшить масштаб можно кнопкой , вводом буквы «O», вводом команды Zoom Out в меню View – Zoom.

Фиксированный масштаб можно установить, выполнив View-Zoom-Scale (Рис. 1.39).

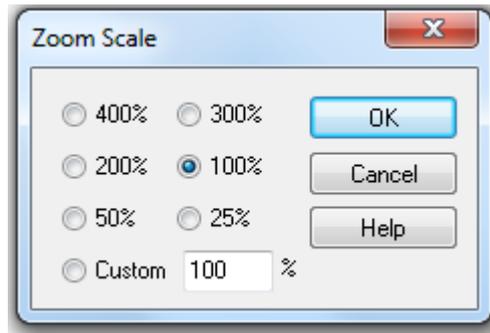


Рис. 1.39. Установка фиксированного масштаба

Вы можете просмотреть часть или всю страницу схемы сразу. Для страницы схемы Capture использует размеры, заданные на вкладке Page Size в диалоговом окне Schematic Page Properties.

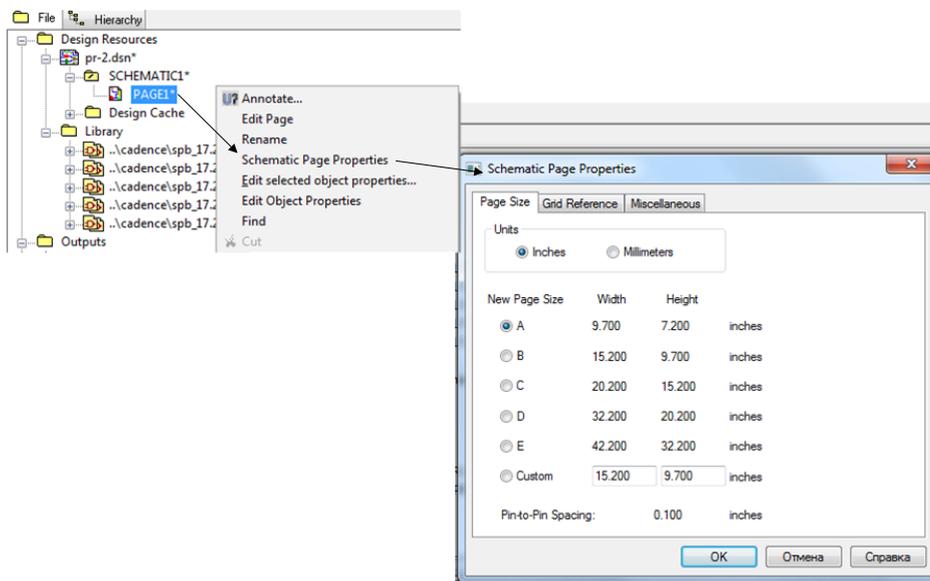


Рис. 1.40. Установка размеров страницы

1. Выберем View - Zoom - All. Вся схематическая страница или часть будет уменьшена, чтобы соответствовать окну.

Такой результат можно получить, нажав кнопку  панели инструментов.

Часть схемы можно увеличить, выполнив View-Zoom-Area, или используя кнопку .

Установка закладок

Если вы обнаружите, что вам нужно повторно возвращаться в определенную область страницы схемы или если вам нужно особое внимание к определенному месту, очень удобна закладка. Когда вы устанавливаете закладку, вы присвойте ему имя. Затем вы можете использовать команду Go To, чтобы вернуться в это место, и вы можете использовать название закладки, чтобы направить другого члена вашей команды на это место.

Как поместить закладку:

1. В меню Place выберите команду Bookmark.
2. Введите имя закладки и нажмите «ОК».
3. Поместите указатель там, где вы хотите поместить закладку, и щелкните левой кнопкой мыши. Закладка отображается в цвете выбора.
4. Выберите End mode во всплывающем меню правой кнопки мыши.
5. Щелкните область, где нет частей или объектов, чтобы отменить выбор закладки.

Для перемещение на закладку в меню View > Go To выберите Bookmark, введите имя закладки и нажмите ОК (Рис. 1.41).

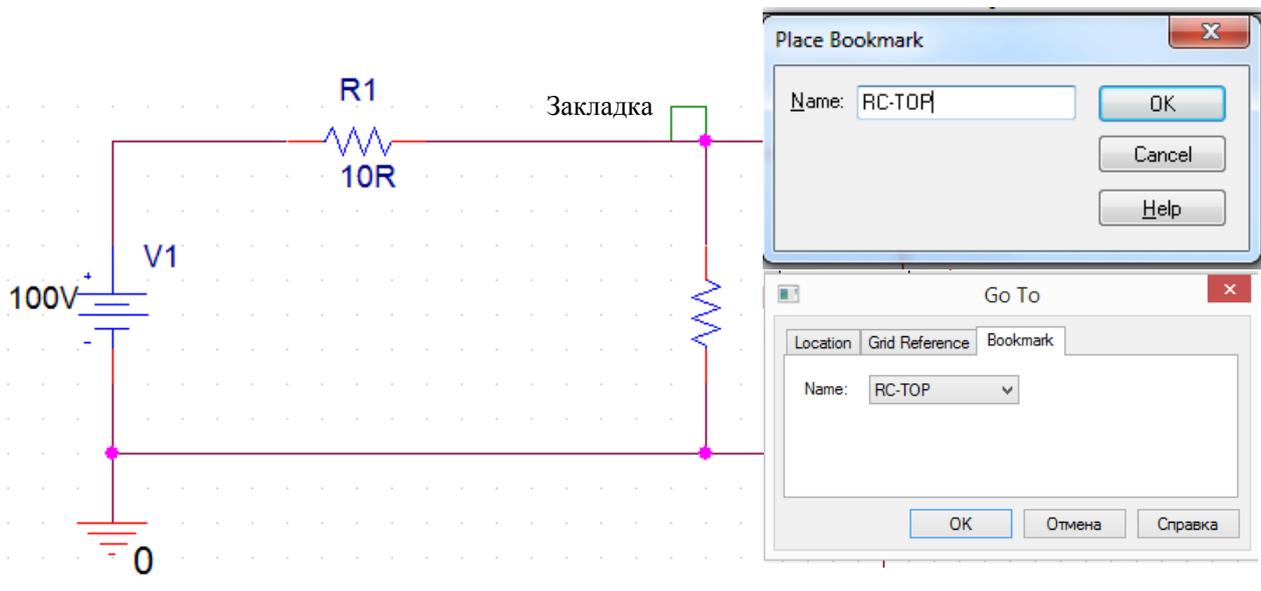


Рис. 1.41. Установка и переход к закладке

Нелинейный редактор (Fisheye)

Функция Fisheye в Capture позволяет работать с схемами в нелинейном режиме. Два основных режима включают Fisheye focus и режим Dynamic Fisheye View. Fisheye focus позволяет настроить фокус на определенные объекты на вашей схеме. Настройка фокусировки «Fisheye View» на один или несколько объектов на схеме обеспечивают отображение этих объектов в увеличенном виде. Когда это происходит, другие видимые объекты не перемещаются со страницы, а уменьшаются. Это гарантирует, что вы все еще можете просмотреть страницу, но с выбранным фокусом.

Режим Fisheye View зависит от страницы, а не от конкретного дизайна. Кроме того, перемещение в Fisheye View и из него сохранит состояние предыдущего режима. Вы можете использовать все операции масштабирования в дополнение с фокусной особенностью Fisheye View. Все функции Capture доступны в этом режиме.

Функцию поиска Capture можно использовать в сочетании с функцией Fisheye. Нахождение объект на странице выделит объект и установит фокус на

него. Если вы нажмете Shift + F11 , то немедленно установите фокус Fisheye для выбранного объекта.

Рыбий глаз - Fisheye

Вы можете использовать режим Fisheye, чтобы масштабировать только определенные объекты на вашей схеме.

Чтобы использовать функции Fisheye Capture, вам нужно переключиться в режим Fisheye.

Чтобы переключиться в режим Fisheye, выполните следующее:

1. Выделите нужный объект.
2. Щелкните правой кнопкой мыши на странице.
3. Выберите пункт меню Fisheye View
4. Затем выберите Set Fisheye Focus или нажмите Shift>F11.

Fisheye focus

Вы можете настроить Fisheye focus на выбранные объекты на вашей схеме, в результате чего только эти объекты будут увеличиваться в то время как остальная часть видимой области остается в поле зрения, но будет уменьшена.

Чтобы настроить фокусировку *Fisheye*:

1. Выберите один или несколько объектов на странице. (Используйте Ctrl + Click, чтобы выбрать несколько объектов).
2. Щелкните правой кнопкой мыши на странице.
3. Выберите пункт меню Set Fisheye focus или введите с клавиатуры Shift + F11.

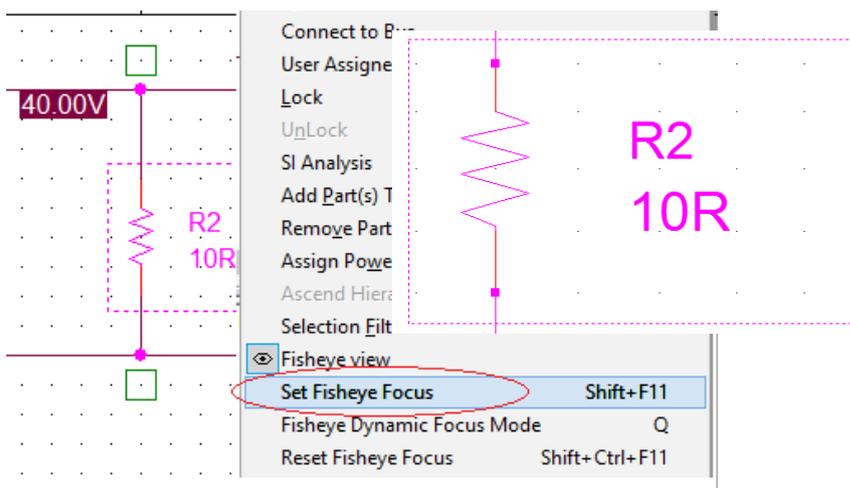


Рис. 1.42. Установка режима Fisheye focus

Для удаления Fisheye focus:

1. Щелкните правой кнопкой мыши на странице.
2. Выберите пункт меню Reset Fisheye focus или наберите на клавиатуре: Ctrl + Shift + F11

Режим динамического фокуса рыбий глаз

В режиме Fisheye Dynamic Focus (динамический фокус) фокус страницы смещается, когда вы перемещаете указатель мыши на странице. Когда указатель мыши нависает над частью страницы, только эта часть страницы фокусируется. Область фокусировки увеличивается, а остальная часть видимой области теряет относительное увеличение.

Настройка режима динамической фокусировки Fisheye Dynamic Focus:

1. Щелкните правой кнопкой мыши на странице.
2. Выберите режим
2. Выберите пункт меню режима Fisheye Dynamic Focus.

Кратчайший путь: нажать на клавиатуре Q.

Кратчайший путь выхода из режима- набрать на клавиатуре: Ctrl + Shift + F11.

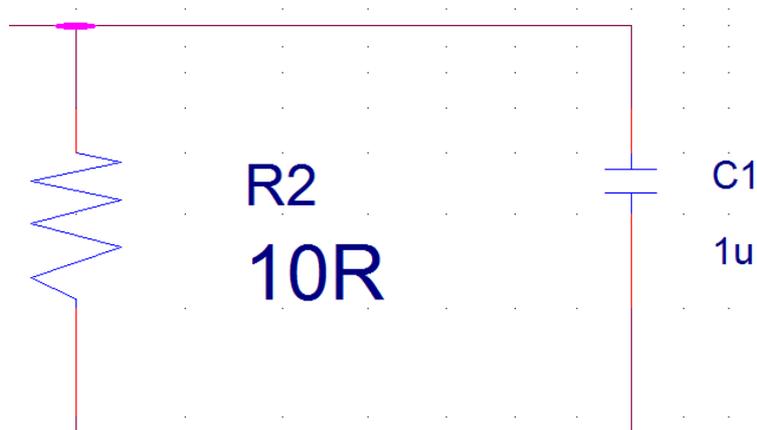


Рис. 1.43. Режим Fisheye Dynamic Focus (динамический фокус)

1.15. Панели инструментов Capture

Пользовательский интерфейс OrCAD Capture включает в себя несколько панелей инструментов, которые предоставляют ярлыки для большинства обычно используемых команд в Capture. Окна включения и настройки панелей можно открыть, выбрав Tools>Toolbar>Customize (рис. 1.44).

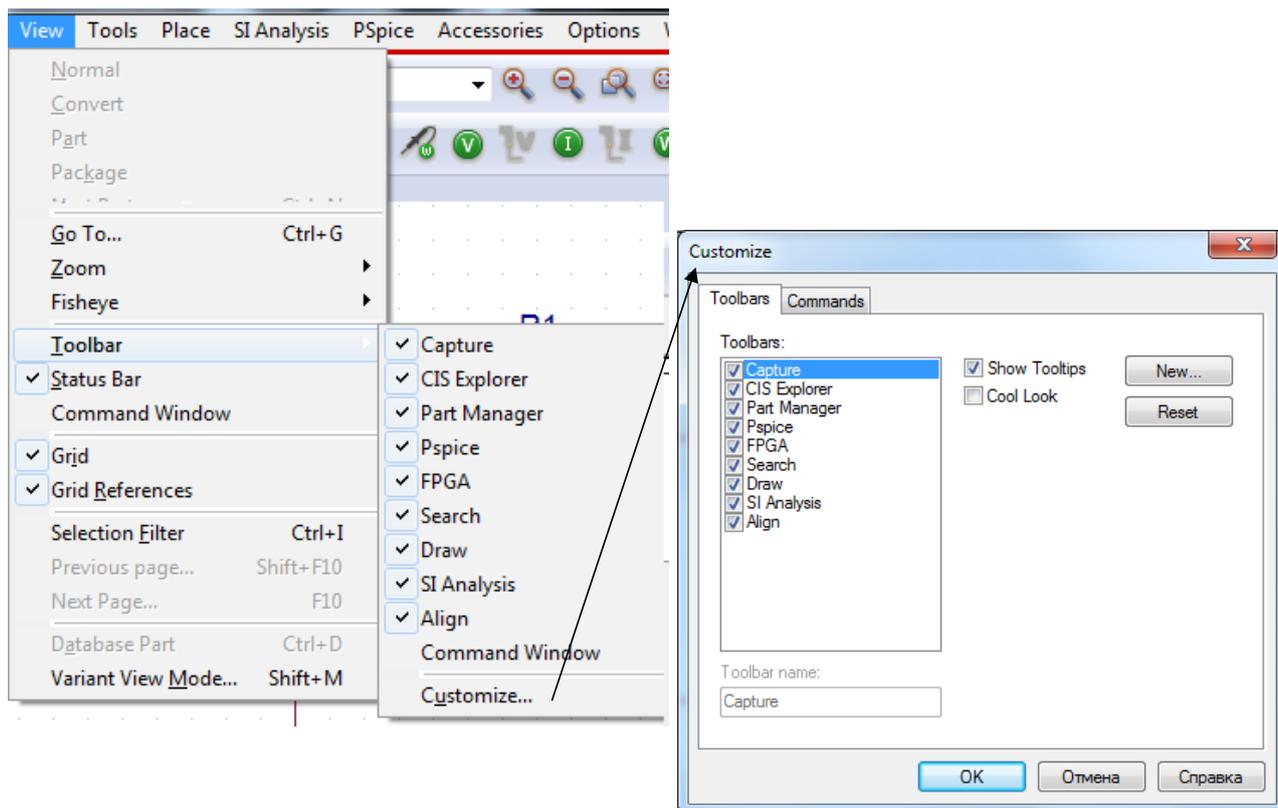


Рис. 1.44. Окно настройки панелей

В окне Commands, выделив кнопку, можно прочитать описание ее назначения (рис.1.45). Рекомендуем Вам сделать это для актуальных панелей, чтобы предварительно ознакомиться с возможностями программы OrCAD 17.2.

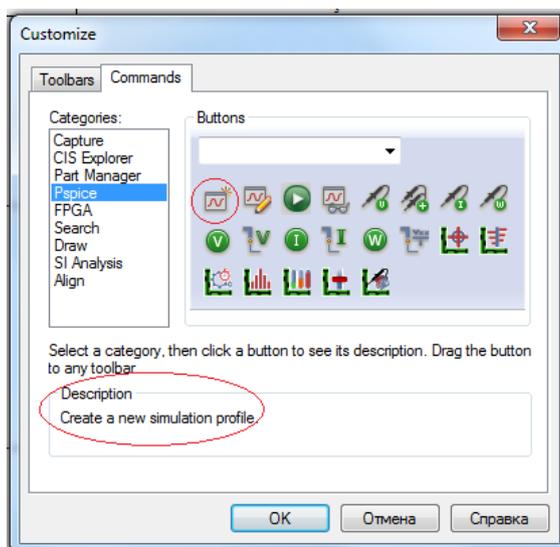


Рис. 1.45. Описание назначения кнопок панелей

Панели инструментов в Capture можно состыковать или сделать плавающими. Это дает гибкость размещения панели инструментов в любом месте на экране. Вы можете разместить плавающую панель даже вне области приложения. Чтобы сделать панель инструментов плавающей, дважды щелкните по об-

ласти панели инструментов (убедитесь, что вы не нажимаете ни на одну кнопку из панелей инструментов).

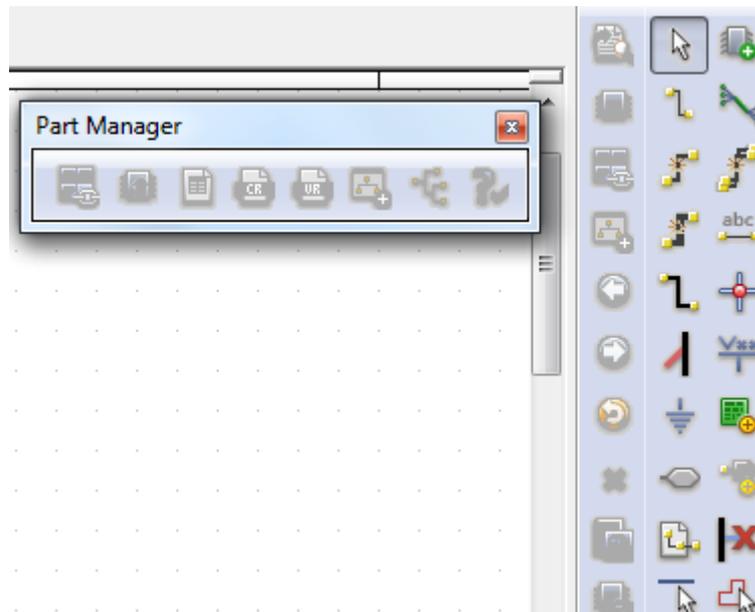


Рис. 1.46. Плавающая панель

Для закрепления плавающей панели инструментов у «правого дока» снова дважды щелкните по строке заголовка.

Панель можно сделать скрытой, повернув «булавку» в горизонтальное положение (рис. 1.47).

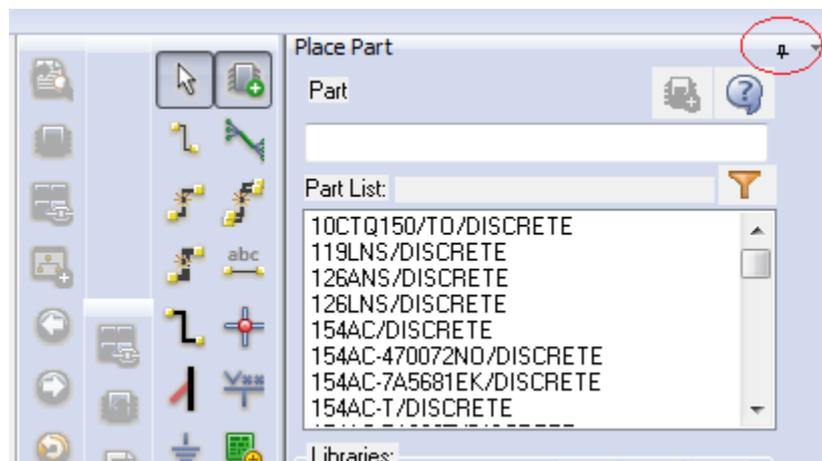


Рис. 1.47. Создание скрытой панели

Работа с несколькими окнами

В Capture каждый документ, который вы открываете, находится в отдельном окне. Вы можете открыть столько окон, сколько позволяют ресурсы вашего компьютера. Например, если вы хотите работать с тремя страницами схемы или тремя частями, каждый открывается в своем собственном окне. Если вы работаете одновременно с несколькими проектами, каждый из них открывается в

своем окне менеджера проекта. Изменения применяются только к текущей выбранной панели инструментов. Все открытые документы - это окна с вкладками. Вы можете щелкнуть правой кнопкой мыши на вкладке, чтобы восстановить, свести к минимуму, максимизировать, сохранить или закрыть окна. Вы также можете щелкнуть правой кнопкой мыши по строке заголовка журнала сеанса и Project Manager, чтобы установить их как прикрепленные, плавающие или дочерние окна.

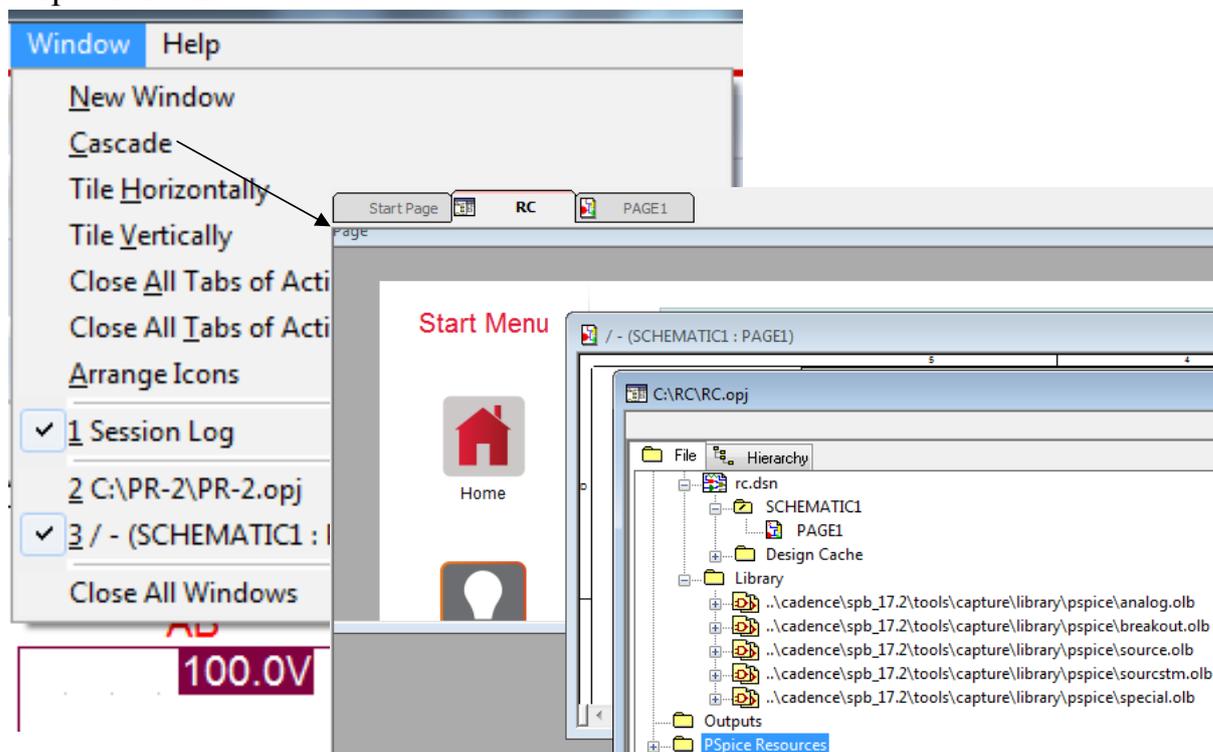


Рис. 1.48. Каскадное расположение окон

OrCAD Capture предоставляет опции для позиционирования и ориентации разных окон в рабочей области Capture. Это удобная функция, когда вы работаете с несколькими окнами одновременно. Например, вам может потребоваться менеджер проекта, редактор страницы схемы и журнал сеанса. Поэтому, возможно, вы захотите поместить диспетчер проекта слева, редактор схемной страницы справа, а журнал сеанса в нижней части рабочего пространства Capture. Чтобы вы могли перемещать и упорядочивать рабочую область Capture, вы можете состыковать окна, установить их как плавающие или как дочерние окна MDI.

Чтобы получить доступ к этим опциям меню, щелкните правой кнопкой мыши строку заголовка в случае менеджера проекта, схемного редактора для страниц, редактора схем и редактора свойств.

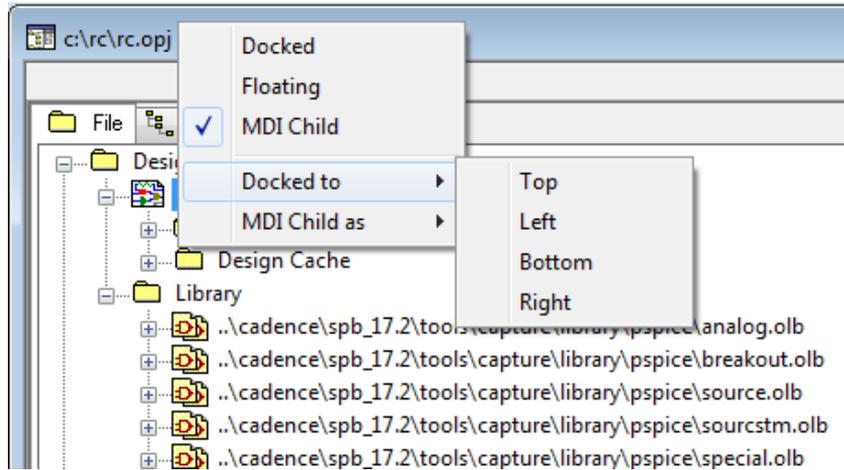


Рис. 1.49. Управление окнами

1.16. Поиск в режиме Capture

В Capture вы можете искать конкретный текст комментария на компонент, или вы можете искать пин по имени или по одному из значений его свойств. Используя команду Find и значение свойства компонента, вы можете найти компонент в папке схемы или на схематической странице. На панели инструментов Find вы вводите строку значений свойства и указываете, что хотите найти компонент. Capture ищет все компоненты, чтобы найти те, у которых свойства имеют значение, соответствующее указанному в строке.

Поиск объекта в проекте

1. В диспетчере проектов выберите папки схем или страниц схемы, в которых вы хотите выполнить поиск.

2. В меню Edit выберите команду Find. Появится панель поиска (рис. 1.50). Для указания компонента на схеме выберите Highlight.

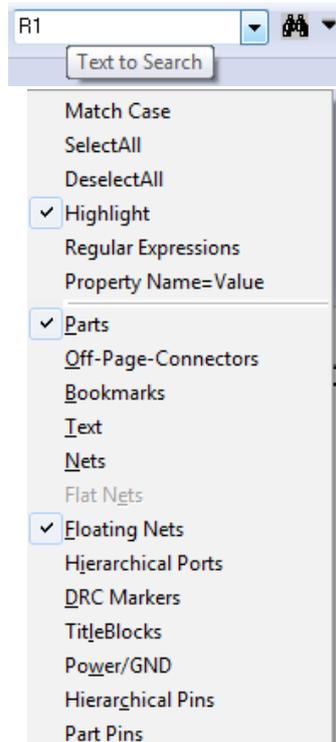


Рис. 1.50. Панель поиска

3. В текстовом поле Text to Search введите строку значений свойства для того компонента, который вы ищете. Например, для поиска резистора, введите R1. Вы также можете выполнить поиск компонента по свойству, например, номинальному значению.

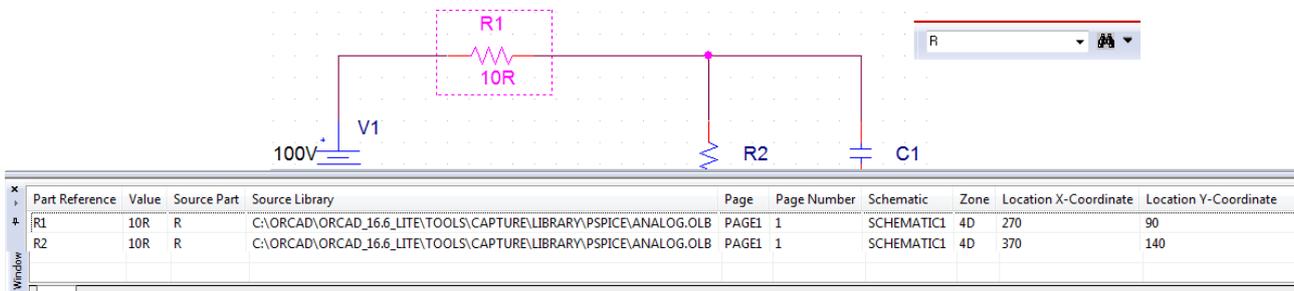


Рис. 1.51. Поиск компонента

По завершении поиска и возвращении хотя бы одного результата результат отображается в окне Find. Это окно с закладкой. Каждый результат поиска будет отображаться как одна позиция в окне. В позициях результатов содержатся и другая информация, кроме ссылки на объект поиска, которая включает в себя страницу, схему и свойства специфичные для данного типа объектов.

Если поиск возвращает несколько типов объектов, каждый тип отображается в окне в другой вкладке. Если вы дважды щелкните позицию в этом окне, соответствующий объект будет выбран на конкретной схематической странице.

Это окно можно установить как прикрепляемое или плавающее, дважды щелкнув по строке заголовка. В режиме стыковки, используйте значок булавки, чтобы чередовать окно от закрепленного до плавающего. В отключенном со-

стоянии окно поиска остается пристыкованным, но скользит внутрь и вне поля зрения, когда вы перемещаете курсор над значком окна.

1.17. Диалоговое окно «Настройки»

Диалоговое окно настроек изображения в рабочем окне можно открыть, выбрав в главном меню Options>Preferences (Рис. 1.52).

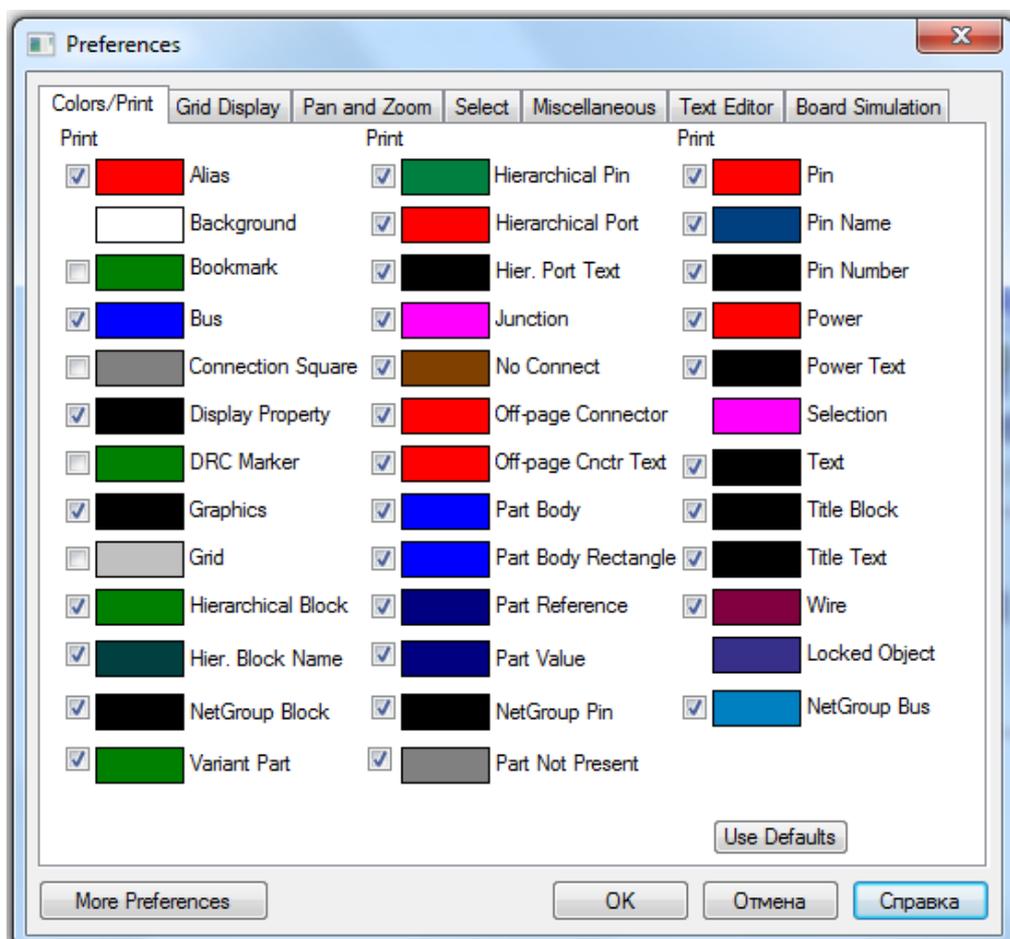


Рис. 1.52. Окно настроек изображения на рабочем столе

Вкладка Color/Print (Цвета/Версия для печати) позволяет определить цвет по умолчанию таких объектов, как псевдонимы, провода, варианты дизайна, отсутствующие компоненты и контакты. Когда вы нажимаете на цвет элемента, появляется стандартное диалоговое окно стандартных цветов Windows для данного элемента. Флажки рядом с объектами определяют, будут ли объекты напечатаны или построены. Если поле объекта выбрано, объект может быть напечатан. Объекты всегда появляются на вашем экране, независимо от установки их флажков (рис. 1.53). Кнопка Use Defaults сбрасывает цвета в цвета по умолчанию, поставляемые с Capture.

Примечание. В ссылках на границе и сетке страниц схемы используется цвет, указанный для титульных блоков.

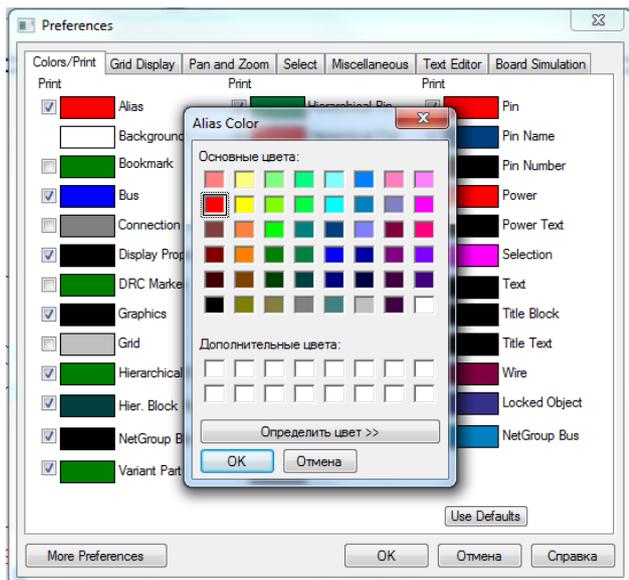


Рис. 1.53. Установка цветов объектов

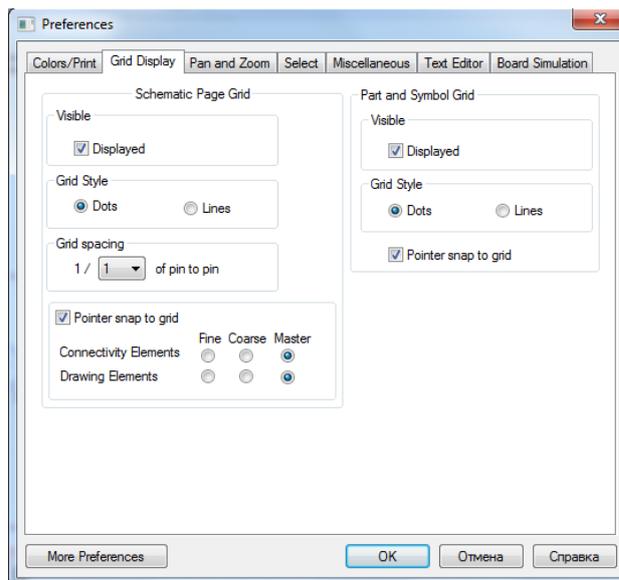


Рис. 1.54. Отображение сетки

Вкладка Grid Display (Отображение сетки) позволяет контролировать поведение и внешний вид сетки экрана для редактора схем и редактора деталей (рис. 1.54).

Вкладка Pan and Zoom (Панорамирование и масштабирование) задает параметры автоматической прокрутки и коэффициент масштабирования как для редактора схемных страниц, так и для редактора компонентов (рис. 1.55).

Вкладка Select (Выбор) позволяет задавать параметры выбора, изменять максимальное количество объектов, которые вы можете перетащить, и устанавливает видимость палитры инструментов как для редактора схемных страниц, так и для редактора деталей (рис. 1.56).

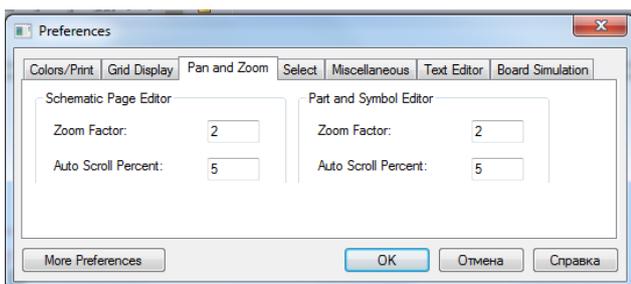


Рис. 1.55. Панорамирование и масштабирование

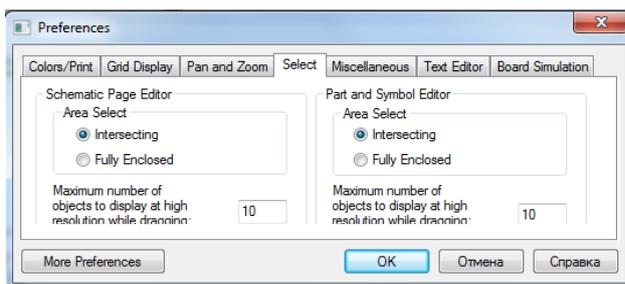


Рис. 1.56. Вкладка Select

На вкладке Miscellaneous (Разное) можно указать стиль заполнения, стиль линии и ширину линии для редактора схем и редактора деталей. Также можно указать цвет линии для редактора схемных страниц, определить шрифт журнала сеанса, задать набор текста, задать интервалы автоматического восстановления и включить обмен данными между устройствами (рис. 1.57).

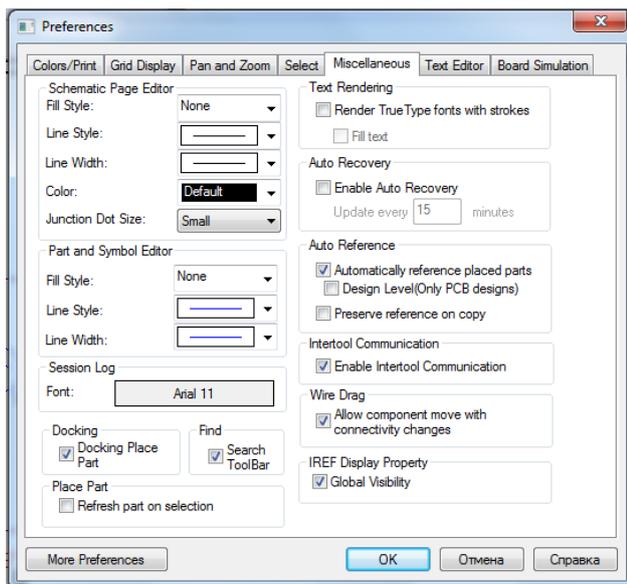


Рис. 1.57. Вкладка «Разное»

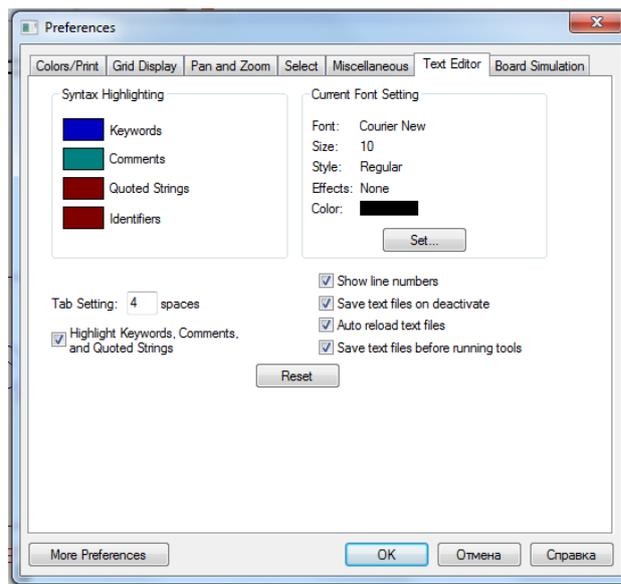


Рис. 1.58. Вкладка «Текстовый редактор»

На вкладке «Текстовый редактор» (рис. 1.58) укажите шрифт и информацию о цвете для текстового редактора. Также укажите настройку вкладок с точки зрения интервала между символами и выделения параметров.

На вкладке Board Simulation «Моделирование платы» укажите язык разработки аппаратного обеспечения, который будет использоваться во время моделирования на уровне платы.

1.18. Справочная документация OrCAD

Выбрав в главном меню Help>Documentation, вы откроете окна с Web-ресурсами Cadence, которые всегда помогут Вам найти решение возникающих проблем (рис. 1.59).

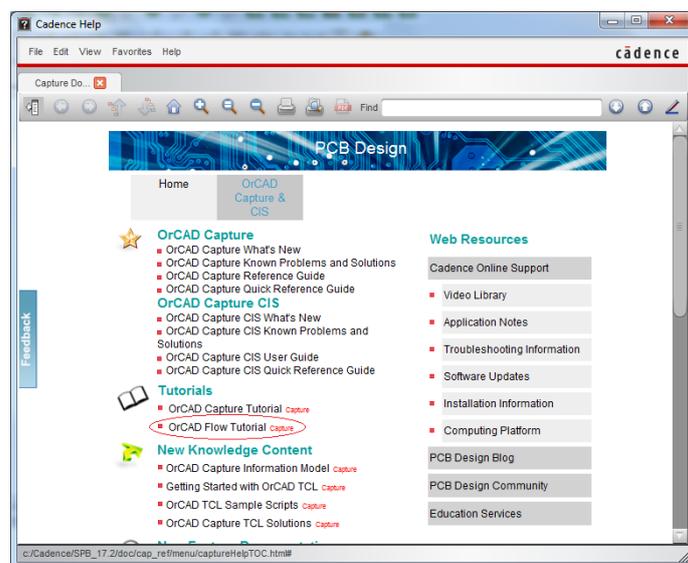


Рис. 1.59. Web-ресурсы Cadence

Мы будем обращаться к этим ресурсам при необходимости.

Теперь начинаем более подробное изучение возможностей OrCAD 17.2 для анализа электрических цепей и электронных схем.

1.19. Контрольные вопросы

1. Что такое Spice – модели электронных компонентов ?
2. Структура и состав пакета программ OrCAD 17.2 Lite.
3. Состав и назначение программ OrCAD PSpice.
4. Перечислите основные ограничения учебных программ OrCAD 17.2 Lite.
5. Назовите основные этапы моделирования в OrCAD.
6. Какие стандартные библиотеки используют при моделировании в OrCAD и где они расположена ?
7. Приведите примеры современных электронных устройств, которые можно спроектировать в OrCAD.
8. Перечислите последовательность действий при создании проекта в OrCAD.
9. Что включает в себя менеджер проекта и как с ним работать ?
10. В чем разница между понятиями a part и a symbol ?
11. Расскажите о создании схем в Capture Lite.
12. Как создают профиль моделирования и как можно переключать профили ?
13. Как наблюдать результаты моделирования цепи постоянного тока ?
14. Для чего служит окно Probe ?
15. Что содержат выходные файлы в окне Probe и в менеджере проектов?
16. Как можно использовать редакторы схем и компонентов в Capture ?
17. Для чего служит нелинейные редактор Fisheye ?
18. Как выполнить включение и настройку панелей инструментов и окон в Capture?
19. Как выполняют поиск в режиме Capture?
20. Как можно использовать диалоговое окно настроек изображения ?

Глава 2. Анализ электрических цепей постоянного тока

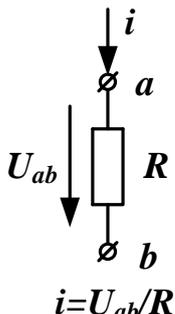
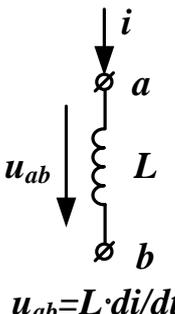
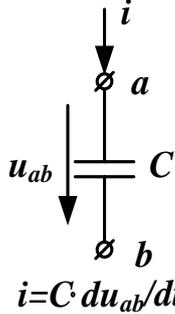
2.1. Краткие теоретические сведения

2.1.1. Элементы, структура и основные законы

электрических цепей

Идеальные пассивные элементы

Это резистор R [Ом], индуктивность L [Гн], емкость C [Ф].

 <p style="text-align: center;">$i = U_{ab}/R$</p>	 <p style="text-align: center;">$u_{ab} = L \cdot di/dt$</p>	 <p style="text-align: center;">$i = C \cdot du_{ab}/dt$</p>
Резистор	Индуктивность	Емкость

Понятие «**постоянное напряжение (ток)**» означает, что во времени значение и направление напряжения (тока) не меняются. Можно сказать, что **частота изменения постоянного напряжения (тока) $\omega = 0$** .

На постоянном токе $i = I = const$ получим $di/dt = 0$. Следовательно, напряжение на индуктивности равно нулю и индуктивность для постоянного тока является коротким замыканием.

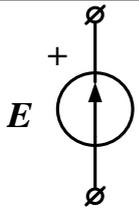
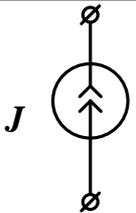
Для емкости на постоянном токе $du/dt = 0$. Следовательно, ток через емкость равен нулю и емкость на постоянном токе эквивалентна разрыву.

Линейные пассивные элементы имеют линейные зависимости между током и напряжением (или их производными для индуктивности и емкости). Для этого значения R , L , C не должны зависеть от токов и напряжений на этих элементах.

Идеальные активные элементы (источники энергии)

Идеальный источник E напряжения имеет нулевое внутреннее сопротивление ($R_{\text{ин}} = 0$) и напряжение на его зажимах не зависит от тока, который он отдает во внешнюю цепь.

Идеальный источник тока J имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление ($R_{\text{ит}} = \infty$) и ток, который он отдает во внешнюю цепь, не зависит от напряжения на зажимах источника тока.

	
Идеальный источник напряжения	Идеальный источник тока

Реальные активные элементы имеют конечные внутренние сопротивления (Рис. 2.1).

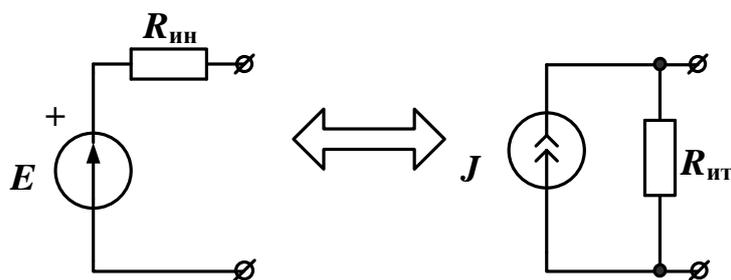


Рис.2.1. Замена источника напряжения и источника тока

Источник напряжения с последовательным внутренним сопротивлением можно заменить на эквивалентный источник тока с параллельным внутренним сопротивлением при условии, что:

$$R_{ин} = R_{ит} = R_{вн}, E = J \cdot R_{вн}, J = \frac{E}{R_{вн}}$$

Линейные источники энергии имеют линейные вольтамперные характеристики. Вольтамперной характеристикой электрической цепи называют зависимость тока, проходящего через элемент от напряжения на его зажимах.

Электрическая цепь постоянного тока является линейной, если все элементы цепи имеют линейные вольтамперные характеристики.

На рис. 2.2 показана схема линейной электрической цепи постоянного тока.

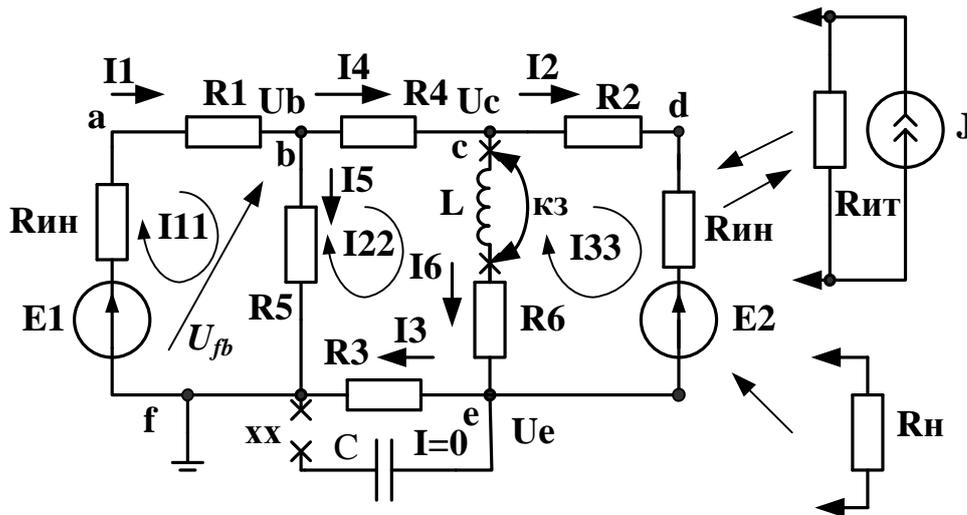


Рис. 2.2. Схема линейной цепи постоянного тока

Структура электрической цепи определяется взаимным расположением ветвей, узлов и контуров. **Ветвь** это участок цепи, через который проходит один и тот же ток. **Узел** – место соединения трех и более ветвей. **Контур** – замкнутый путь, последовательность ветвей и узлов, в которой каждая ветвь и каждый узел входит один раз. В схеме рис. 2.2. мы видим 6 ветвей (не считая разомкнутой емкости), 4 узла и 3 контура. Один из узлов (например, *f*) заземляют и считают общим.

2.1.2. Основные законы электрических цепей

Обобщенный закон Ома для участка цепи, содержащего источник напряжения:

Ток в ветви равен напряжению на зажимах ветви, взятому по направлению тока, плюс (минус) источники напряжения, деленному на сумму сопротивлений ветви.

Ток в первой ветви $I_1 = \frac{U_{fb} + E_1}{R_{ин} + R_1}$. Знак плюс берут для источников

напряжения, совпадающих по направлению с током.

Первый закон Кирхгофа:

Сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю (или сумма входящих в узел токов равна сумме выходящих токов).

Для узла *b*: $I_1 = I_4 + I_5$.

Второй закон Кирхгофа:

В замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на пассивных элементах равна алгебраической сумме источников напряжения. При этом со знаком плюс берут падения напряжения на тех пассивных элементах, в которых токи совпадают с направлением обхода контура. Со знаком плюс

берут источники напряжения, совпадающие по направлению с направлением обхода контура.

2.1.3. Расчет цепи методом контурных токов (МКТ)

Рассчитать контурные токи в цепи (рис. 2.1).

Независимые контуры и контурные токи I_{11} , I_{22} , I_{33} обозначены на схеме (рис. 2.2).

Записываем канонические уравнения по методу МКТ для трехконтурной схемы :

$$\begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{pmatrix}$$

Диагональные сопротивления контурной матрицы сопротивлений с одинаковыми индексами находим как сумму всех сопротивлений контура при последовательном обходе. Недиагональные сопротивления с разными индексами равны сопротивлениям смежных ветвей контуров, причем со знаком плюс берут те сопротивления смежных ветвей, в которых контурные токи направлены одинаково. Контурные ЭДС равны алгебраической сумме всех ЭДС контура. Со знаком плюс берут ЭДС, совпадающие по направлению с обходом контура.

2.2. Расчетное задание №2.1.

Схема электрической цепи изображена на рис. 2.3. Найти токи во всех ветвях и напряжения U_{bd} и U_{cd} .

Рекомендации:

1. Замените источник тока на источник напряжения.
2. Параллельно включенные сопротивления R_3 и R_4 замените эквивалентным.
3. В полученной одноконтурной цепи по второму закону Кирхгофа рассчитайте ток I_2 .
4. Вычислите напряжения U_{cd} и U_{bd} по закону Ома.
5. Вычислите токи I_3 и I_4 по закону Ома.
6. По первому закону Кирхгофа вычислите ток I_1 .
7. Запишите численные ответы для токов и напряжений.

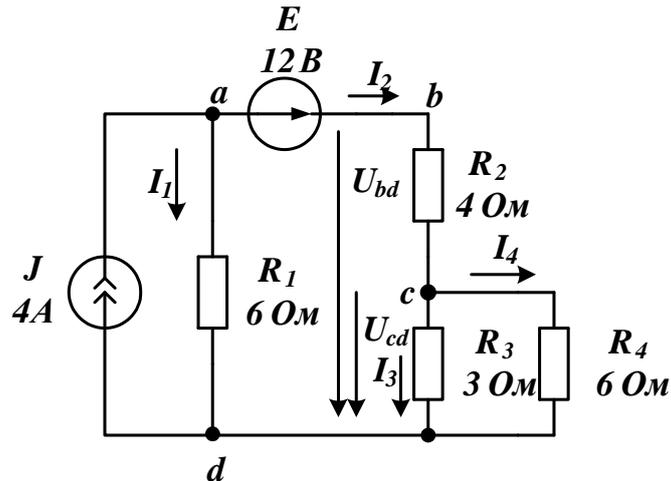


Рис. 2.3. Схема к заданию №1

2.3. Компьютерное моделирование задания №2.1

Создайте новый проект PR-2, пользуясь указаниями из §1.8. Источники постоянного тока и напряжения установите из каталога Place > PSpice Components.

Резисторы будем выбирать как компоненты, выполнив Place > Part.

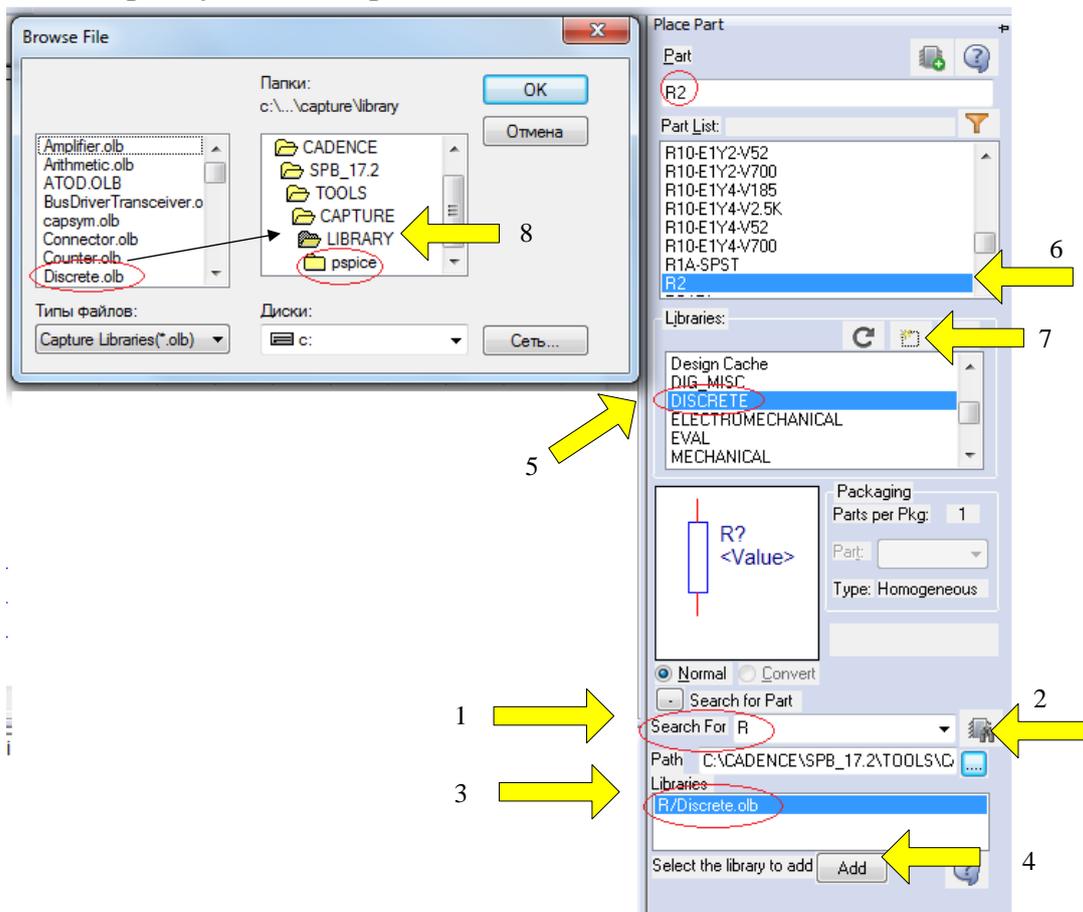


Рис. 2.4. Поиск компонента на панели Place Part

OrCAD Capture CIS имеет очень много библиотек и поиск нужного компонента часто проходит достаточно трудно..

Поиск резистора можно выполнить в следующим образом (рис. 2.4):

1. В окне Search For вводим R .
2. Нажимаем «Поиск».
3. В окне Libraries появляется название библиотеки Discrete.olb, в которой есть этот компонент.
4. Нажимаем Add
5. Библиотека добавлена в список просмотра.
6. Находим в списке компонентов этой библиотеки резистор R2.
7. Добавляем библиотеку Discrete.olb в проект.
8. Открывается каталог всех библиотек.

Мы, к сожалению, видим, что библиотека Discrete.olb находится в папке LIBRARY из каталога CAPTURE и расположена выше папки библиотек pspice.

Может оказаться так, что компонент R2 не имеет модели PSpice и моделирование с ним в PSpice невозможно.

Поэтому целесообразно сначала поискать нужные для схемы компоненты именно в библиотеке pspice.

Для этого:

1. Нажимаем Add Library.
2. В каталоге pspice выбираем analog
3. Выделяем ANALOG в окне просмотра библиотек и выделяем R в списке компонентов.
4. В каталоге библиотек нажимаем «Открыть» и добавляем библиотеку analog в проект.
5. Нажимаем Place Part и помещаем резистор в окно схемного редактора (рис. 2.5).

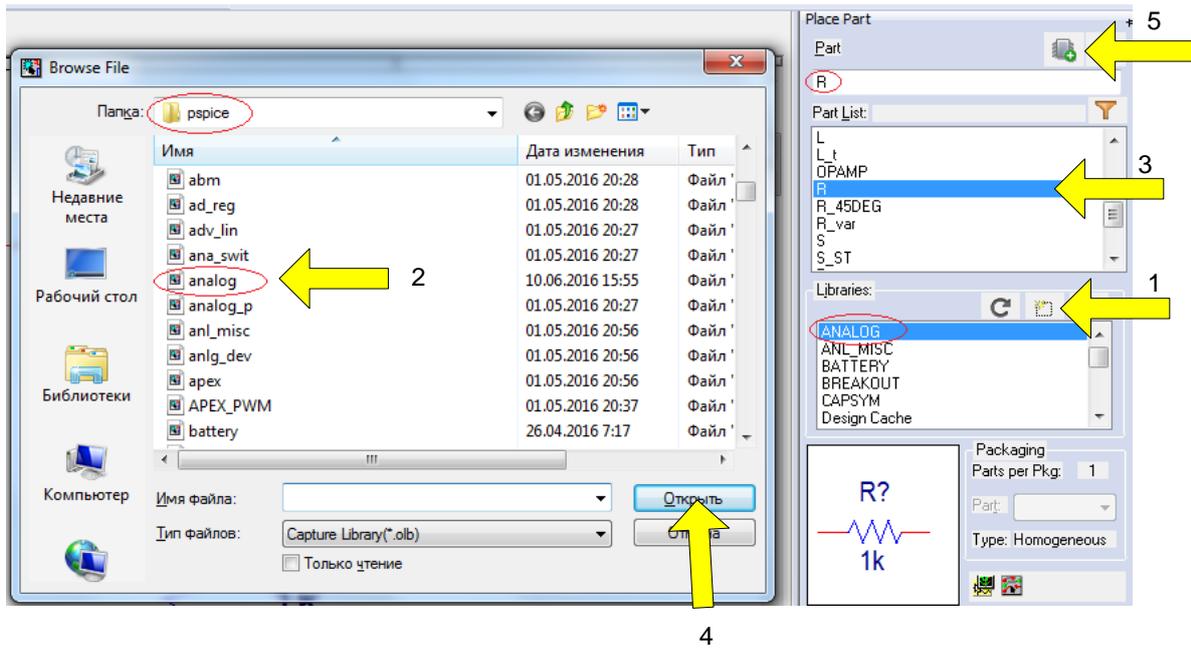


Рис. 2.5. Выбор резистора из каталога PSpice

Источники постоянного тока и постоянного напряжения выберите из каталога Place > PSpice Components > Sources.

Выберите из библиотеки CapSym «Землю с нулем», разместите компоненты в соответствии со схемой, проводите соединения.

Установите номиналы резисторов и источников, используя меню Edit Properties. Должна получиться схема (рис. 2.6)

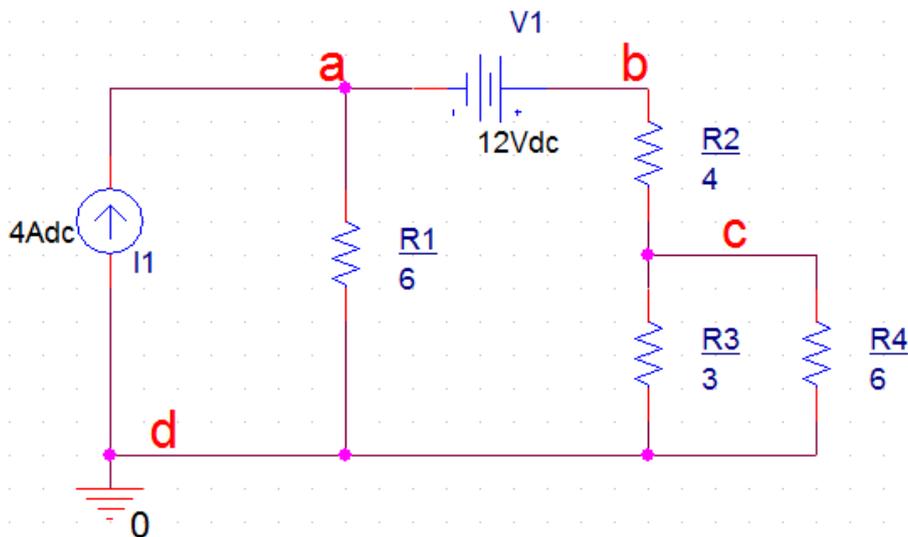


Рис. 2.6. Схема разветвленной цепи постоянного тока

Используя указания из §1.12, установите профиль моделирования для постоянного тока Bias Point и выполните нужные настройки профиля.

После этого сохраните файл проекта и выполните Run PSpice. На рис. 2.7 показаны ожидаемые результаты моделирования.

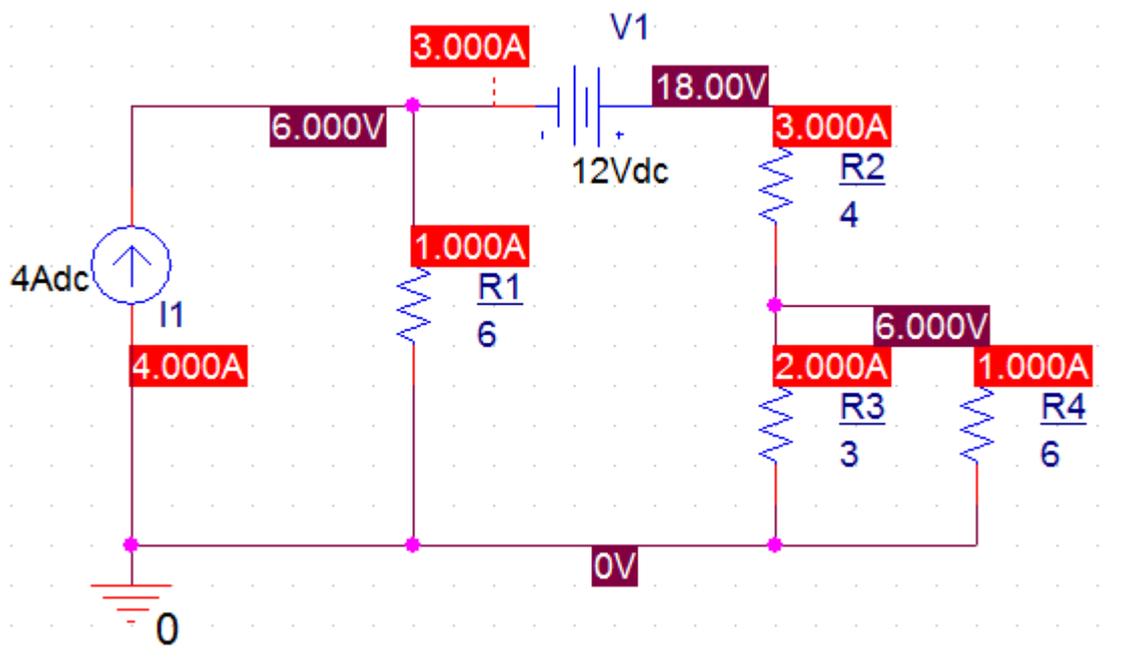


Рис. 2.7. Результаты моделирования схемы

Проверьте соответствие моделирования и результатов расчета. На рис. 2.8. показан фрагмент выходного файла из окна Probe.

```

*****
NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE
(N03623)  6.0000 (N03630)  18.0000 (N03634)  6.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME          CURRENT
V_V1          -3.000E+00
TOTAL POWER DISSIPATION  3.60E+01 WATTS

JOB CONCLUDED
**** 02/05/18 11:53:36 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 ****
** Profile: "SCHEMATIC1-PR-2" [ c:\pr-2\pr-2-pspicefiles\schematic1\pr-2.sim ]
**** JOB STATISTICS SUMMARY
*****

```

Рис. 2.8. Фрагмент выходного файла

2.4. Делитель напряжения

В исследованной схеме напряжение в узле B $U_b=18\text{В}$, а напряжение в узле C $U_c=6\text{В}$. Сопротивления R_2 , R_3 , R_4 образуют делитель напряжения. Парал-

тельное соединение сопротивлений R_3 и R_4 обозначим $R_3 \parallel R_4 = \frac{3 \cdot 6}{9} = 2 \text{ Ом}$.

Напряжение в узле C находим по формуле:

$$U_c = U_b \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4} = 18 \frac{2}{4 + 2} = 6 \text{ В}.$$

Так на резисторах можно получить часть входного напряжения. Эти расчеты совпадают с результатами моделирования (рис. 2.7).

2.5. Делитель токов

К узлу C из резистора R_2 подходит ток $I_2 = 3 \text{ А}$ и делится на ток I_3 и I_4 пропорционально проводимостям третьей и четвертой ветвей. Ток I_4 можно рассчитать по формуле:

$$I_4 = I_2 \frac{G_4}{G_3 + G_4} = I_2 \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 3 \frac{3}{3 + 6} = 1 \text{ А}.$$

Расчеты совпадают с моделированием (рис. 2.7).

2.6. Метод эквивалентного генератора.

Если в схеме рис. 2.3 требуется найти ток только в одной ветви, например, ток I_2 в ветви bc , то такой расчет проще сделать *методом эквивалентного генератора*. Для этого отключим временно резистор R_2 и найдем напряжение холостого хода U_{bcx} между точками bc . Затем найдем входное сопротивление R_{bcvx} схемы относительно точек bc . Заменяем цепь с нагрузкой R_2 эквивалентным генератором (рис. 2.9), в котором $E_{\text{эКВ}} = U_{bcx}$, $R_{\text{эКВ}} = R_{bcvx}$.

Можно доказать, что в нагрузке R_2 будет выделяться наибольшая активная мощность, если выполняется условие согласования нагрузки с генератором, а именно: $R_n = R_2 = R_{\text{эКВ}}$. При этом максимальная мощность в нагрузке будет

равна:
$$P_{\text{max}} = \frac{E_{\text{эКВ}}^2}{4R_{\text{эКВ}}}.$$

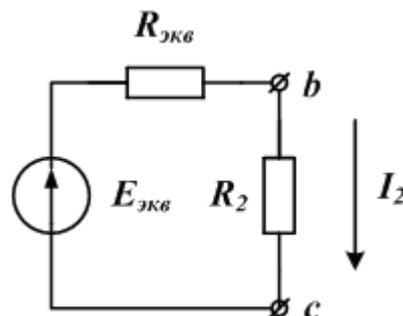


Рис. 2.9. Схема эквивалентного генератора

2.6.1. Расчетное задание №2.2

В схеме рис.2.3 найти ток нагрузки I_2 и мощность в нагрузке методом эквивалентного генератора.

Рекомендации:

1. В режиме холостого хода ток в схеме рис. 2.3 будет проходить только в источнике тока и резисторе R_1 . Напряжение холостого хода найдем по формуле:

$$U_{bcxx} = U_{abxx} + E = IR_1 + E.$$

2. При расчете входного сопротивления R_{bcvx} источник тока эквивалентен разрыву, а источник напряжения эквивалентен короткому замыканию.

2.6.2. Компьютерное моделирование задания №2.2

Найдем сначала напряжение холостого хода U_{bcxx} . Для этого надо отключить резистор R_2 . Однако, ключи в библиотеке символов управляются по времени и недостаточно удобны. Поэтому сделаем R_2 очень большим- 4 Гом. Результаты моделирования (рис. 2.10) показывают, что $U_{bcxx}=36В - 18нВ \approx 36В$.

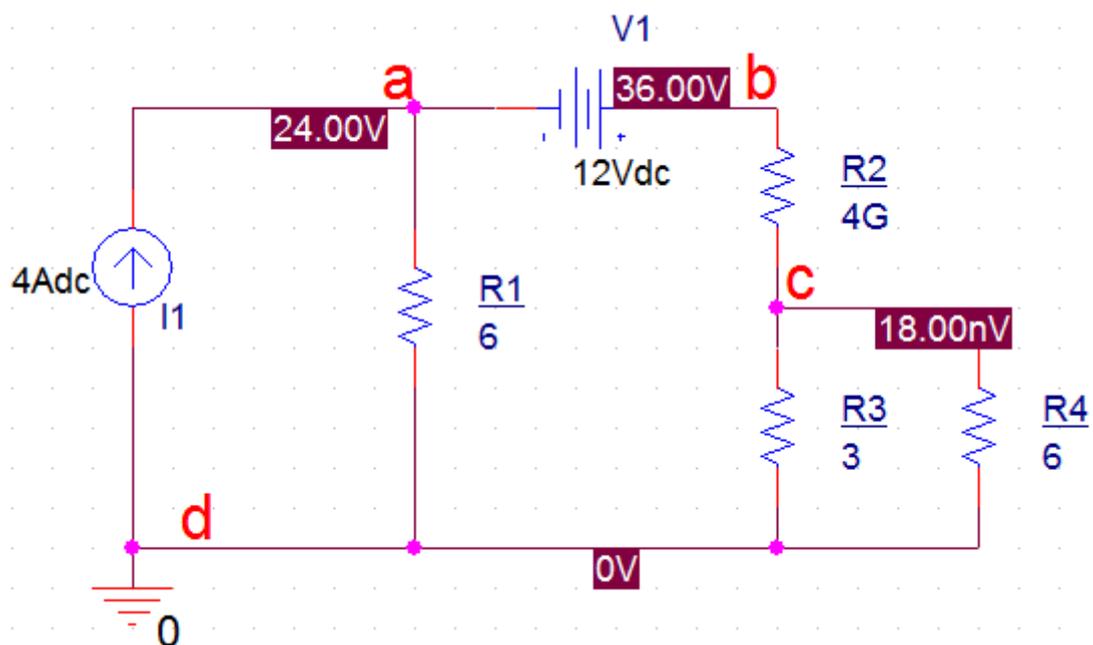


Рис. 2.10. Моделирование в режиме холостого хода

Найдем ток короткого замыкания. Сделаем R_2 очень малым ($R_2=4мОм$). Ток $I_{кз}=4,498 А \approx 5А$ (рис. 2.11).

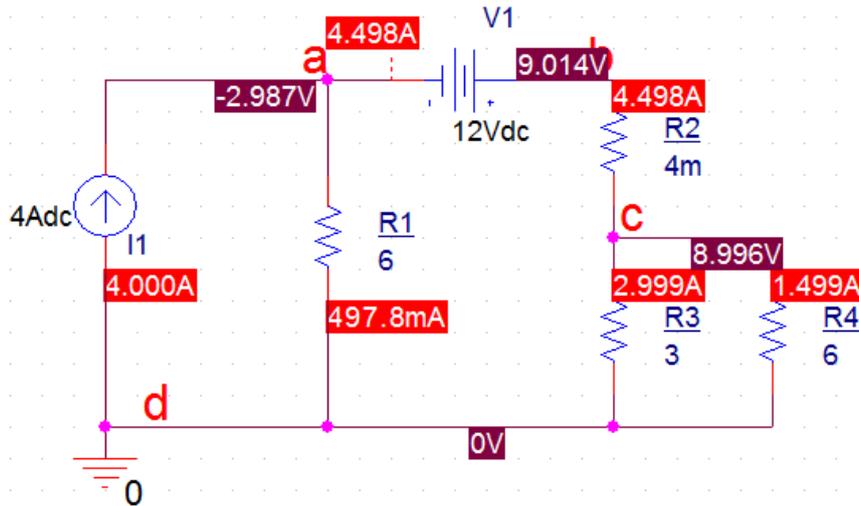


Рис. 2.11. Измерение тока короткого замыкания

Находим сопротивление эквивалентного генератора:
входное сопротивление цепи относительно зажимов bc:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{вхbc}} = 36 / 4,5 = 8 \text{ Ом}$$

Итак, мы нашли $E_{\text{экв}} = U_{\text{bcxx}} = 36 \text{ В}$, $R_{\text{вхbc}} = 8 \text{ Ом}$.

Получаем ток $I_2 = E_{\text{экв}} / (R_{\text{вхbc}} + R_2) = 36 / 12 = 3 \text{ А}$.

2.6.3. Баланс мощности

Для проверки правильности расчетов часто выполняют расчёт баланса мощности. На рис. 2.12 показано измерение мощности в исходной цепи.

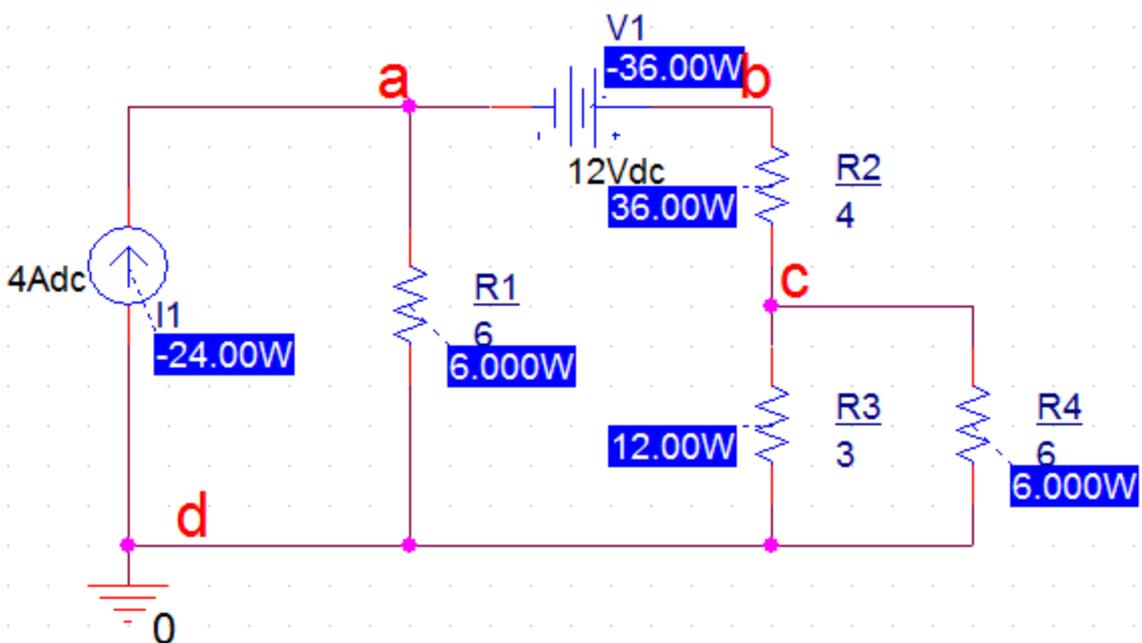


Рис. 2.12. Измерение мощности

Источник напряжения и тока в исходной схеме отдают мощность резисторам и в модели PSpice мы получили отрицательные значения мощности источников. Мощности, выделяемые в резисторах, всегда положительные.

Для модели PSpice баланс мощностей можно записать так:

$$P_{I1} + P_{V1} + P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} + P_{R4} = -24 - 36 + 6 + 36 + 12 + 6 = 0.$$

Отметим, что в отечественных учебниках по электротехнике мощности, отдаваемые источниками энергии, считаются положительными. Поэтому для нас привычной является такая запись баланса мощности:

$$P_{I1} + P_{V1} = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} + P_{R4}$$

2.7. Согласование нагрузки с генератором. Развертка параметров.

Из курса электротехники известно, что максимальная мощность выделяется в оптимальной нагрузке, равной по величине эквивалентному сопротивлению генератора: $R_{opt} = R_{экв}$. Проверим это моделированием.

Для этого надо получить график зависимости мощности в резисторе R_2 при изменении значения этого резистора в достаточно широких пределах. Такое изменение параметров называют параметрической разверткой.

Параметрическая развёртка позволяет менять значения параметра в заданном диапазоне значений и может быть выполнена при запуске переходного процесса, анализа переменного или постоянного режима.

Параметры, которые могут быть изменены, включают источники напряжения или тока, температуры, глобальные параметры или параметры модели. Глобальный параметр может представлять собой математическое выражение, а также переменную и определяется с помощью объекта PARAM из специальной библиотеки.

Задание 2.3. Найти максимальную мощность в нагрузке R_2 цепи постоянного тока, показанной на схеме рис. 2.3.

Схема модели показана на рис. 2.13. В схеме резисторы выбраны из библиотеки Part. Нагрузкой служит резистор R_2 , значение которого мы будем менять, чтобы найти максимальную мощность.

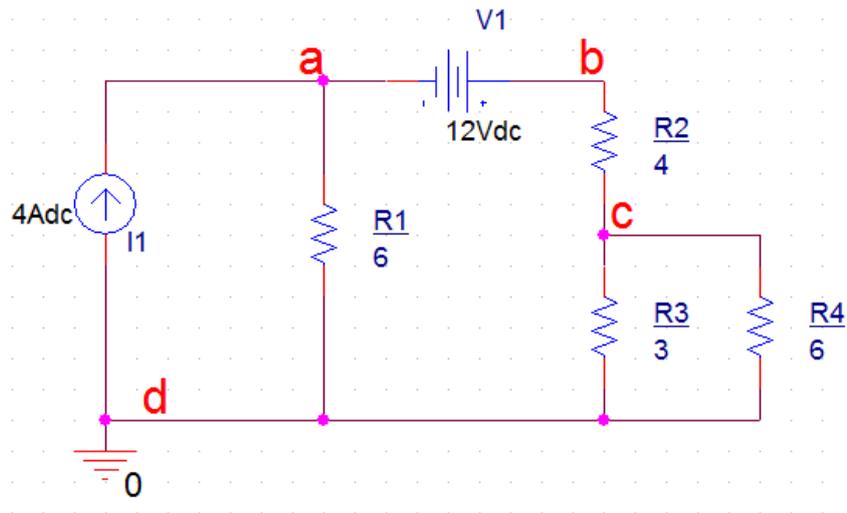


Рис. 2.13. Поиск оптимальной нагрузки

2.7.1. Параметрический анализ мощности при изменении значения резистора

1. Выделяем на схеме значение резистора R2 и в редакторе свойств заменяем это значение на {RES} в фигурных скобках (рис. 2.14).
2. Выполняем Place>Part и Add Library. В каталоге библиотек pspice выделяем special и нажимаем «Открыть».
3. В меню библиотеки SPECIAL выбираем PARAM (рис. 2.15).

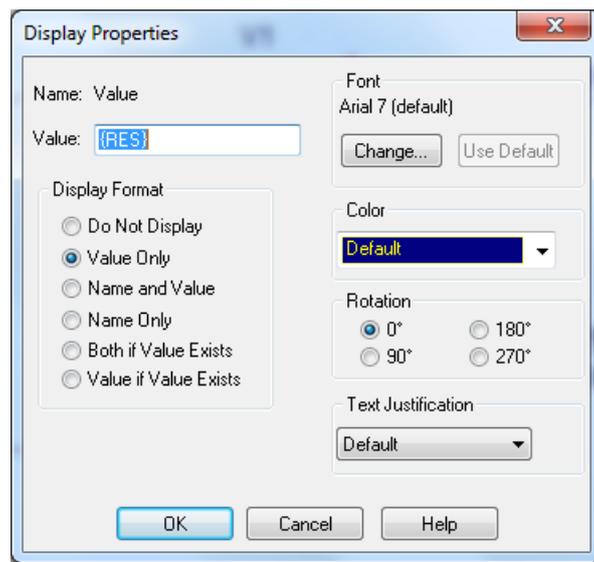


Рис. 2.14. Установка переменной {RES}

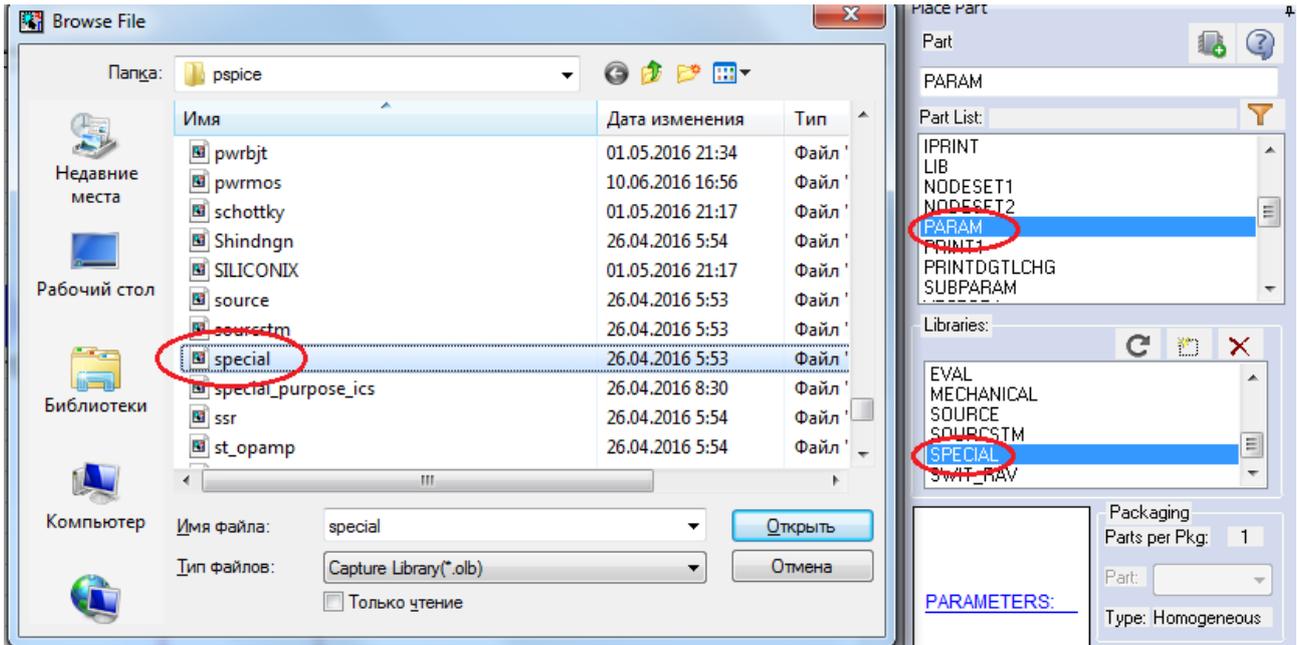


Рис. 2.15. Добавление библиотеки Special

3. Нажимаем Place Part и добавляем компонент PARAM в схему (рис. 2.16).

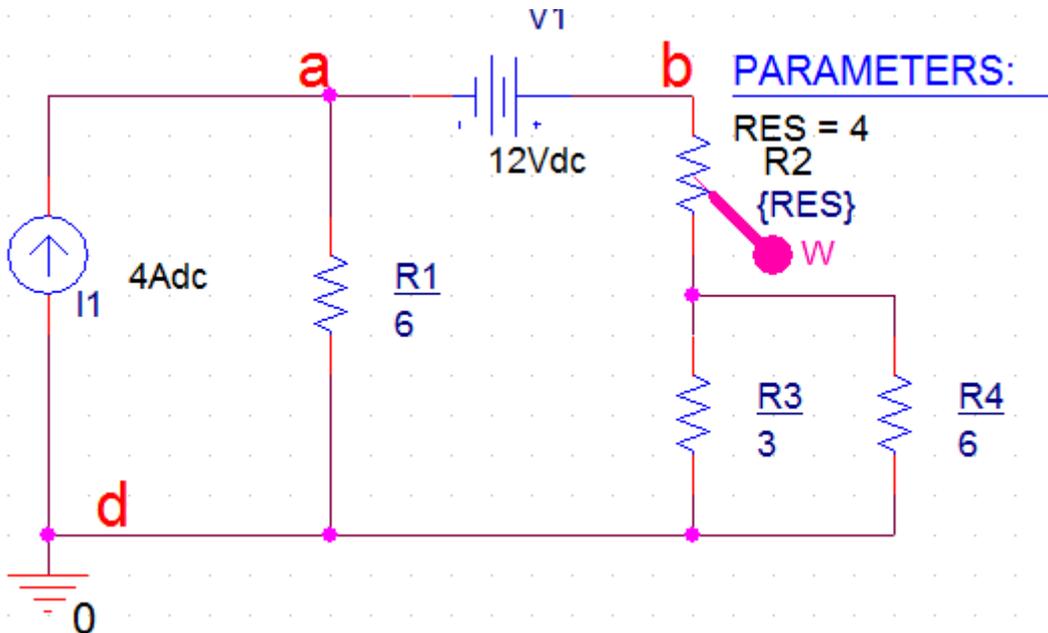


Рис. 2.16. Ввод в схему компонента PARAM

4. Дважды щёлкнем на PARAM и в редакторе свойств выбираем New Properties. В новом окне свойств вводим RES без фигурных скобок и номинальное значение резистора 4. Кнопкой Pivot можно поменять в таблице свойств столбцы на строки, если понадобится (рис. 2.17).

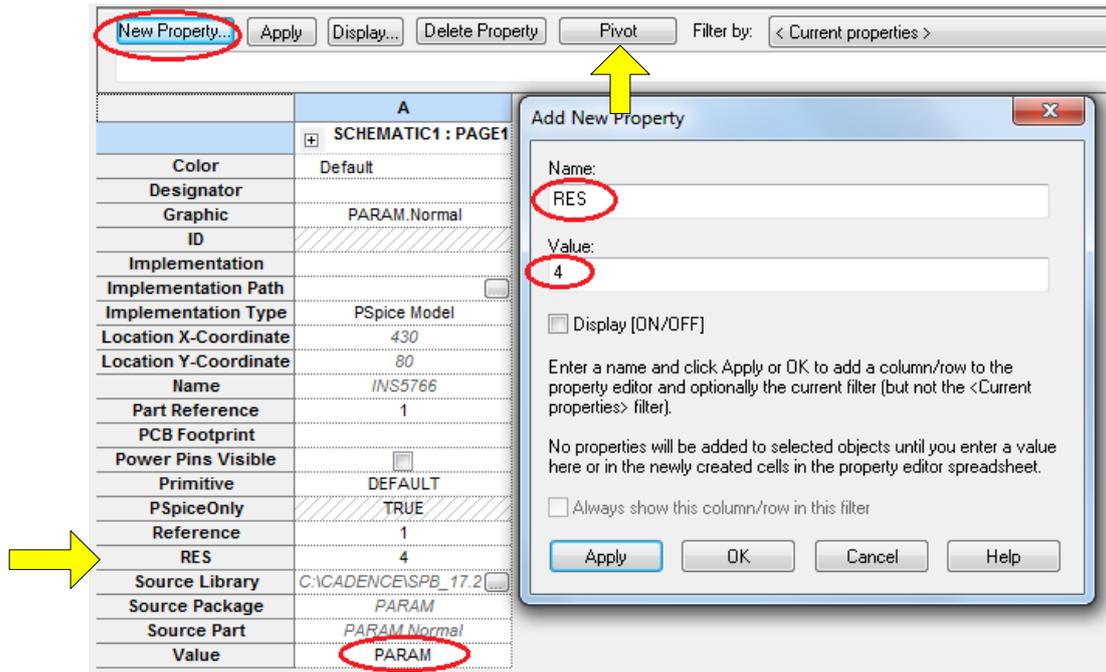


Рис. 2.17. Установка новых свойств резистора RES

5. Выделяем строку RES, правой кнопкой мыши открываем меню и выбираем Display. Проверяем правильность установок (рис. 2.18). Нажимаем ОК.

6. В главном меню нажимаем Apply, чтобы сохранить установки и закрываем редактор свойств.

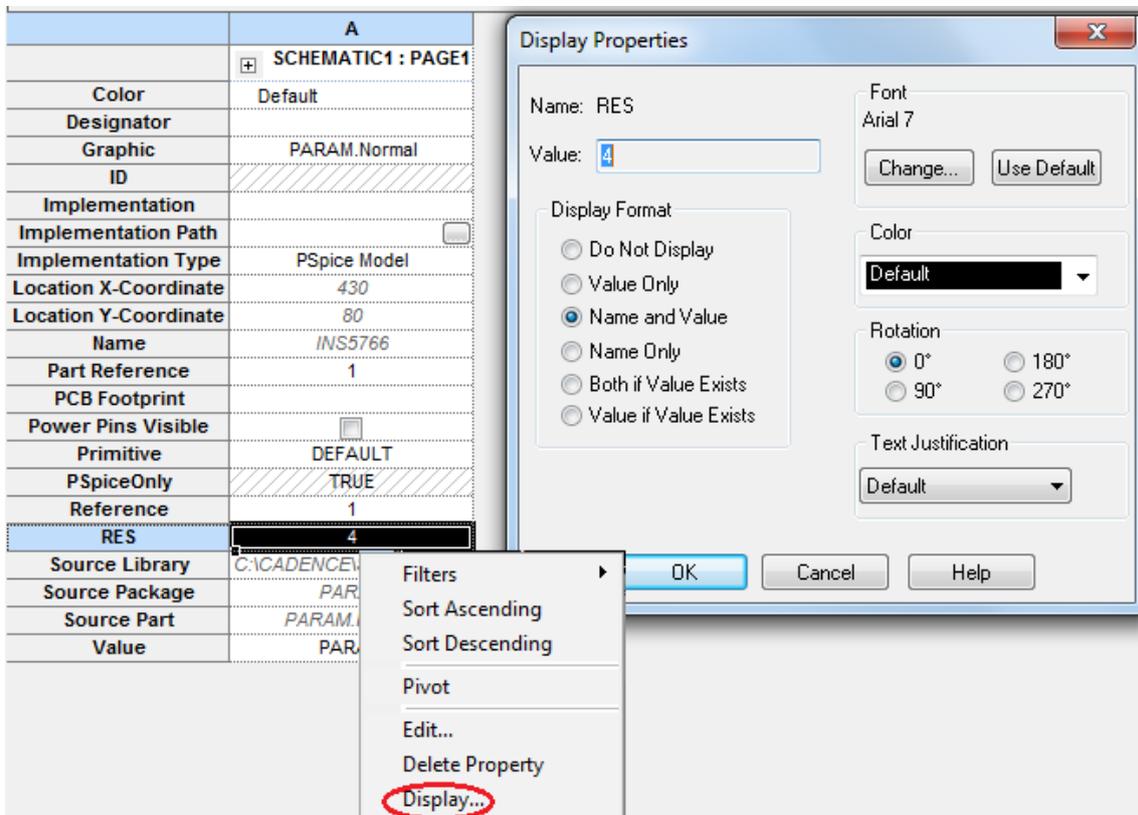


Рис. 2.18. Проверка установок

Добавляем в схему маркер для измерения мощности в резисторе R2. При правильных установках схема будет иметь вид, показанный на рис. 2.16.

7. Устанавливаем профиль моделирования PARAM1. Выбираем DC Sweep, Primary Sweep, Global parameter = RES, развертка линейная. Устанавливаем начальное и конечное значение параметра, инкремент (рис. 2.19).

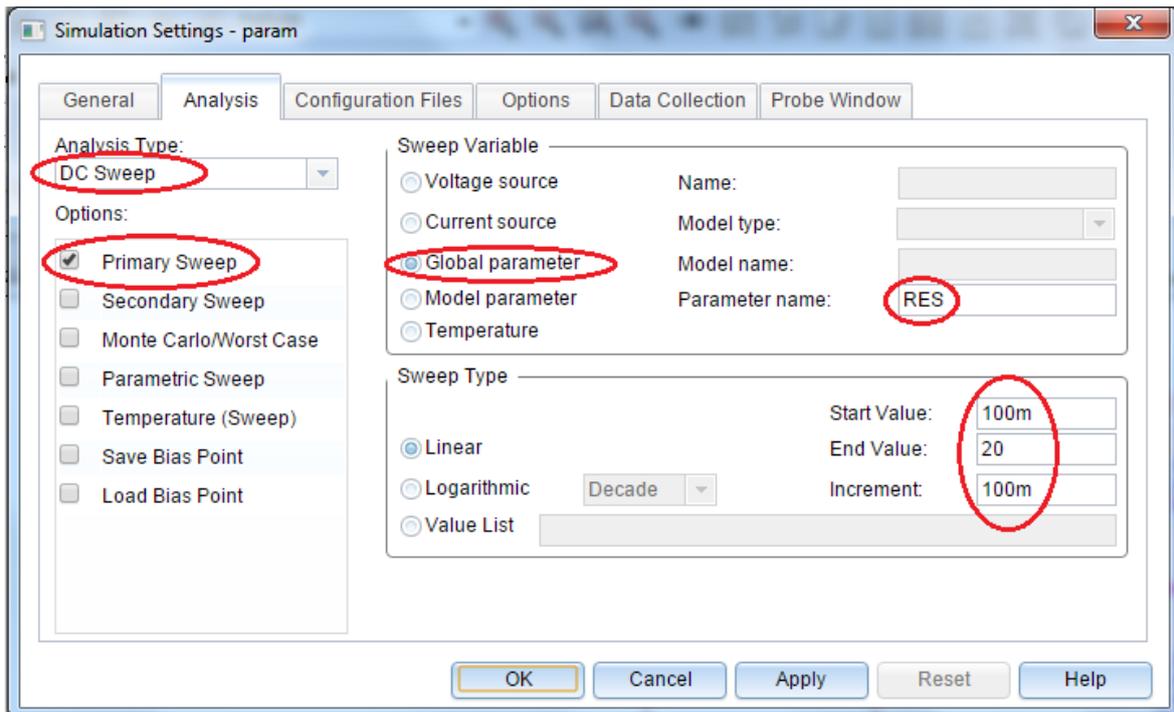


Рис. 2.19. Установка профиля моделирования с разверткой
8. Выполняем моделирование и получаем график мощности (рис. 2.20).

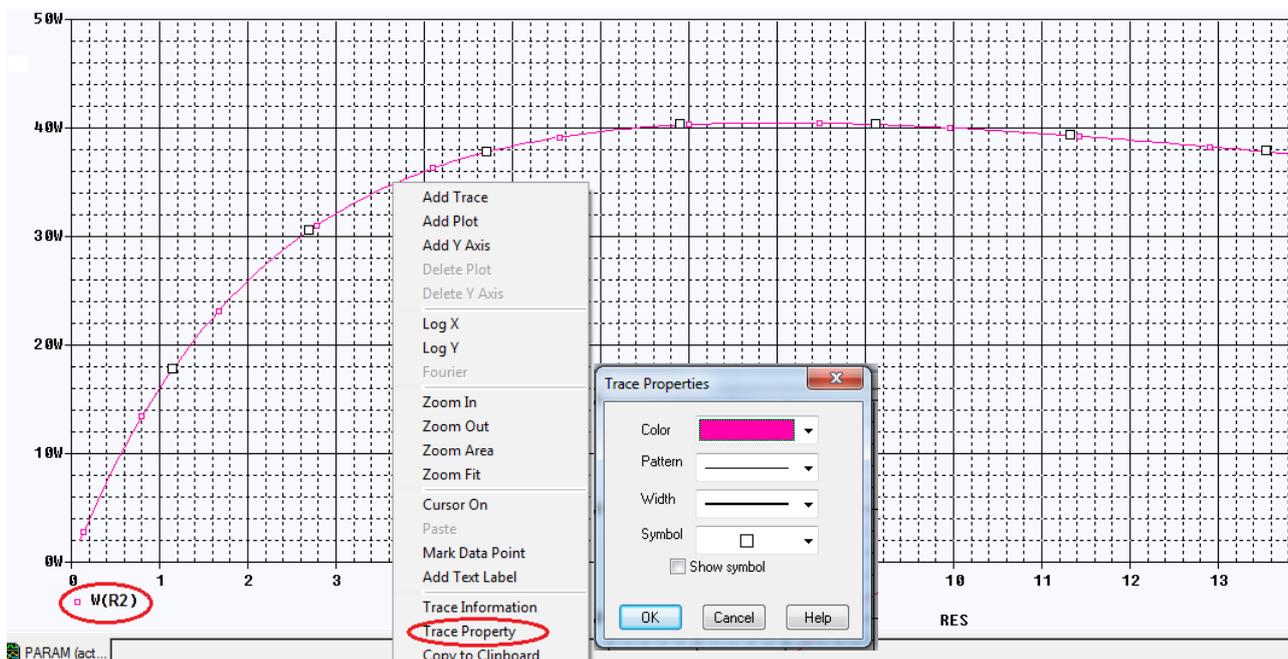


Рис. 2.20. График мощности при изменении R2

Выделив график, можно открыть выпадающее меню и сделать дополнительные установки. Можно изменить цвет, пунктир, толщину линии, задать символы. Мы выбрали Trace Properties и установили малиновый цвет и толщину графика.

Начиная с версии 16.3, вы можете выполнить основные установки окна Probe, изменить цвета курсоров и их толщину, цвета заднего и переднего плана, а также оси и линии сетки, цвет фона и зонда. Для этого в окне Probe выберите Tools > Options как показано на рисунке 2.21.

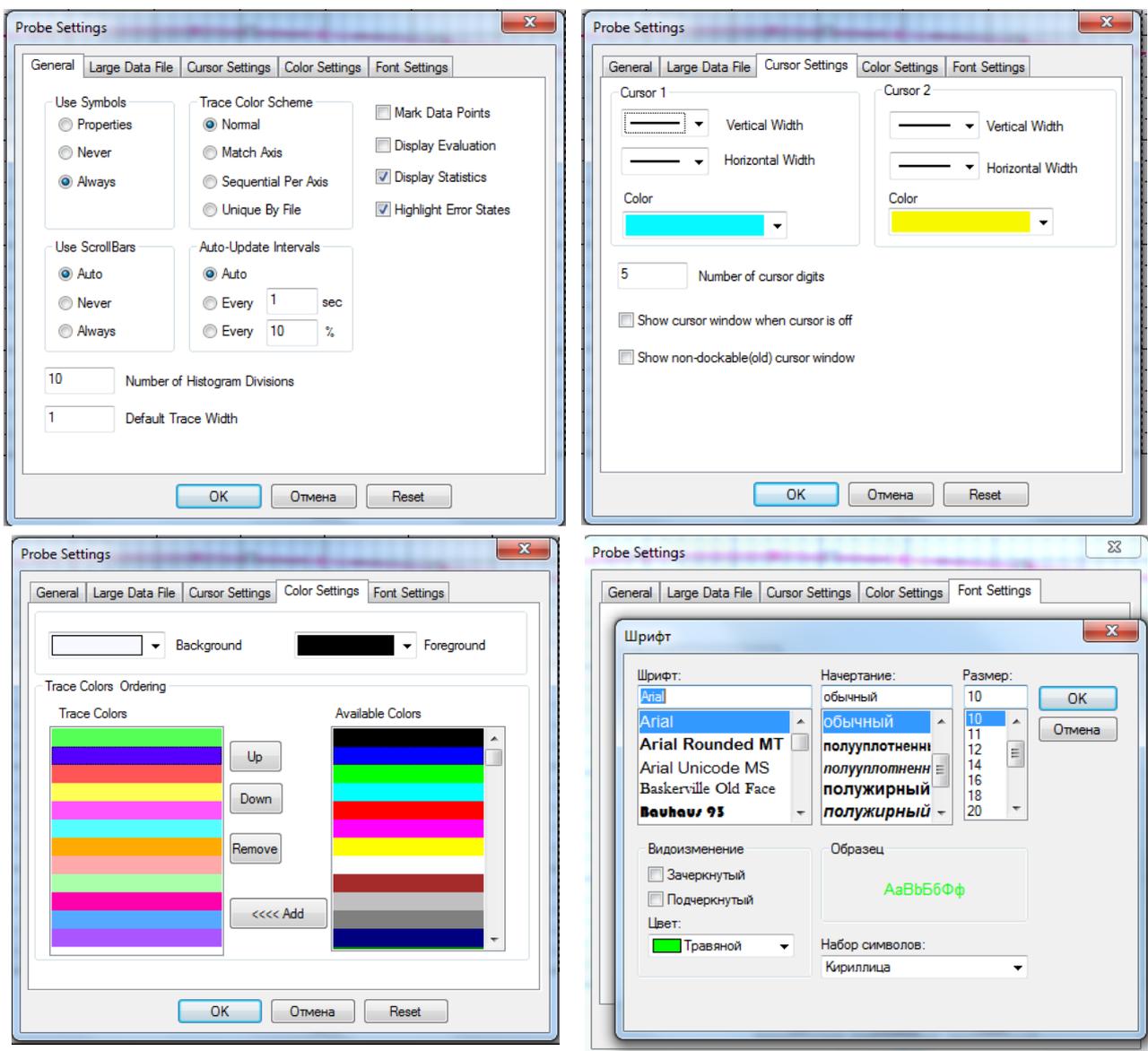


Рис. 2.21. Установка различных параметров окна Probe

2.7.2. Использование курсоров

Выбираем Trace-Cursor-Display и в меню курсоров выбираем Cursor Pic или Cursor Max. Курсор автоматически установится на максимуме графика (рис. 2.22).

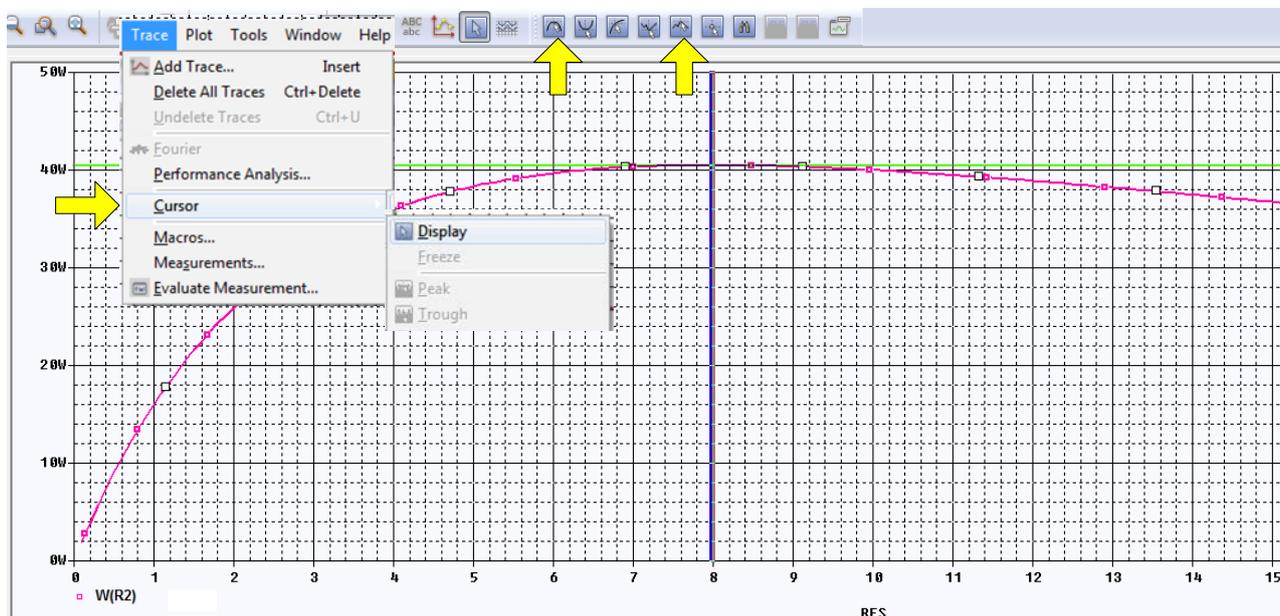


Рис. 2.22. Поиск максимума курсорами

Численная информация о положении курсоров находится в нижнем правом окне Probe. Мы видим, что максимальная мощность 40,500 Вт достигается при значении $R_2=8$ Ом, что соответствует сопротивлению эквивалентного генератора.

Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	438.903u			
X Values	8.0000	7.9726	27.397m	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
W(R5)	40.500	40.500	438.903u	0.000	0.000	40.500	40.500	40.500

Рис. 2.23. Числовые данные курсоров

Ранее мы нашли напряжение холостого хода $U_{cbxx} = E_{экв} = 36 В$. Расчет максимальной мощности дает:

$$P_{max} = \frac{E_{экв}^2}{4R_{экв}} = \frac{36^2}{4 \cdot 8} = 40,5 В.$$

Выбрав значок указателя, можно произвольно перемещать курсор (рис. 2.24).

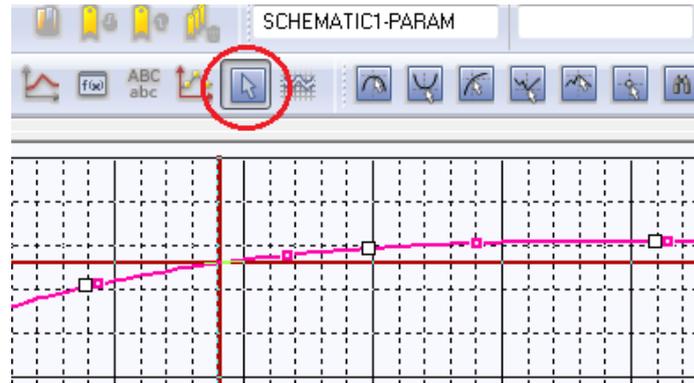


Рис. 2.24. Перемещение курсора

2.7.3. Развертка двух параметров

Получим графики мощности при изменении R2 для нескольких значений напряжения V1. Для этого в профиле моделирования введем вторую развертку Secondary Sweep для источника напряжения V1 и установим диапазон изменения напряжения от 8 до 16 В с шагом 2 В (рис. 2.25).

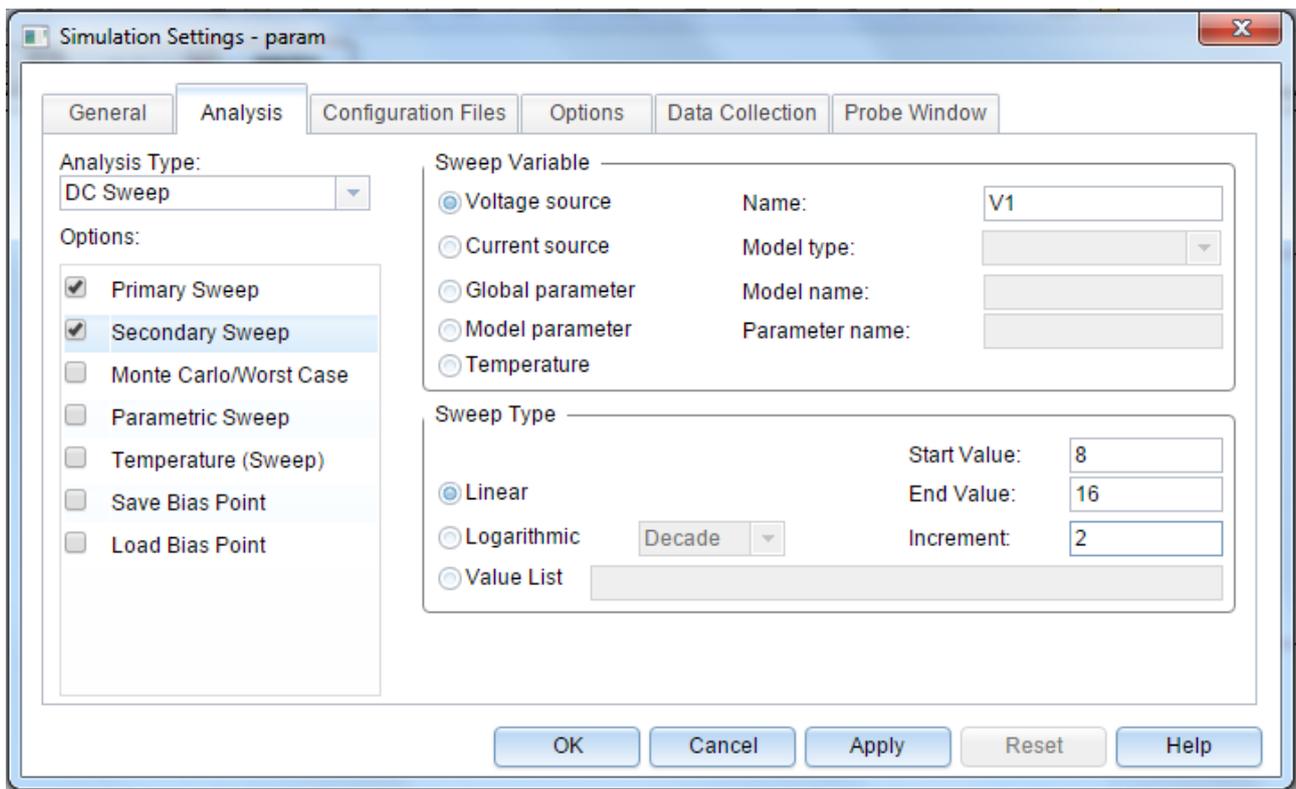


Рис. 2.25. Установка двух разверток

Выполняем моделирование и получаем семейство графиков мощности для всех напряжений (рис. 2.26).

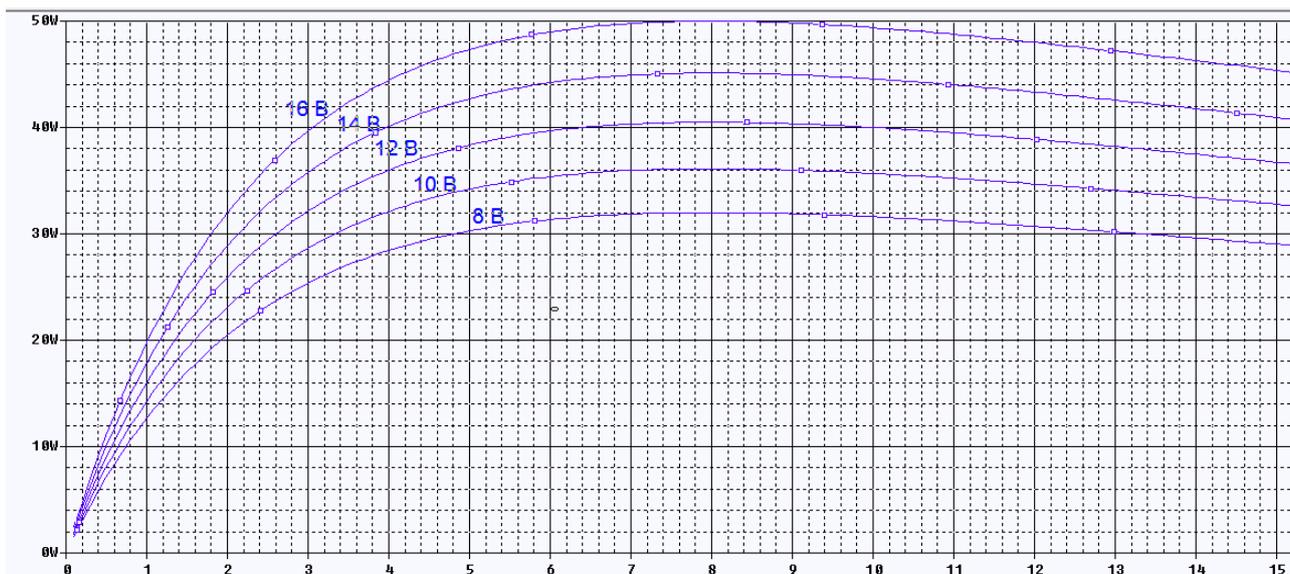


Рис. 2.26. Семейство графиков мощности

Для разметки графиков выбираем Plot>Label>Text, устанавливаем нужный шрифт, вводим текст (рис. 2.27) и размечаем графики.

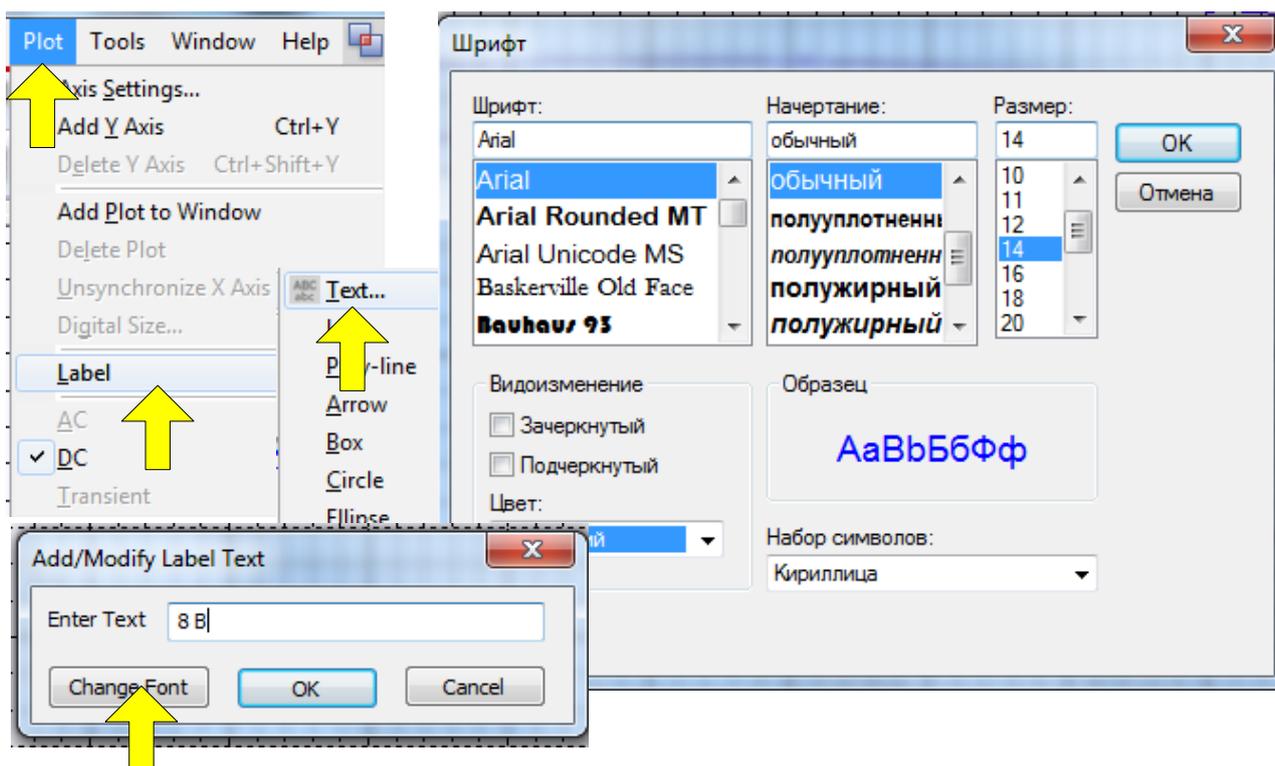


Рис. 2.27. Разметка графиков

2.8. Выходные характеристики биполярного транзистора

Создадим проект PR-3 для получения выходных характеристик биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером. Как и ранее выбираем тип проекта PSpice Analog or Mixed A/D и базовый проект simple.opj.

Затем поступаем так:

1. Из библиотеки Pspice>advans>bjn (рис. 2.28) выбираем транзистор n-p-n транзистор 2N2102 и помещаем на рабочее поле.

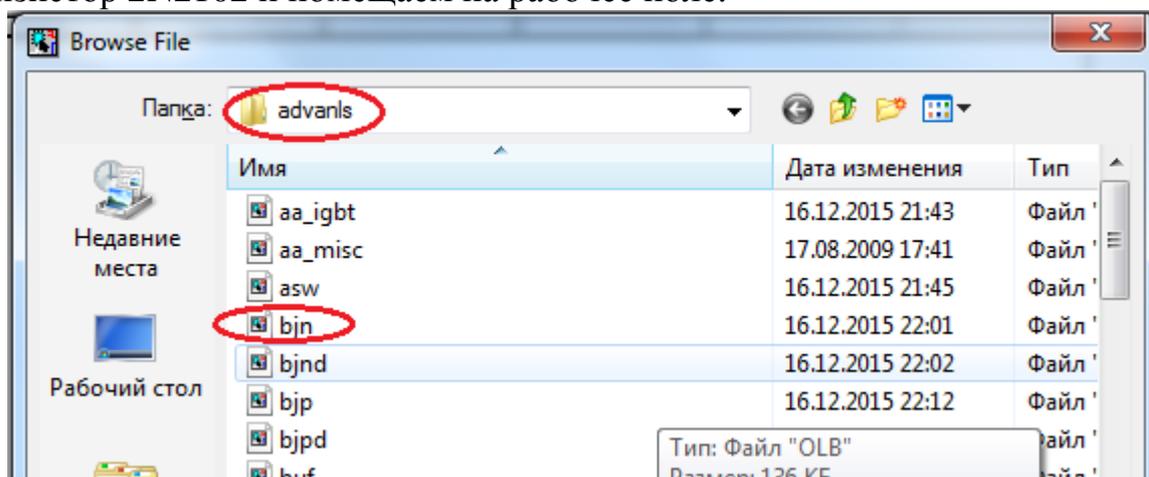


Рис. 2.28. Открытие библиотеки биполярных транзисторов

2. В менеджере проекта добавляем в библиотеки файл bjn (Рис. 2.29).

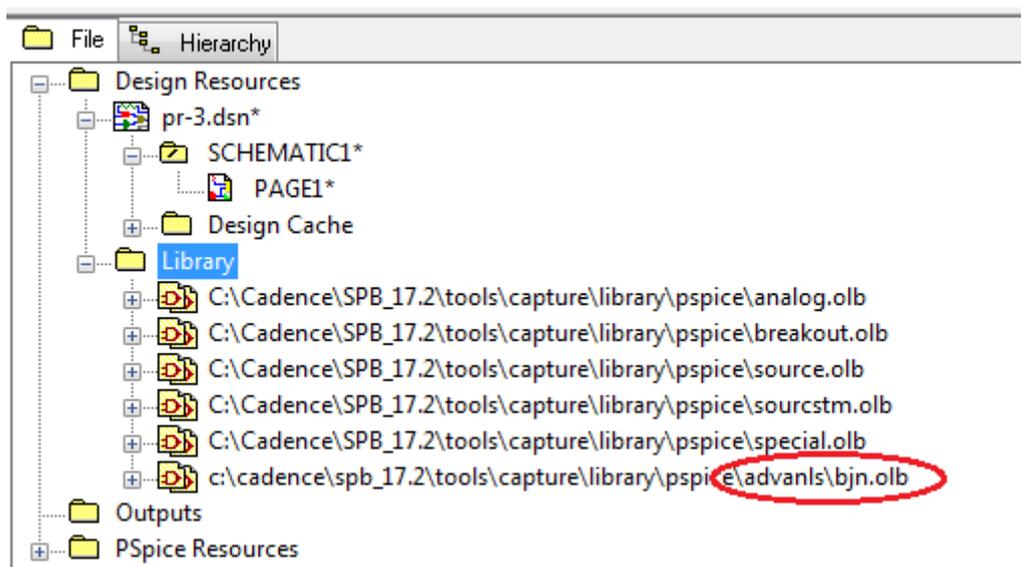


Рис. 2.29. Добавление библиотеки биполярных транзисторов в проект

3. Собираем схему (рис. 2.30) и устанавливаем маркер тока. Для этого в схеме надо сделать **pin** (короткий вывод) на коллекторе. Маркер надо соединить с выводом коллектора транзистора.

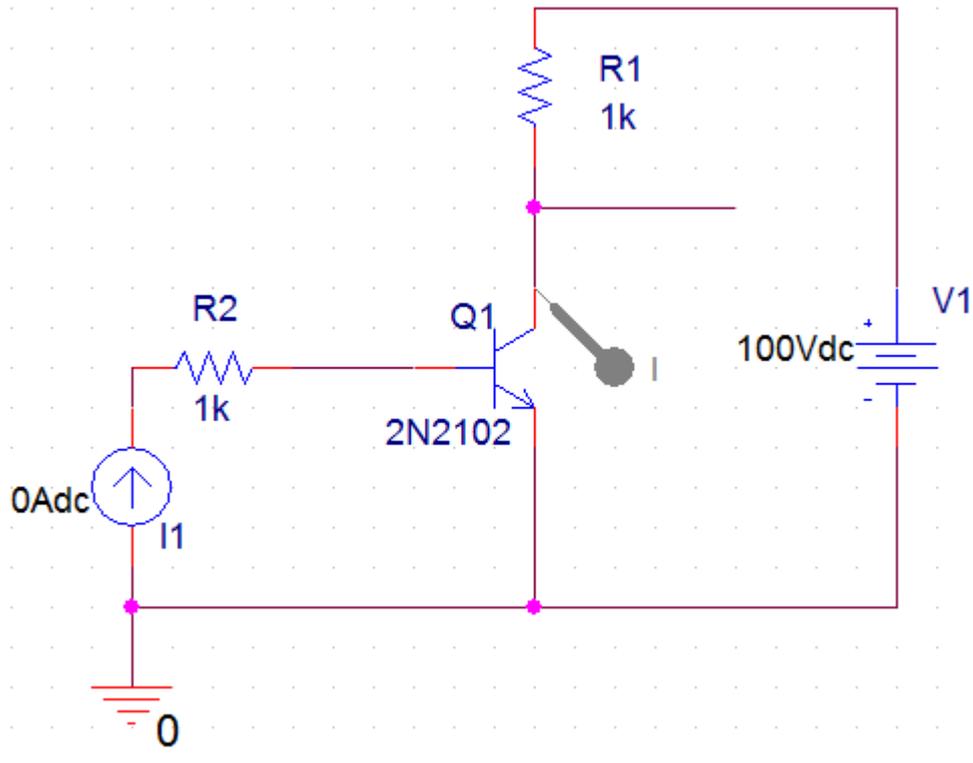


Рис. 2.30. Схема измерения вольтамперных характеристик

4. Создаем профиль моделирования VAX1. Устанавливаем первичную развёртку по напряжению на коллекторе V1 от 0 до 100 В с шагом 1В (рис. 2.31).

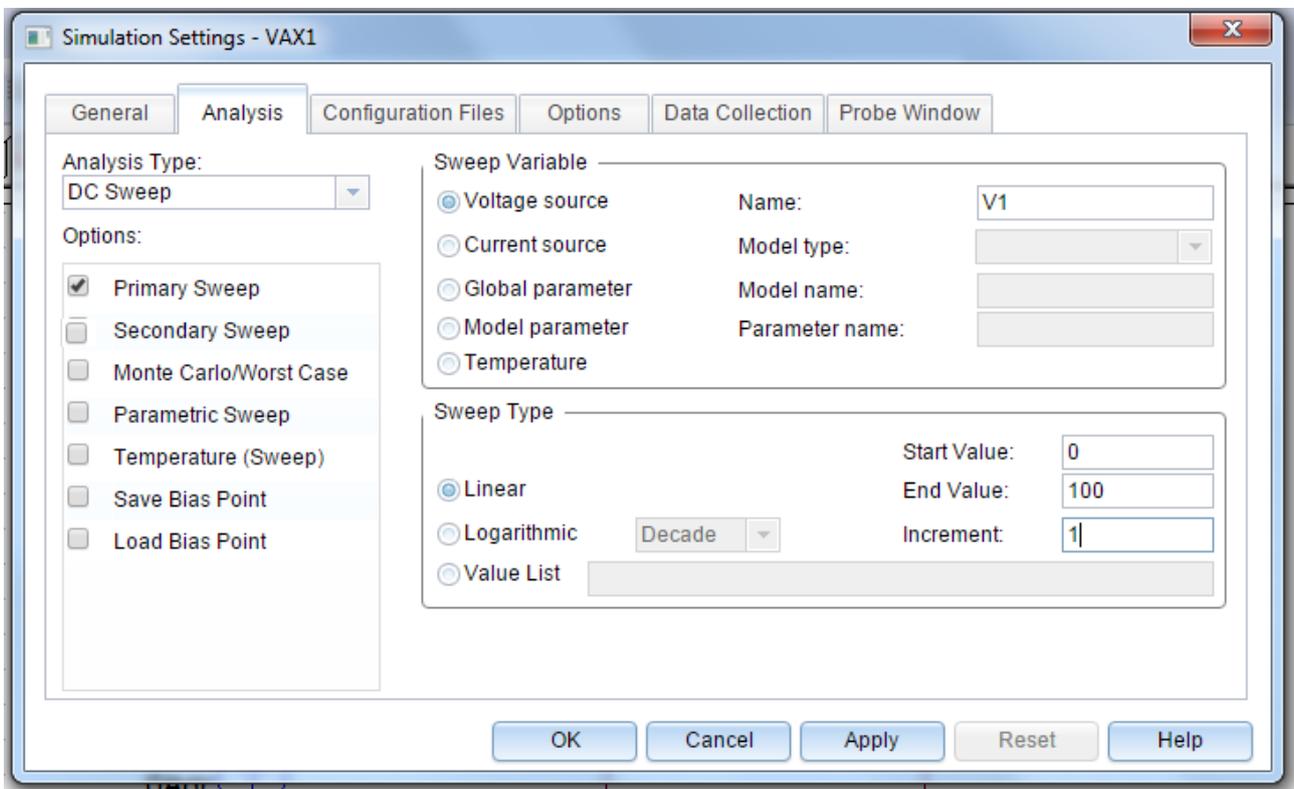


Рис. 2.31. Установка первичной развертки по напряжению коллектора 5. Устанавливаем вторичную развёртку по току базы I1 от 50 мкА до 200 мкА с шагом 50 мкА и устанавливаем в менеджере проектов активный профиль моделирования VAX1 (рис. 2.32).

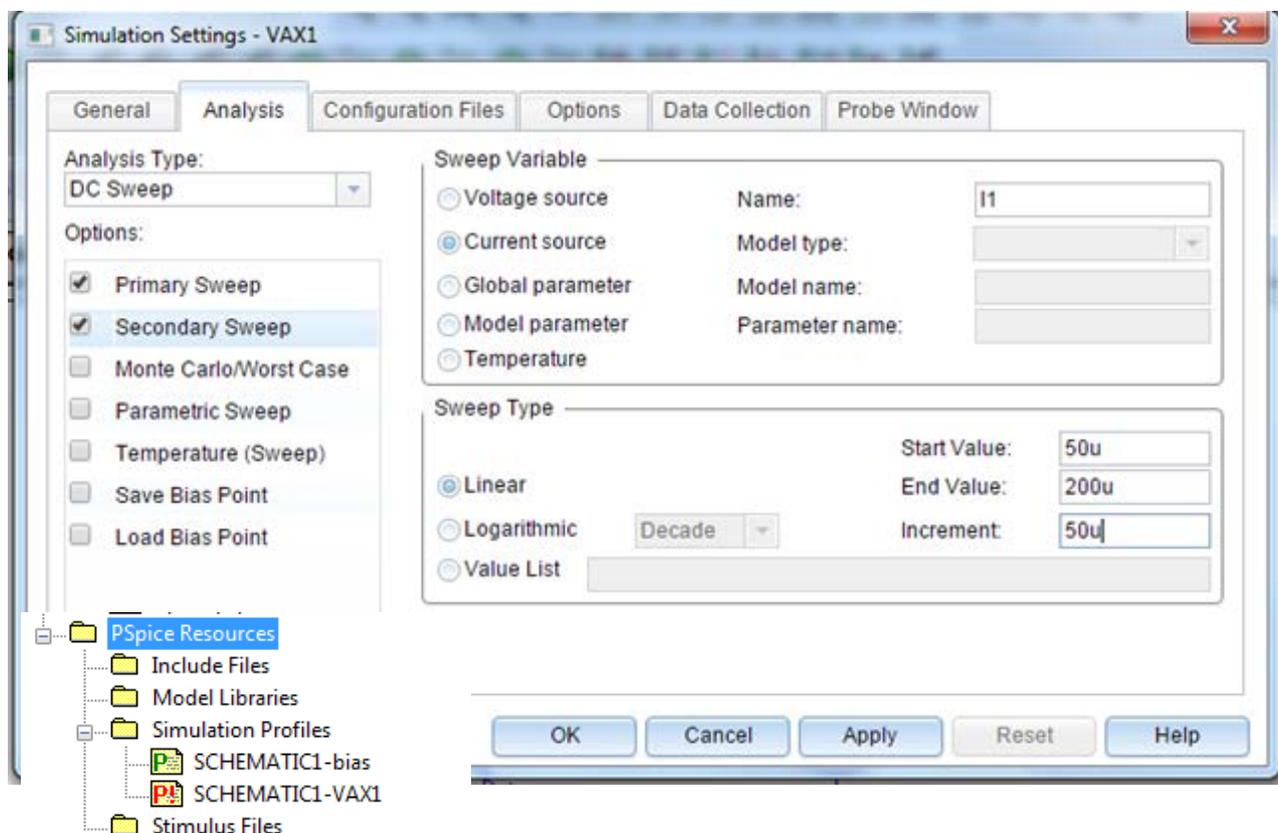


Рис. 2.32. Установка вторичной развертки по току базы 6. Сохраняем проект и включаем Run и в окне результатов получаем графики выходных характеристик и размечаем их (рис. 2.33).

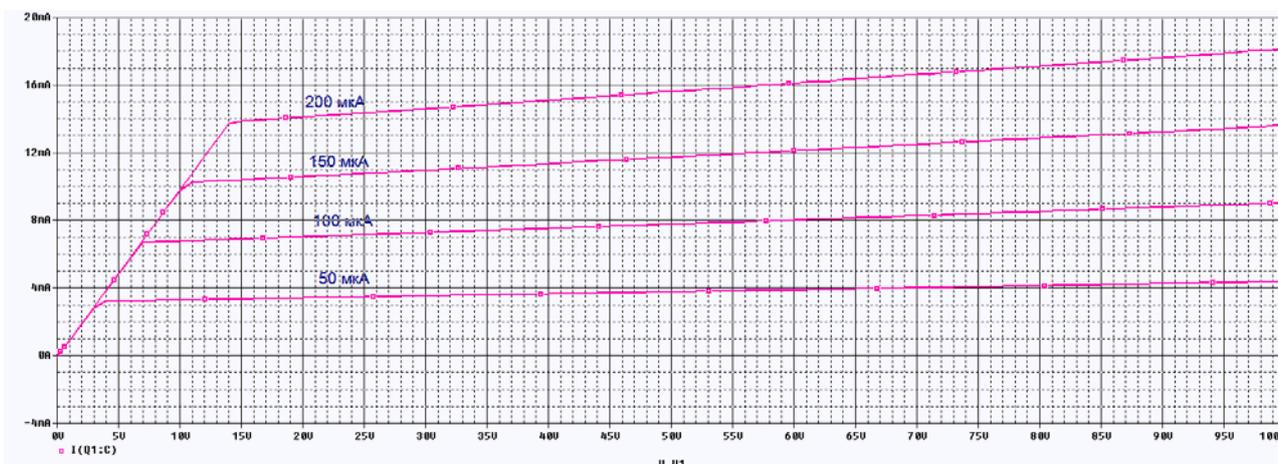


Рис. 2.33. Графики выходных характеристик

7. Выполняем установку осей.

Выбираем Plot > Axis Settings > XAxis, **изменяем** Data Range на User Defined и вводим диапазон от 0 до 30 V. Нажимаем ОК и видим изменения (рис. 2.34).

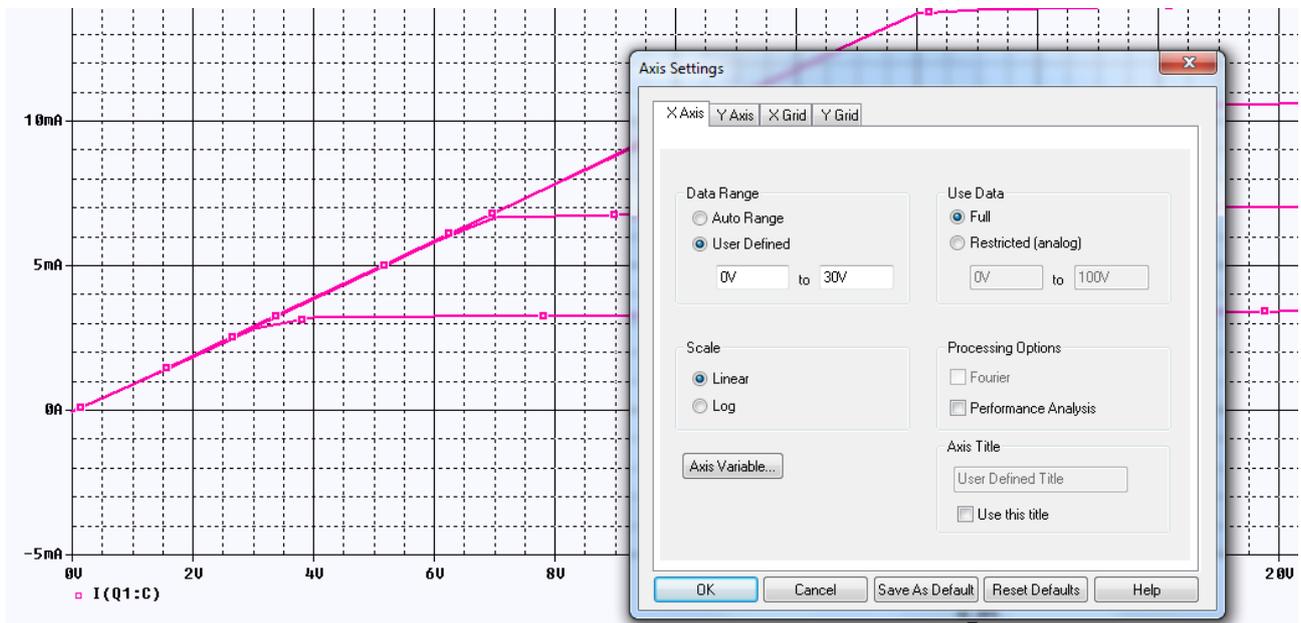


Рис. 2..34. Установка осей

Выбираем Plot > Axis Settings > YGrid отключаем Automatic и устанавливаем Major Spacing на 10m. Нажимаем ОК и видим изменения (рис. 2.35).

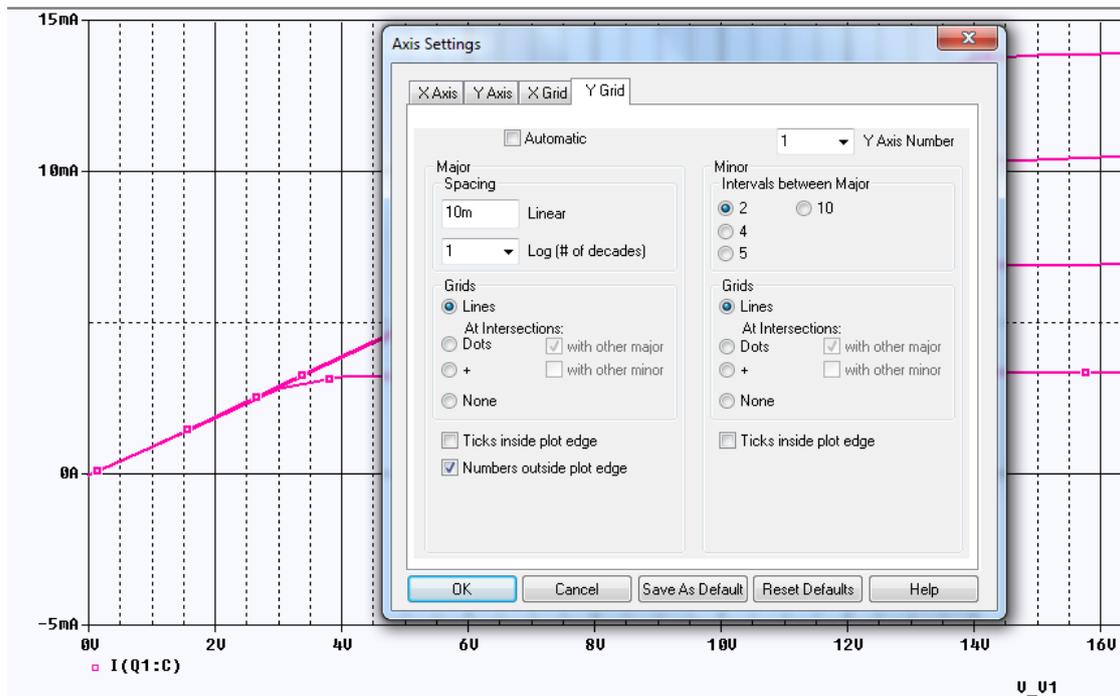


Рис. 2.35. Изменение расстояния между осями по Y

Рис. 3.20

Рис. 3.21

Выбираем Plot > Axis Settings > XGrid и устанавливаем как Major, так и Minor Grids на None. Нажимаем ОК и видим изменения (рис. 2.36).

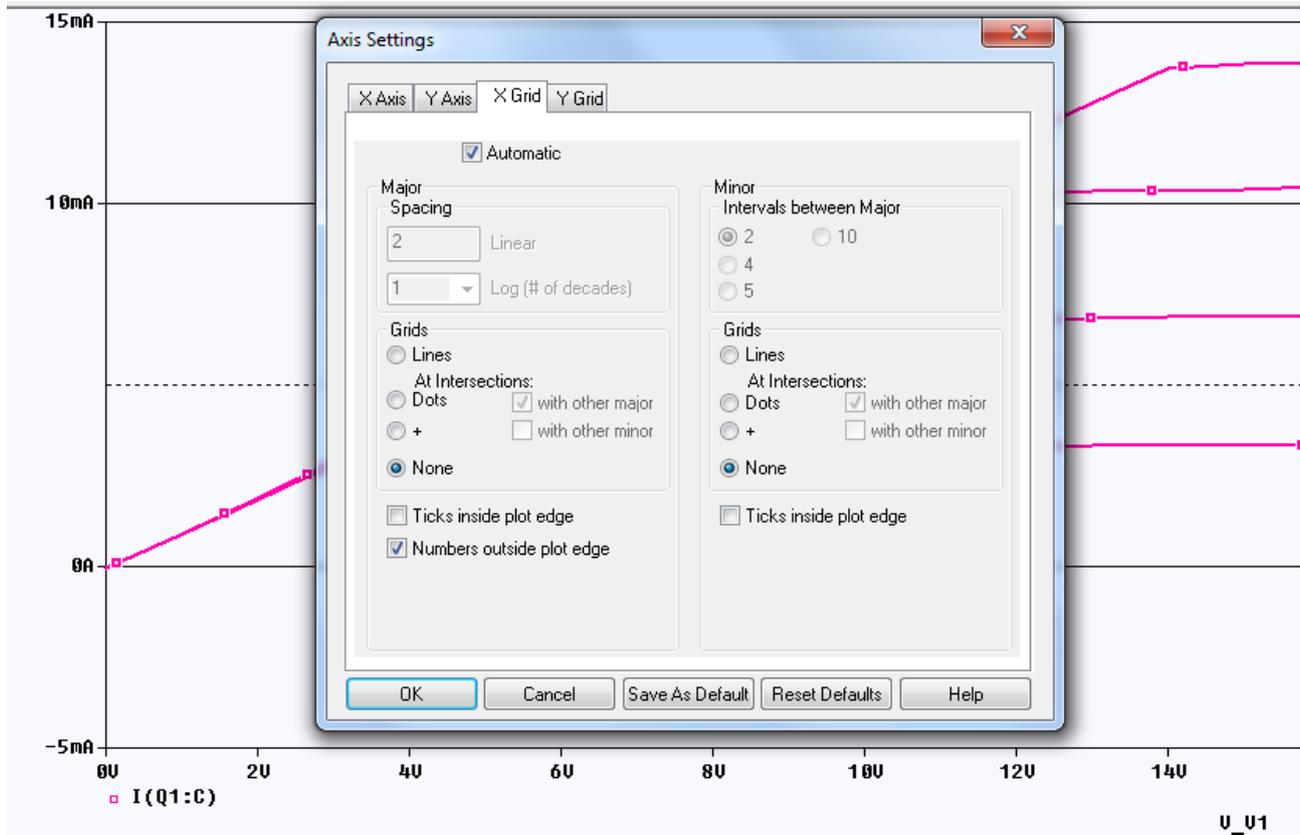


Рис. 2.36. Отключение сеток по X

Выбираем Plot > Axis Settings > YGrid и устанавливаем как Major, так и Minor Grids на None. Нажимаем ОК and видим (рис. 2.37) .

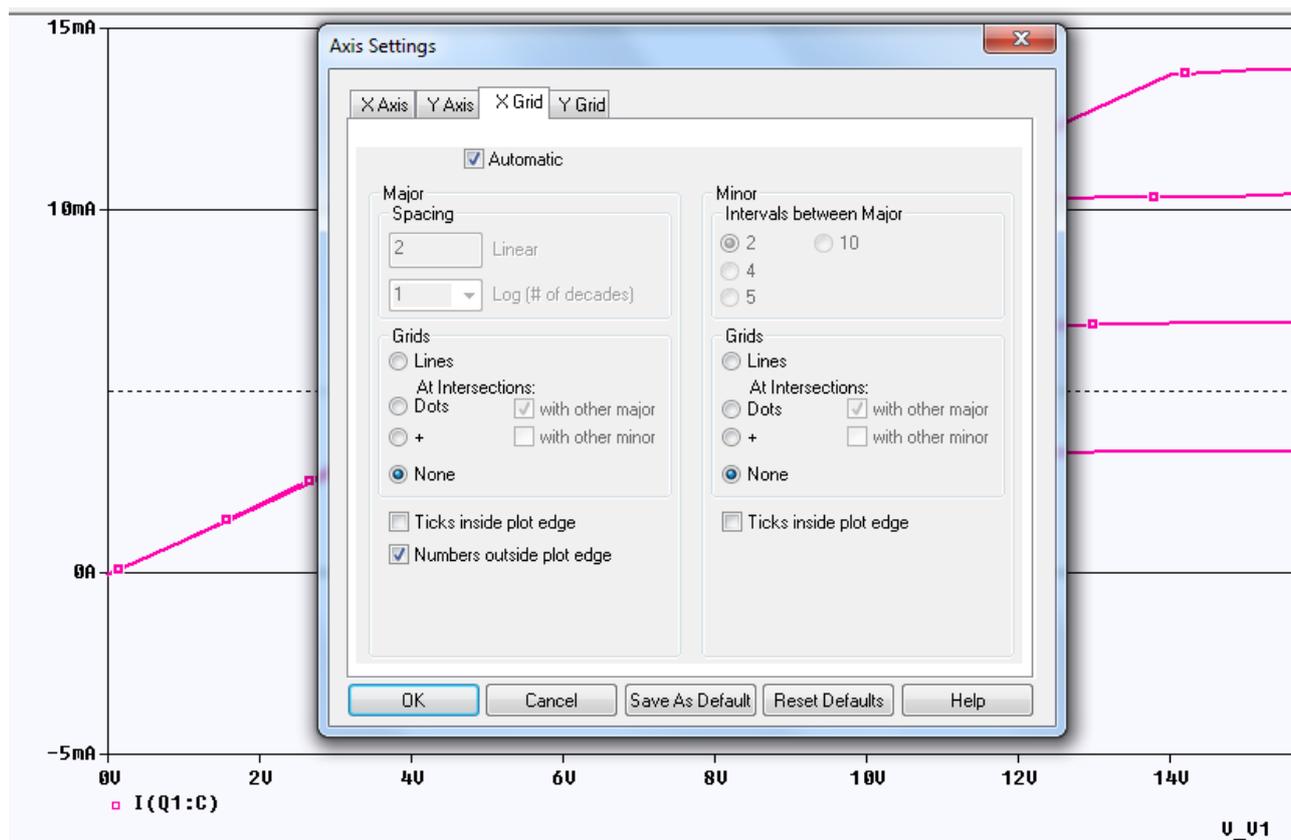


Рис. 2.37. Отключение осей по Y

2.9. Анализ и отображение режима постоянного тока (Bias Point)

Условия смещения рабочей точки транзистора (в нашем случае ток базы, напряжение питания коллектора) используются для настройки правильной работы транзисторной схемы. Если результаты симуляции не то, что вы ожидаете увидеть, условия смещения - это первые параметры, которые вы должны проверить.

После моделирования с помощью PSpice вы можете отображать информацию о точке смещения на странице схемы в Capture. Напряжения смещения отображаются рядом с их соответствующими узлами, токи смещения отображаются рядом с их ветвями устройства, а мощности смещения отображаются рядом с соответствующими источниками питания, резисторами и транзисторами, в которых мощности выделяются. Увидев эти данные на вашей схеме, вы можете быстро сосредоточиться на потенциальных проблемных областях вашего дизайна. PSpice рассчитывает и сохраняет ток, напряжение и мощности для каждой симуляции. Capture читает всю эту информацию и может отображать токи во всех ветвях модели, напряжения для каждого узла в вашей цепи или мощности для каждого источника питания или потребителя.

В схеме (рис. 2.30) установим постоянный ток базы источника I1 равным 200 мкА. Установим профиль моделирования Bias Point и сделаем его активным. Возможно этот профиль уже существует в менеджере проекта и был установлен по умолчанию, так как информация о точке смещения доступна для всех типов анализа, кроме DC Sweep.

Для включения измерителей режима в рабочей точке надо выполнить PSpice>Bias Points>Enable (Рис. 2.38).

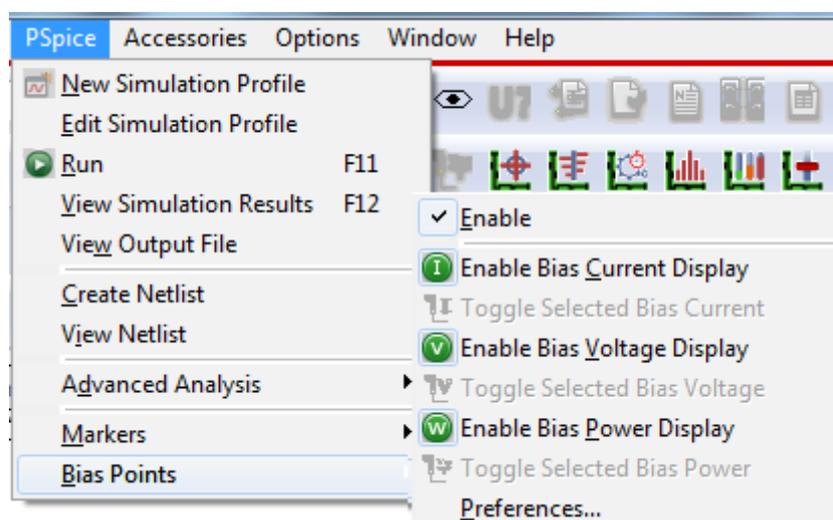


Рис. 2.38. Включение измерителей Bias Points

Выполним моделирование схемы и получим все параметры режима в рабочей точке, соответствующей току базы 200 мкА и напряжению питания 100 В (рис. 2.39).

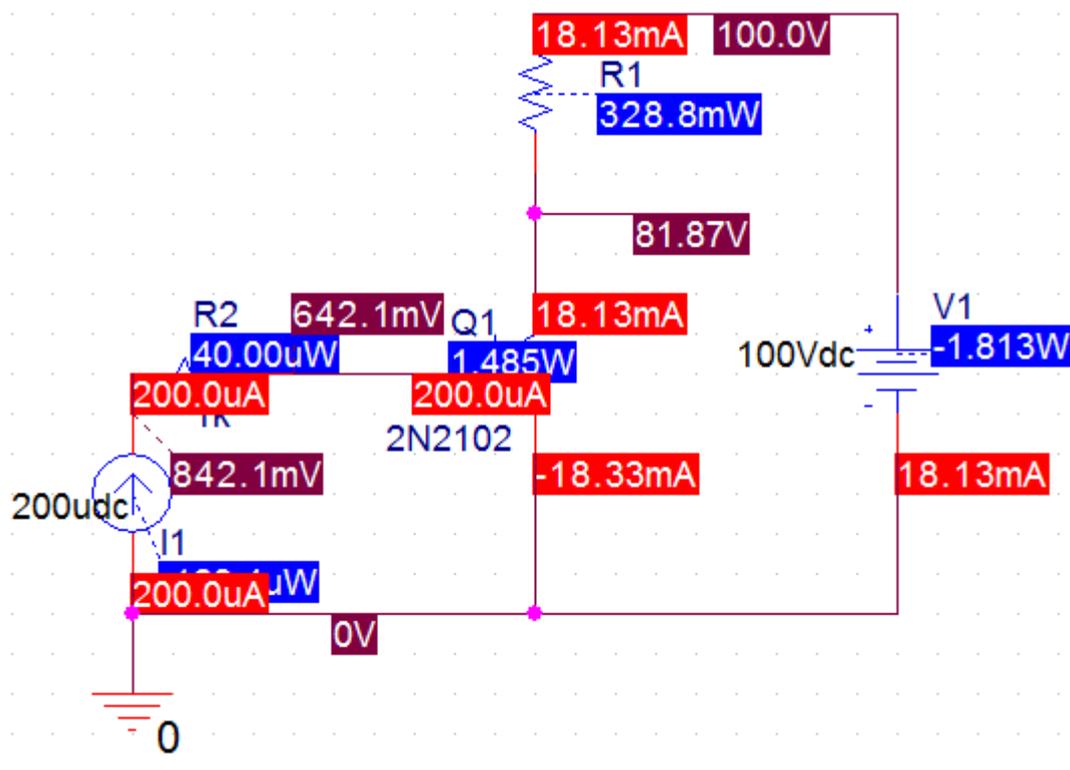


Рис. 2.39. Электрические параметры в рабочей точке

Для токов на выводах значение «+» для рабочей точки означает, что ток течет в штырек, тогда как значение «-» означает, что ток выходит из штырька. По умолчанию отображаются только напряжения. Вы может включать или вы-

ключать токи с помощью соответствующих кнопок или меню на панели инструментов команды. В нашей схеме отображены токи (красным), напряжения (бордовым) и мощности синим цветом.

Информацию о смещении можно сохранять и обновлять.

Данные точки смещения и местоположения отображаемых значений сохраняются как часть схемы. Значительная информация о точке смещения сохраняется для каждого профиля моделирования. Данные обновляются каждый раз, когда вы открываете страницу схемы, когда вы корректируете схему, когда вы активируете другой профиль моделирования или когда вы меняете характеристики отображаемых ярлыков (например, цвет, шрифт или точность).

Для схемы, содержащей несколько страниц, информация об смещении сохраняется на каждой странице. Если вы отключите отображение точки смещения на одной странице, это не повлияет на отображение на других страницах. Если страница используется повторно (иерархические подсхемы), положение измерителей точки смещения будет сохранено для этой страницы и будет одинаковым для всех вхождений этой страницы, хотя значения будут разными для каждого, чтобы точно отражать иерархию схемы.

Количество значащих цифр, отображаемых для точек смещения и цвета можно изменить, выбирая PSpice> Bias Points> Preferences, как показано на рисунке 2.40. До 10 значащих цифр могут быть отображены.

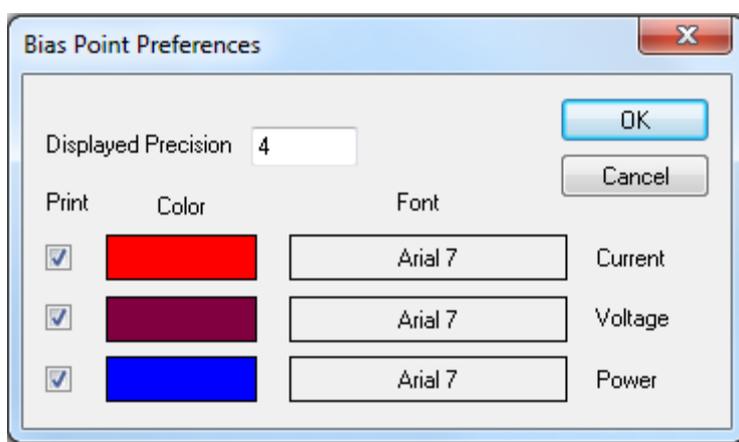


Рис. 2.40. Установка отображения Bias Point

Отдельные постоянные значения для напряжения, тока или мощности можно включать и выключать. Например, если вы выбираете проводник цепи, значение напряжения, тока или мощности можно отображать или нет, переключая соответствующий значок.

При выборе компонента иконками приборов можно отображать режимы постоянного тока.

2.9.1. Сохранение режимов постоянного тока

Вы можете сохранять и повторно использовать данные режима постоянного тока, полученные в моделировании, что полезно если вы должны запустить ряд моделирований большой цепи, которая имеет длительный срок выполнения моделирования.

Это предполагает, что лист списка соединений, т.е. связность компонентов, не изменялась. Помните, что другие анализы используют расчётные результаты анализа постоянного тока. Поэтому, когда вы подводите итоги, вы считаете, что лист соединений не изменился, начальный расчёт режима постоянного тока был сохранен и использован повторно, тем самым уменьшая время выполнения моделирования. Сохранение режима постоянного тока также полезно, когда моделирование не сходится к решению.

В Simulation Profile Settings выберите Bias Point analysis, а затем выберите Save Bias Point. Вы выбираете Browse, чтобы выбрать или создать папку, в которой необходимо сохранить файл. В Capture папка bias создается в каталоге C:/Project Name/ Project Name - PSpiceFiles/SCHEMATIC1/bias (рис. 2.41).

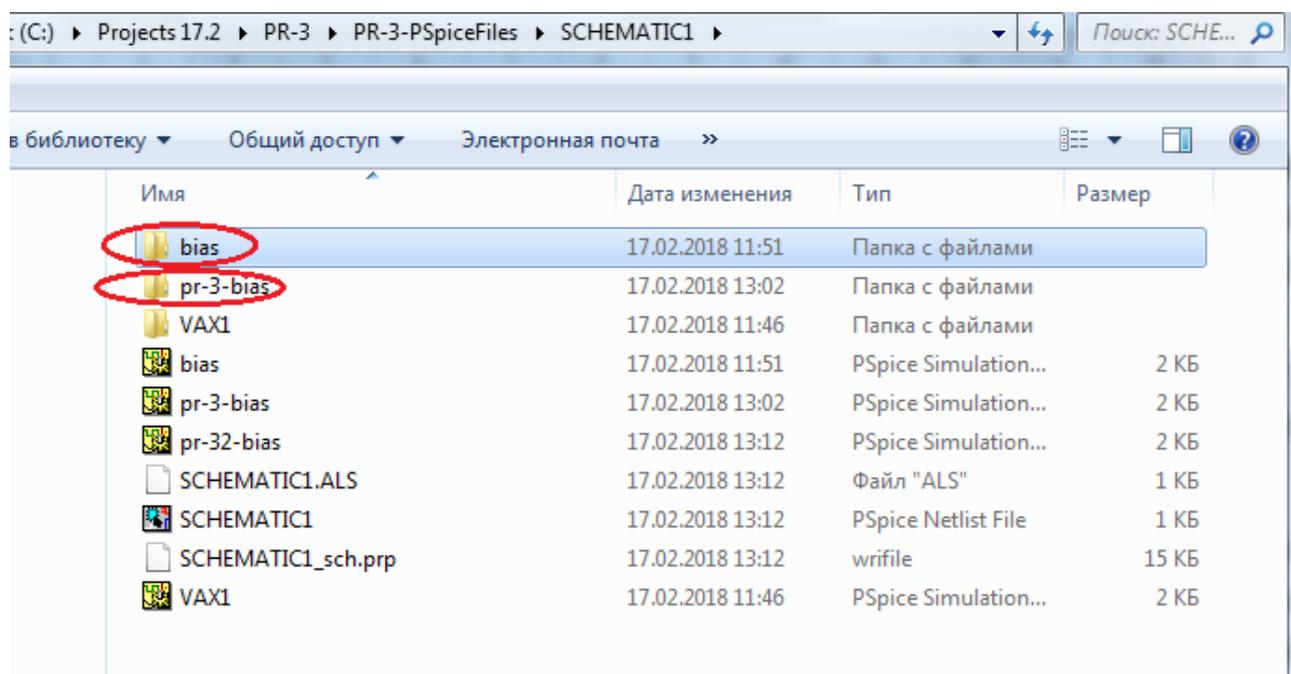


Рис. 2.41. Расположение папки bias

При создании нового профиля моделирования в проекте создается новая папка, например, pr-3-bias. При каждом активном использовании профиля моделирования содержание, относящейся к данному профилю папки bias, обновляется.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
pr-3-bias.1OP	17.02.2018 13:02	Файл "1OP"	1 КБ
pr-3-bias	17.02.2018 13:02	PSpice Circuit File	1 КБ
pr-3-bias.mif	17.02.2018 13:02	Файл "MIF"	1 КБ
pr-3-bias.mrk	17.02.2018 13:31	Файл "MRK"	1 КБ
pr-3-bias	17.02.2018 13:02	PSpice Simulation...	5 КБ

Рис. 2.42. Обновление файлов bias

Сохранённые данные смещения содержат узловые напряжения и цифровые состояния для всех устройства в схеме, общую мощность и ток, обеспечиваемый любым источником напряжения, список параметров модели для устройств в цепи, полные данные о режиме работы транзистора.

На рис. 2.43 показаны фрагменты файла OUT, открытого в Notepad++.

```

**** 02/17/18 13:02:56 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 ****

** Profile: "SCHEMATIC1-pr-3-bias" [ c:\projects 17.2\pr-3\pr-3-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\pr-3-bias.sim ]

****      CIRCUIT DESCRIPTION

****      SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION          TEMPERATURE = 27.000 DEG C          **** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

*****, NAME X_Q1.Q2n2102_0
MODEL X_Q1.model14
IB 2.00E-04
IC 1.81E-02
VBE 6.42E-01
VBC -8.12E+01
VCE 8.19E+01
BETADC 9.07E+01
GM 8.01E-01
RPI 1.17E+02
RX 1.57E+01
RC 1.88E+04
CBE 1.34E-09
CBC 1.12E-12
CJS 0.00E+00
BETAAC 9.37E+01
CBX/CBX2 1.12E-12
FT/FT2 9.52E+07

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME CURRENT
V_V1 -1.813E-02

TOTAL POWER DISSIPATION 1.81E+00 WATTS

**** 02/17/18 13:02:56 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 ****

** Profile: "SCHEMATIC1-pr-3-bias" [ c:\projects 17.2\pr-3\pr-3-PSpiceFiles\SCHEMATIC1\pr-3-bias.sim ]

****      OPERATING POINT INFORMATION          TEMPERATURE = 27.000 DEG C

*****

```

Рис. 2.43. Фрагменты файла OUT из папки bias.

В полной версии программы OrCAD-17.2 предусмотрено переключение отображения текущего текущего смещения. Можно включить отображение определенной точки смещения тока, используя для этого кнопку Toggle Selected Bias Current на панели инструментов Bias Point ().

2.9.2. Загрузка сохраненного режима постоянного тока

Сохранённые данные постоянного режима можно загрузить путем выбора Load Bias Point в профиле моделирования. Для этого надо выбрать имя сохранённого файла. Файл данных можно использовать для анализа постоянного тока, переменного тока и в переходных процессах.

Загрузка точки смещения - это функция управления имитацией, которая позволяет вам установить прежнюю точку смещения как начальное условие. Общей причиной сохранения и установки прежних начальных условий в PSpice является необходимость выбрать одну из двух или более стабильных рабочих точек (например, установку или сброс для триггера).

Чтобы проверить загрузку точки смещения, сделайте следующее:

1. Измените схемы как показано на рис. 2.43.а. Запустите симуляцию с помощью параметра Save Bias Point в диалоговом окне «Параметры моделирования». Результаты моделирования соответствуют новым значениям параметров.

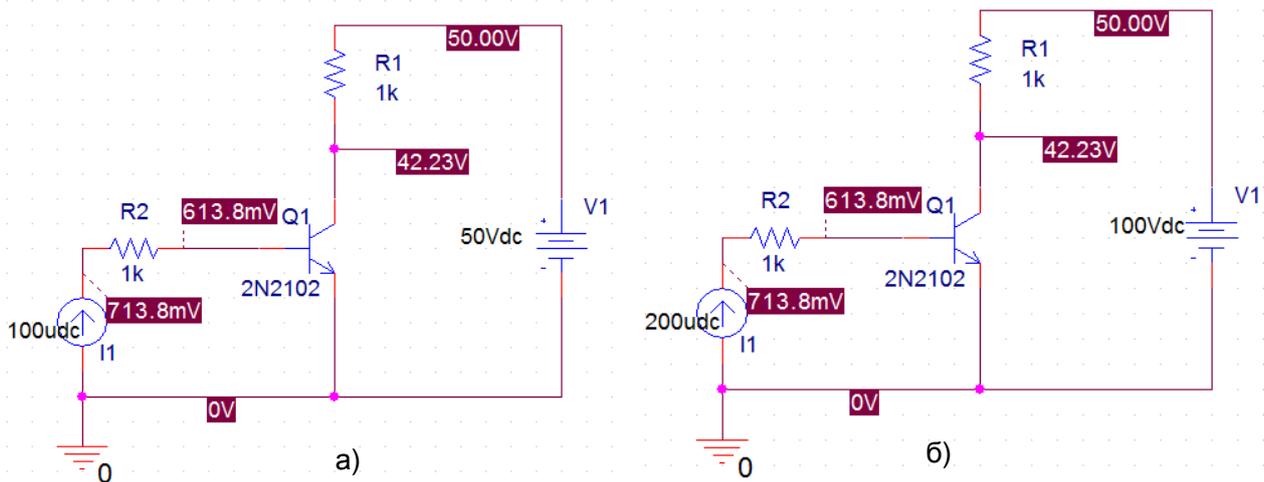


Рис. 2.43. Проверка загрузки точки смещения

Вернитесь к исходной схеме с током базы 200 мкА и напряжением питания 100 В (рис. 2.43.б).

Откройте диалоговое окно PSpice>Edit Simulation Profile.

2. Перед запуском другого моделирования перейдите на вкладку Analysis>Bias Point и в диалоговое окно Options выберите Load Bias Point (рис. 2.44).

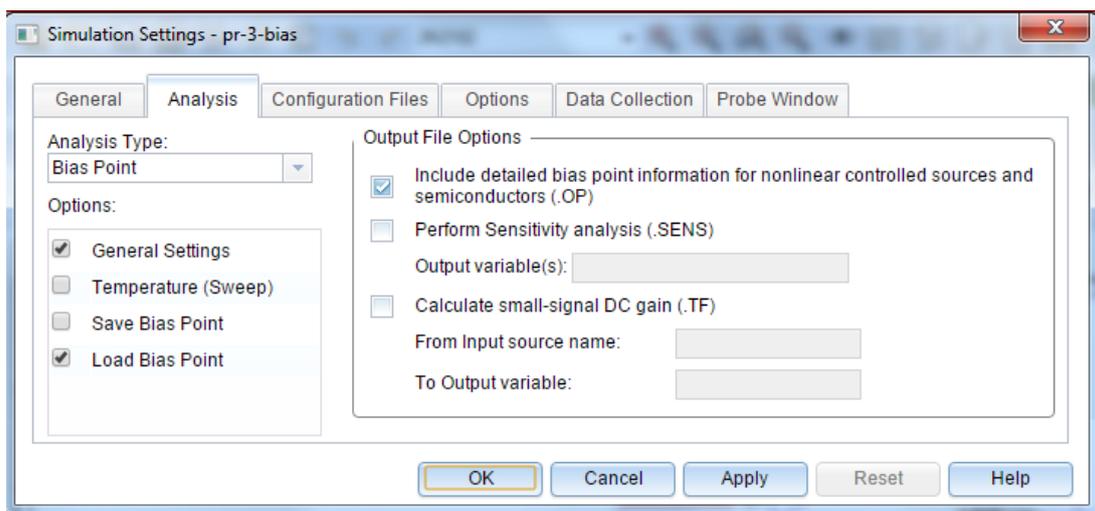


Рис. 2.44. Установка режима загрузки смещения

3. Укажите загружаемый файл точки смещения. Используйте кнопку «Обзор», чтобы найти файл, и выберите для нашей схемы C:/Projects 17.2/PR-

3/PR-3-PSpiceFiles/SCHEMATIC1/PR3-bias/PR3-bias (PSpice Circuite File) (рис. 2.45).

4. Нажмите «ОК».

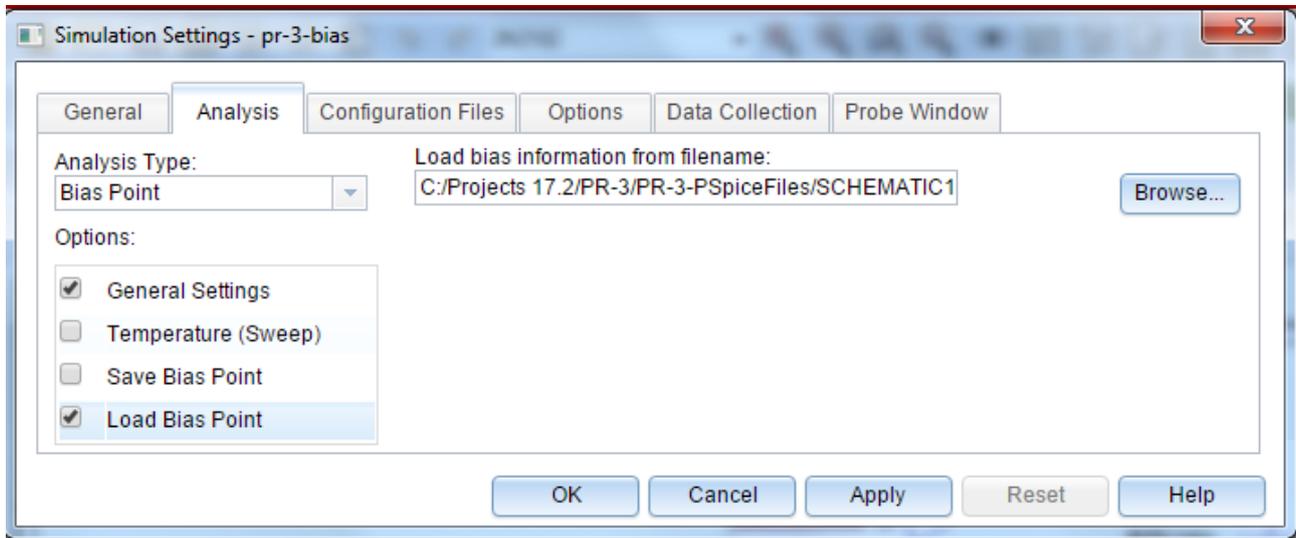


Рис. 2.45. Выбор файла загрузки смещения

После этого, выполнив моделирование, вы получите результаты, соответствующие схеме (рис. 2.43.а).

2.10. Контрольные вопросы

1. Назовите идеальные пассивные и активные элементы электрических цепей и их свойства.
2. Назовите понятия, характеризующие структуру электрической цепи.
3. Назовите основные законы и методы расчета электрических цепей.
4. Как выполняют нужной библиотеки для компонентов схемы ?
5. Как смоделировать цепь постоянного тока и просмотреть результаты?
6. Как проверить соблюдение баланса мощности в цепи постоянного тока ?
7. Как выполнить параметрический анализ при изменении значения одного компонента ?
8. Какие установки можно выполнить для окна Probe ?
9. Как можно использовать курсоры для анализа результатов в окне Probe ?
10. Как выполняют исследования при изменении двух параметров в схеме ?
11. Как провести измерения выходных характеристик транзистора ?
12. Как выполняют анализ, сохранение и загрузку режима постоянного тока электронной схемы ?

Глава 3. Анализ на переменном токе

3.1. Краткое теоретическое введение

3.1.1. Символический метод расчета

В электрических цепях переменного тока токи и напряжения меняются во времени и могут иметь синусоидальную гармоническую форму или периодическую несинусоидальную форму. Поэтому электрические цепи переменного тока разделяют на цепи синусоидального тока и цепи несинусоидального тока.

Расчет электрической цепи при синусоидальном сигнале

При гармоническом синусоидальном сигнале $e(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi_E)$ расчет электрических цепей проводят символическим методом с использованием комплексных амплитуд токов и напряжений и комплексных сопротивлений.

Рассмотрим пример расчета простой цепи синусоидального тока (рис. 3.1.). Для расчета символическим методом исходную цепь для мгновенных значений напряжений и токов (рис. 3.1.a) заменяют символической схемой замещения для комплексных амплитуд напряжений и токов и комплексных сопротивлений (рис. 3.1.b).

В символической схеме замещения *комплексная амплитуда* входного напряжения $\underline{E}_m = E_m \cdot e^{j\psi}$.

Сопротивление каждой ветви цепи характеризуют *комплексным сопротивлением*:

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Z \cdot e^{j\varphi},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - *модуль комплексного сопротивления*,
 $\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right)$ - *аргумент комплексного сопротивления*. В ветви без индуктивности $L = 0$, а в ветви без емкости $C = \infty$.

Комплексной проводимостью ветви называется величина, обратная комплексному сопротивлению:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = g - jb = Y e^{-j\varphi},$$

где $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$ - *модуль комплексной проводимости*, $\varphi = \arctg\left(\frac{b}{g}\right)$ - *аргумент комплексной проводимости*.

Часть цепи, содержащая одну или несколько ветвей и имеющая два входных зажима, называется двухполюсником. Входное эквивалентное сопротивление двухполюсника рассчитывают сверткой цепи.

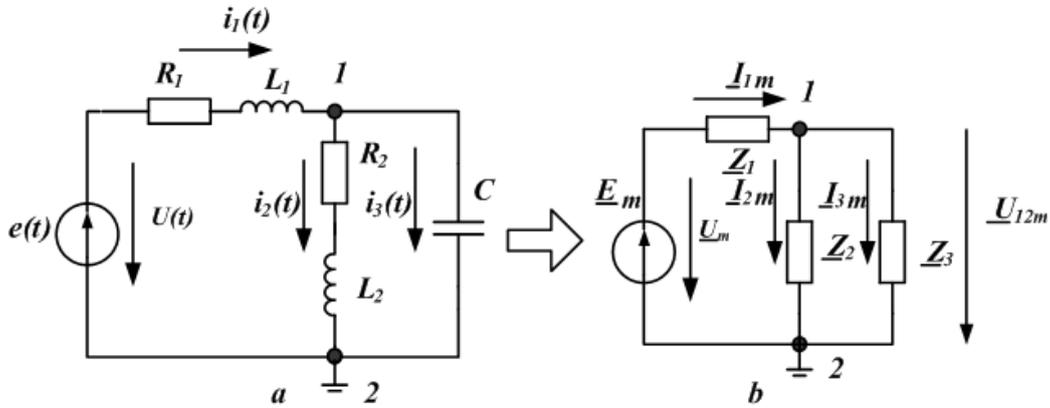


Рис. 3.1. Схема простой цепи синусоидального тока

Например, для схемы, изображённой на рис 3.1b:

$$\underline{Z}_{\text{эКВ}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

$$\text{Входной ток } \underline{I}_{1m} = \frac{\underline{E}_m}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}} = \frac{E_m \cdot e^{j\psi_E}}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} \cdot e^{j\varphi}} = I_{1m}(\omega) \cdot e^{j\psi_I(\omega)}.$$

Здесь зависимость амплитуды тока от частоты $I_{1m}(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика тока (АЧХ), $\psi_I(\omega) = \psi_E(\omega) - \varphi(\omega)$ - фазо-частотная характеристика тока (ФЧХ). Если принять $\psi_E = 0$, то $\psi_I(\omega) = -\varphi(\omega)$. В цепи с индуктивным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ меньше нуля и напряжение опережает ток по фазе. В цепи с емкостным сопротивлением $[-\varphi(\omega)]$ больше нуля и напряжение отстает от тока по фазе. В цепи с чисто активным сопротивлением, а также в резонансных режимах, когда $X_{\text{эКВ}} = 0$, ток совпадает с напряжением по фазе.

3.1.2. Мощность в цепи гармонического тока

Мгновенное напряжение на входе двухполюсника (рис. 3.1.a) $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_U) = e(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi_E)$.

Мгновенное значение тока на входе двухполюсника равно $i_1(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_I)$. Мгновенная мощность будет равна:

$$p(t) = u(t) \cdot i_1(t) = \frac{U_m \cdot I_{1m}}{2} \cos \varphi - \frac{U_m \cdot I_{1m}}{2} \cos(2\omega t + 2\psi_U - \varphi).$$

Средняя мощность за период или активная мощность $P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = UI \cos \varphi$. Здесь $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ - действующие значения напряжения и тока на входе двухполюсника.

В расчетах символическим методом применяют комплексную мощность $\tilde{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$, где \underline{U} - комплексное действующее значение напряжения на входе пассивного двухполюсника, \underline{I}^* - комплексно-сопряженный ток, P - активная мощность, Q - реактивная мощность. Активная мощность потребляется в цепи. Реактивная мощность обменивается между источниками энергии и накопительными элементами.

3.1.3. Расчет цепи методом двух узлов

Метод двух узлов является частным случаем метода узловых напряжений. Этот метод целесообразно применять, когда в схеме (рис. 3.2) всего два узла. Один узел b можно заземлить.

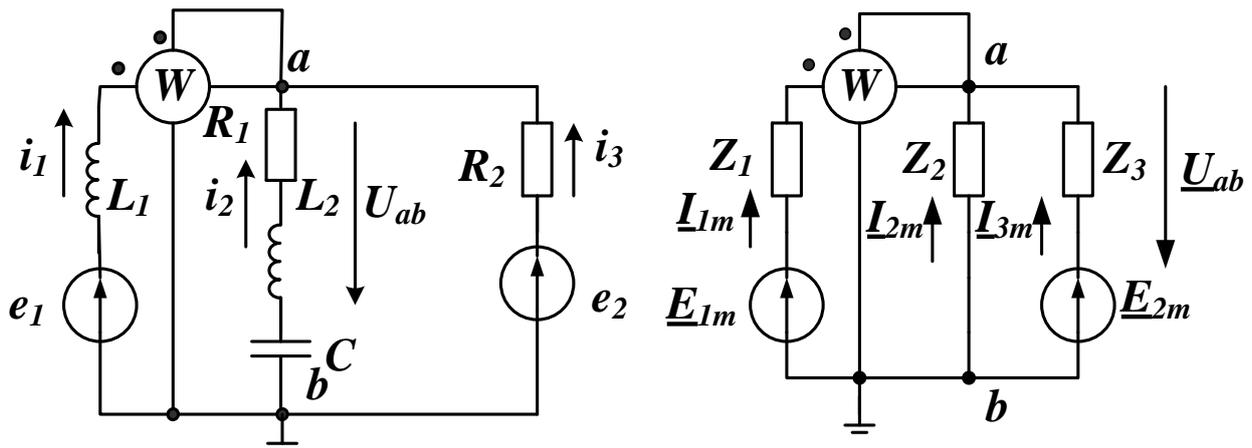


Рис. 3.2. Схема исходной цепи с двумя узлами и схема замещения

В схеме замещения (справа) $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ - комплексные сопротивления ветвей; $\underline{E}_{1m}, \underline{E}_{2m}$ - результирующие комплексные амплитуды ЭДС в ветвях; $\underline{I}_{1m}, \underline{I}_{2m}, \underline{I}_{3m}$ - комплексные амплитуды токов в ветвях. Напряжение между узлами a и b можно рассчитать по формуле метода двух узлов:

$$\underline{U}_{abm} = \frac{\underline{E}_{1m} \underline{Y}_1 + \underline{E}_{2m} \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3}.$$

После расчета напряжения \underline{U}_{abm} токи в ветвях можно найти по обобщенному закону Ома.

Простую цепь гармонического тока надо уметь рассчитывать «в ручную», используя комплексные числа и калькулятор. Расчет сложных цепей можно
В.А. Алехин. OrCAD-17.2. Анализ и проектирование электронных устройств

выполнить в *Mathcad* или исследовать, используя программы моделирования (OrCAD, TINA, MultiSim).

3.2. Расчетное задание

В цепи (рис. 3.3) действует синусоидальный источник напряжения $e(t) = 8 \cdot \sin 1000t$ ($f = 159,15$ Гц).

Номинальные значения пассивных элементов цепи указаны на схеме. Найти ток в цепи, напряжения на всех элементах. Построить графики напряжений и тока. Построить векторную диаграмму.

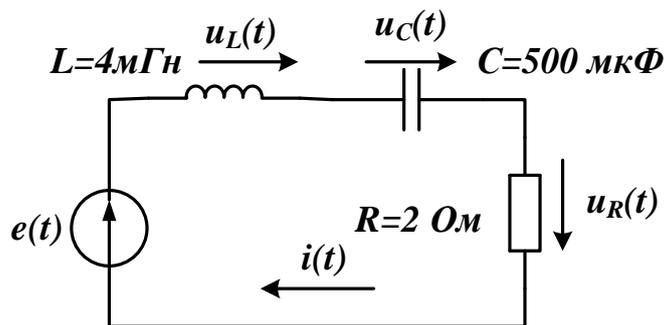


Рис. 3.3. Расчетная схема к заданию 3.2

Рекомендации:

1. Вычислить комплексную амплитуду источника напряжения и комплексные сопротивления всех элементов.
2. Вычислить комплексную амплитуду тока.
3. Вычислить комплексные амплитуды напряжений на элементах цепи.
4. Построить векторную диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.
5. Записать выражения для мгновенных значений напряжений и токов.

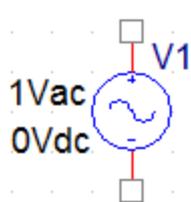
3.3. Компьютерное моделирование по заданию 3.2

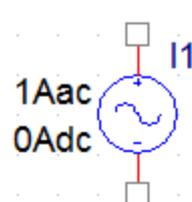
Создаем новый проект pr-4, используя PSpice Analog or Mixed A/D и шаблон simple.opj.

Анализ переменного тока (АС – анализ) используется для расчёта частотной и фазовой характеристики схемы при развёртке частоты источника переменного напряжения или тока, подключённого к цепи. АС - анализ передаточных характеристик представляет собой линейный анализ и вычисляет характеристики отклика схемы на малый сигнал в заданном диапазоне частот путём замены любого нелинейного схемного устройства линейными моделями. Анализ на постоянном токе выполняют до запуска анализа переменного тока и используют для эффективной линеаризации цепи вокруг рабочей точки покоя (DC смещения). Следует отметить, что анализ переменного тока не выполняется на отдельных фрагментах (вырезках) сигнала. Вам придётся запустить переходный анализ, чтобы определить эти эффекты. Для того, чтобы выполнить анализ переменного тока, используется независимый источник напряжения пе-

ременного тока V_{AC} (рис. 3.4а) или источник переменного тока I_{AC} (рис 3.4б) из исходной библиотеки. Тем не менее, любой независимый источник напряжения, который имеет свойства переменного тока, включённый в раздел Parts, может быть использованы в качестве входного сигнала. Рисунок 3.4 показывает свойства, источников из библиотеки Parts - Source, которые отображаются в редакторе свойств.

Такие же переменные источники можно загрузить из меню Place>PSpice Component>Source.





A	
	+ SCHEMATIC1 : PAGE1
ACMAG	1Vac
ACPHASE	
Color	Default
DC	0Vdc
Designator	
Graphic	VAC.Normal
ID	
Implementation	
Implementation Path	<input type="checkbox"/>
Implementation Type	PSpice Model
Location X-Coordinate	220
Location Y-Coordinate	220
Name	INS476
Part Reference	V1
PCB Footprint	
Power Pins Visible	<input type="checkbox"/>
Primitive	DEFAULT
PSpiceOnly	TRUE
PSpiceTemplate	V@REFDES %+ %- ?DC D
Reference	V1
Source Library	C:\CADENCE\SPB_17.2
Source Package	VAC
Source Part	VAC.Normal
Value	VAC

A	
	+ SCHEMATIC1 : PAGE1
ACMAG	1Aac
ACPHASE	
Color	Default
DC	0Adc
Designator	
Graphic	IAC.Normal
ID	
Implementation	
Implementation Path	<input type="checkbox"/>
Implementation Type	PSpice Model
Location X-Coordinate	310
Location Y-Coordinate	220
Name	INS445
Part Reference	I1
PCB Footprint	
Power Pins Visible	<input type="checkbox"/>
Primitive	DEFAULT
PSpiceOnly	TRUE
PSpiceTemplate	I@REFDES %+ %- ?DC DC
Reference	I1
Source Library	C:\CADENCE\SPB_17.2
Source Package	IAC
Source Part	IAC.Normal
Value	IAC

a)
b)

Рис. 3.4. Свойства переменных источников напряжения и тока

По умолчанию, величина источника переменного напряжения составляет 1 В. При вычислении частотных характеристик, как правило, вычисляют коэффициент усиления и фазы для отклика схемы. Так как коэффициент

усиления контура определяется отношением V_{out} / V_{in} , при установке V_{in} равным 1 В, функция усиления или передачи цепи будет равна напряжению на выходе V_{out} .

Переменные источники напряжения 1Vac и тока 1Aac рекомендуют использовать для анализа амплитудно-частотных характеристик цепей.

В библиотеке Place> Parts – Source и другие источников синусоидального сигнала (рис. 3.5), в которых вы можете установить смещение по постоянному напряжению, амплитуду синусоидального сигнала, частоту и фазу.

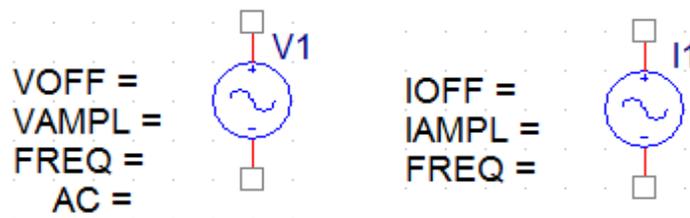


Рис. 3.5. Источники синусоидальных сигналов

Эти два источника синусоидальных сигналов рекомендуют использовать для анализа формы сигналов и переходных процессов.

3.3.1. Схема моделирования

На рис. 3.6 показана схема моделирования по заданию 3.2.

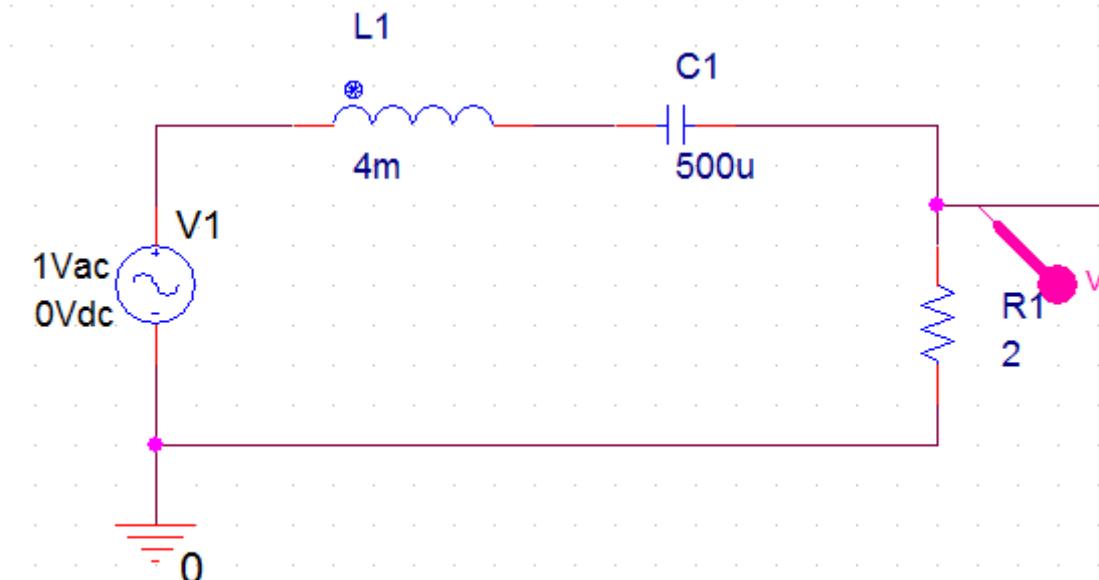


Рис. 3.6. Схема моделирования

Для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи подключим маркер напряжения к пину на резисторе.

Установим новый профиль моделирования, выбрав тип анализа AC Sweep/Noise, диапазон частот от 10 до 200 Гц, количество точек 1000 (рис. 3.7).

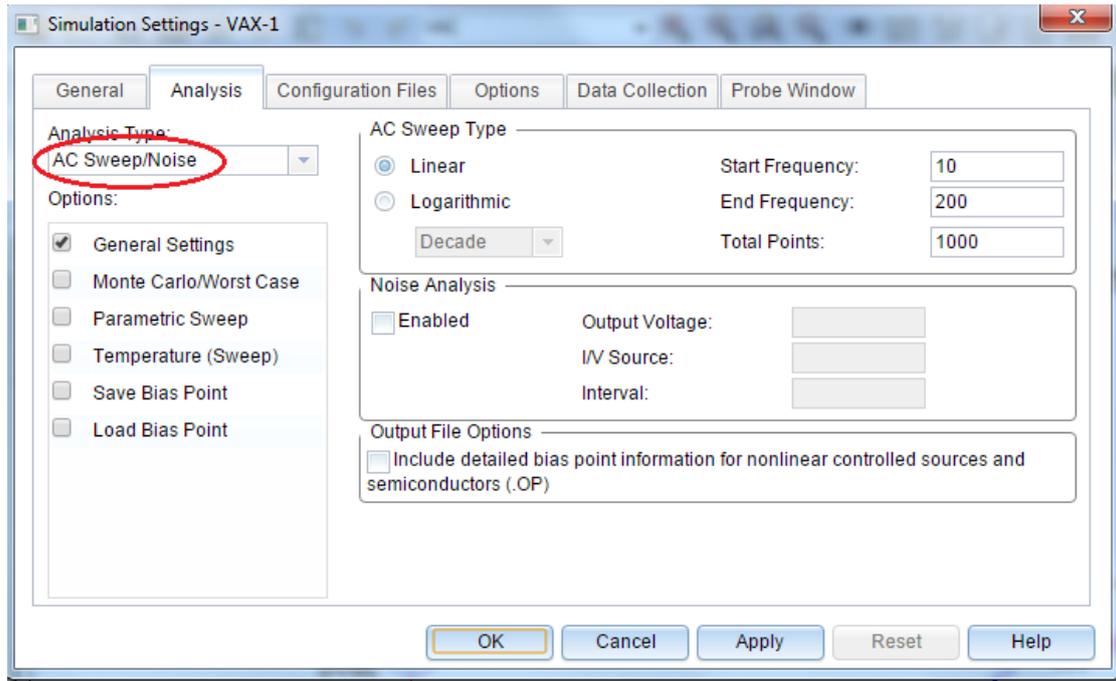


Рис. 3.7. Установка профиля моделирования АЧХ

Выполняем моделирование и получаем график АЧХ с резонансом на частоте 112 Гц (рис. 3.8).

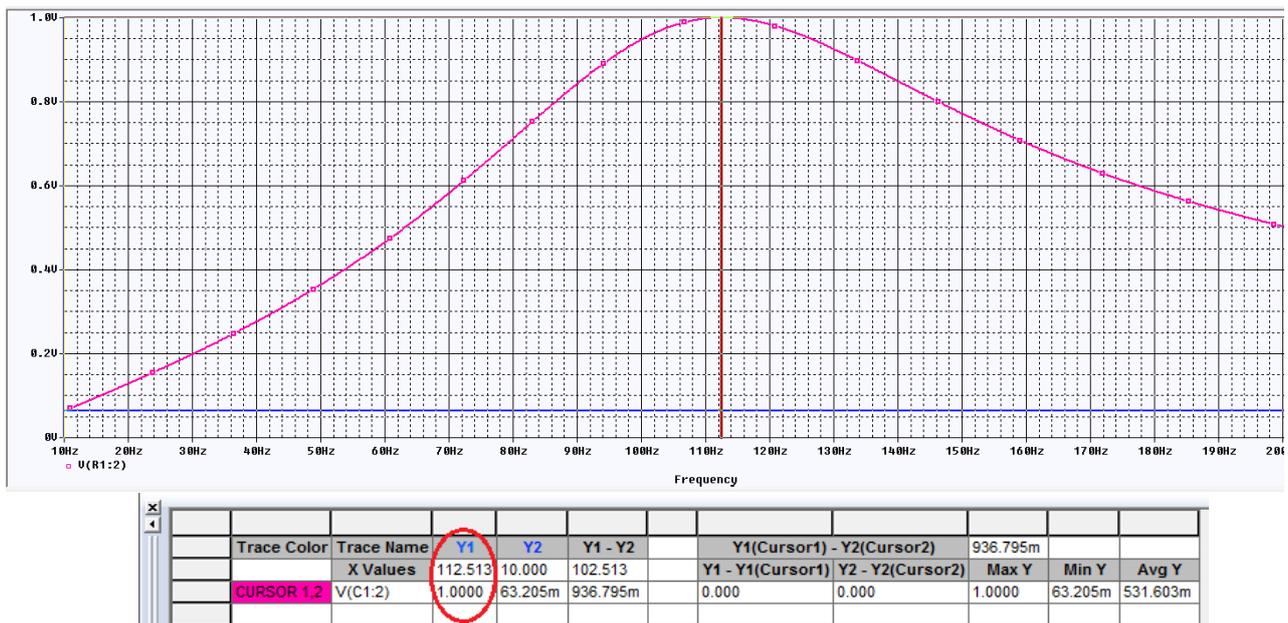


Рис. 3.8. Результаты моделирования АЧХ

Проведем исследование формы сигналов на резисторе и конденсаторе и сдвига фаз между током и напряжениями в цепи. Для этого установим синусоидальный источник напряжения из библиотеки Part с параметрами $V_{OFF}=0$, $V_{AMP}=1$, $FREQ=100$, $AC=0$.

На конденсаторе напряжение будем измерять двумя дифференциальными маркерами напряжения ($V+$ $V-$), подключенными к пинам (рис. 3.9).

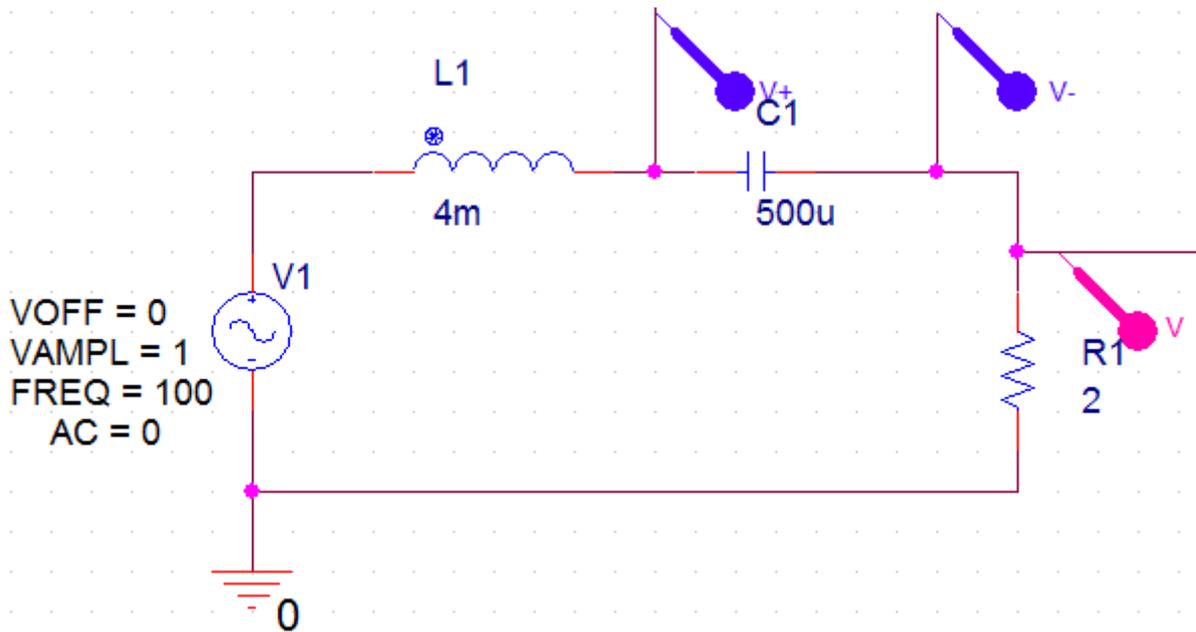


Рис. 3.9. Измерение двух напряжений в схеме

Для проведения измерений двух напряжений и сдвига фаз синусоидальных сигналов будем использовать два курсора.

3.3.2. Использование двух курсоров

На рис. 3.10 показаны графики (трассы) напряжений на резисторе U_R и конденсаторе U_C в окне Probe после моделирования.

Сначала выполним установку свойств курсоров. Для этого в окне Probe выбираем Tools>Options>Cursor Settings и устанавливаем цвета и толщину линий курсоров (рис. 3.10).

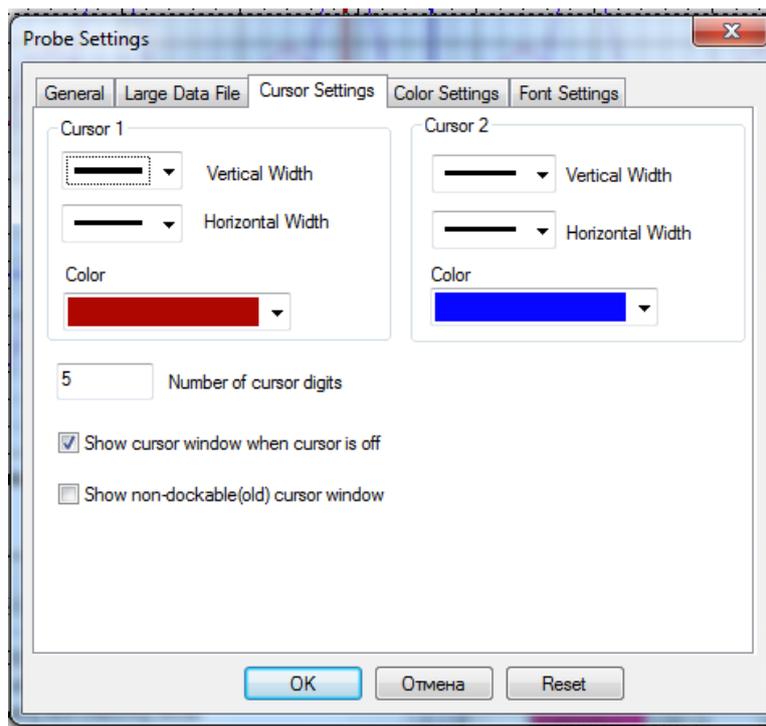


Рис. 3.10. Установка свойств курсоров

Далее для подключения двух курсоров выполняем следующее.

1. Включаем курсоры, выполняя команды Trace>Cursor>Disply.
2. Первый курсор включается и управляется левой кнопкой мыши. В строке легенды графиков левой кнопкой мыши надо щелкнуть по названию графика. При этом щелчок левой кнопкой мыши закрепляет за выбранным названием первый курсор, а щелчок правой кнопкой мыши по названию второго графика закрепит за ним второй курсор.
3. Первый курсор перемещается по графику при нажатой левой кнопке мыши. Второй курсор перемещается при нажатой правой кнопке мыши.
4. Для измерения временного сдвига графиков напряжений установим курсоры в нулевых точках графиков с положительной производной.

Напряжение на конденсаторе отстает от напряжения на резисторе на - 2,4747 мсек.

Для частоты $f = 100 \text{ Гц}$ сдвиг фазы составит:

$$\Delta\varphi = 2\pi f(-2,4747 \cdot 10^{-3}) \approx -1,57 \text{ рад} \approx -90^\circ.$$

Это соответствует теории гармонического тока: напряжение на емкости отстает от тока (или напряжения на резисторе) на 90° .

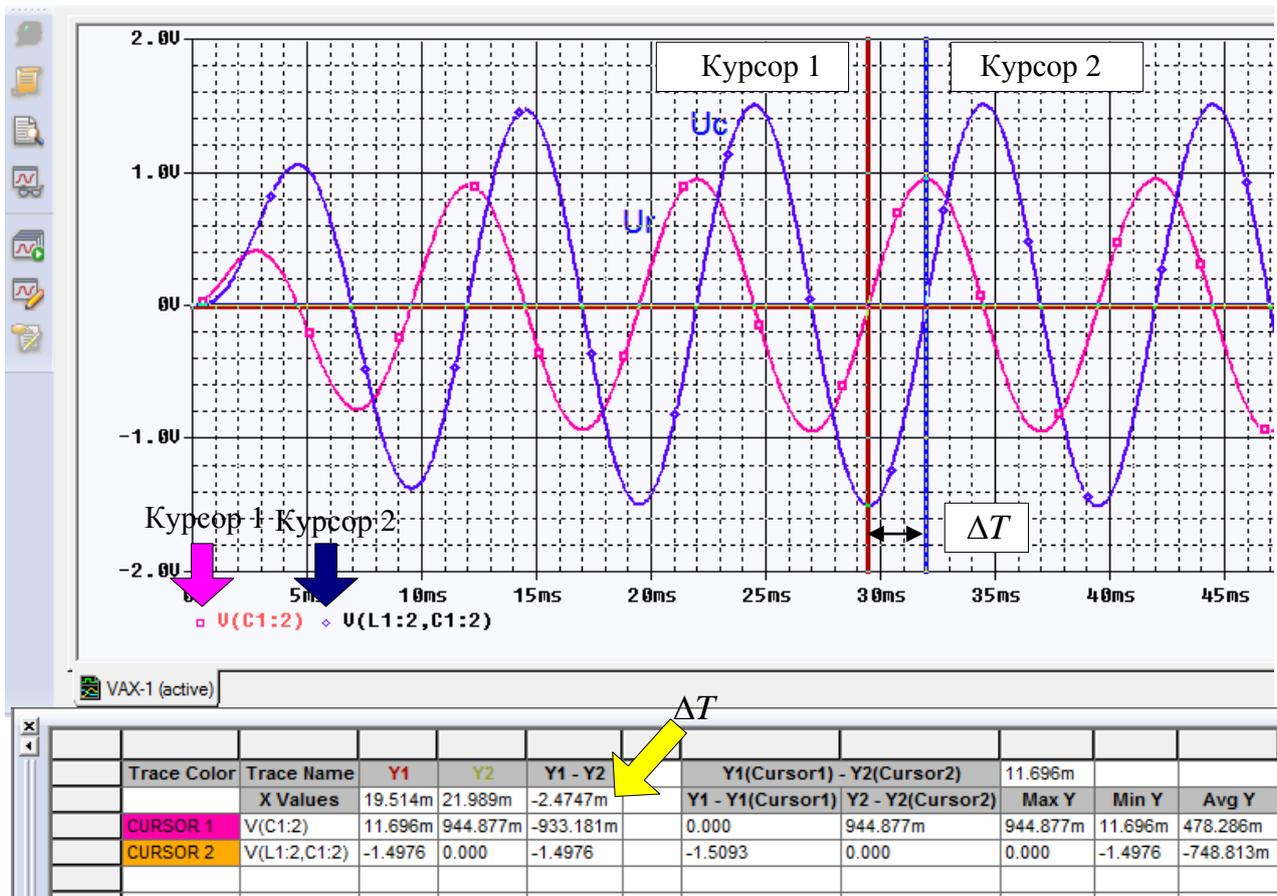


Рис. 3.11. Графики напряжений в схеме

5. Для перемещения курсоров в особые точки графиков надо выполнить следующее (рис. 3.12):

- выбрать нужный курсор соответствующей ему кнопкой мыши;
- выбрать левой кнопкой мыши нужную особую точку графика.

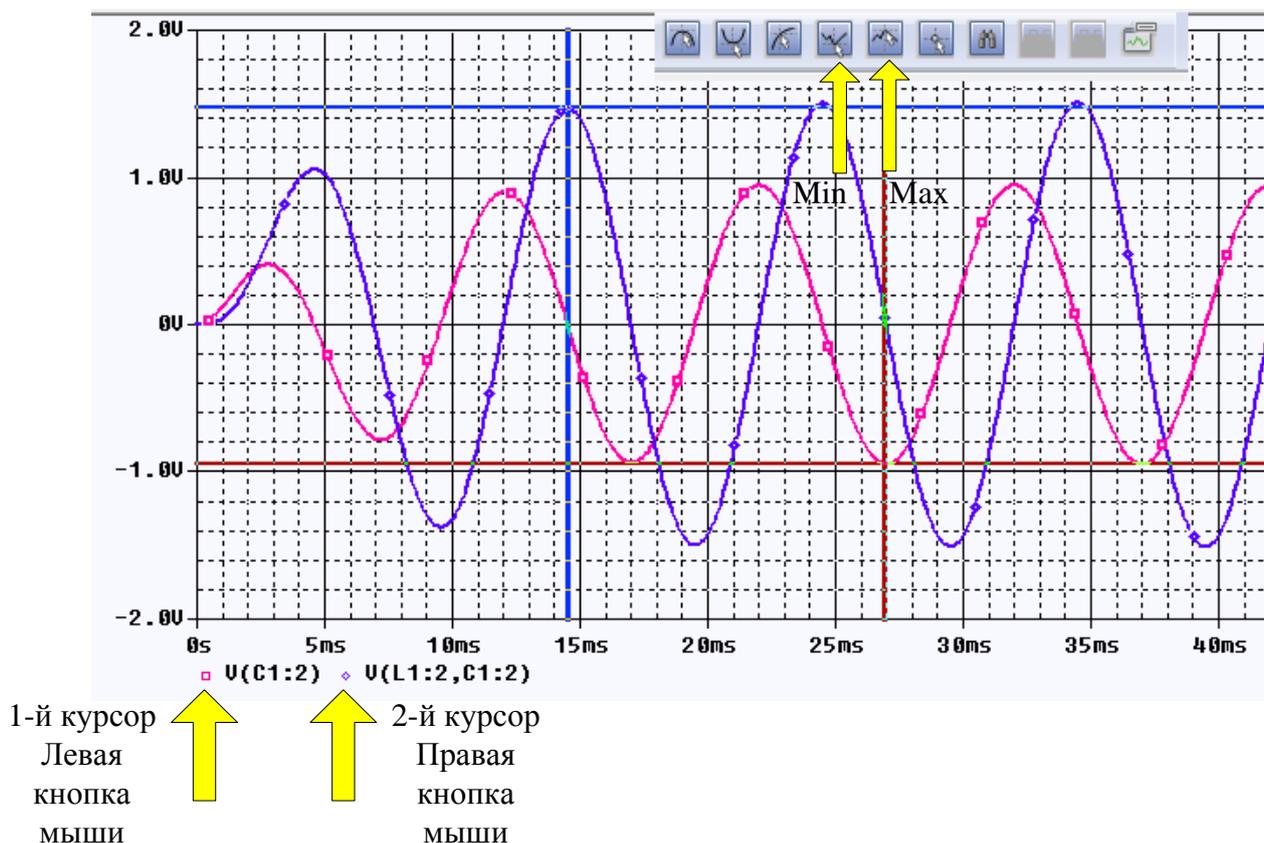


Рис. 3.12. Перемещение курсоров в Min и Max

Перемещать курсоры можно, используя специальные комбинации клавиш. Об этом можно прочитать в руководствах по PSpice и OrCAD.

В смешанных аналого-цифровых схемах в окне Probe отображается две области графиков.

В аналоговой области графика (если есть) оба курсора изначально помещены на трассировку, указанную первой в легенде трассировки и соответствующий символ трассы обозначается пунктирной линией.

В цифровой области графика (если есть) оба курсора изначально помещены на трассу, названную первой вдоль оси Y, и соответствующее имя трассировки обозначается пунктирной линией.

Мы покажем это позже при изучении смешанных схем.

3.4. Активный заграждающий фильтр

Электрические фильтры применяют для пропускания без ослабления колебаний одних (полезных) частот и подавления (ослабления) колебаний других частот (помех). В прошлые годы применяли пассивные электрические

LC-фильтры. Однако, значительные размеры катушки индуктивности ограничивают использование LC-фильтров в миниатюрной аппаратуре.

С появлением интегральных микросхем с операционными усилителями (ОУ) с начала 70-х годов прошлого века начали разрабатывать и широко применять *активные RC фильтры*, содержащие один или несколько ОУ и резисторы и емкости в цепях обратных связей. Порядок фильтра определяется наибольшей степенью переменной p в знаменателе его передаточной функции. Фильтры высокого порядка имеют лучшие частотные характеристики.

В зависимости от требований к качеству фильтрации и форме амплитудно-частотной характеристики применяют активные фильтры разной степени сложности: первого порядка, второго и более высоких порядков, с одним или несколькими ОУ, со специальной формой АЧХ (фильтры Баттерворта, Чебышева, Кауэра и т.д.).

Полосу частот, в которой затухание фильтра мало ($a=0$), называют полосой пропускания или полосой прозрачности

Полосу частот, в которой затухание фильтра велико ($a=\infty$), называют полосой задерживания или полосой подавления.

Классификация фильтров по полосе пропускания показана на рис. 3.13. Области со штриховкой соответствуют полосе задерживания. Прозрачные области соответствуют полосе пропускания (прозрачности). Граничные частоты полосы пропускания и задерживания называют частотами среза и обозначают ω_{c1}, ω_{c2} .

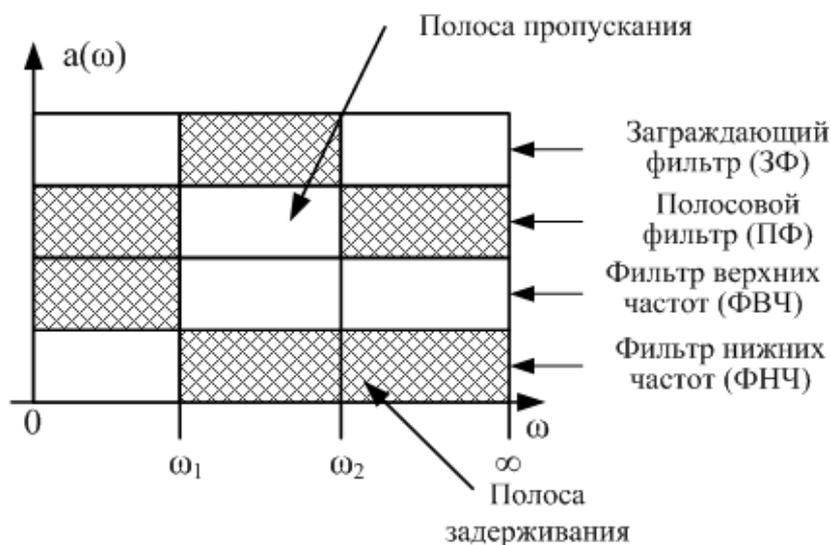


Рис. 3.13. Классификация фильтров по полосе пропускания

Мы будем рассматривать активный заграждающий фильтр (ЗФ) второго порядка (рис. 3.14). Такой фильтр называют ещё режекторным.

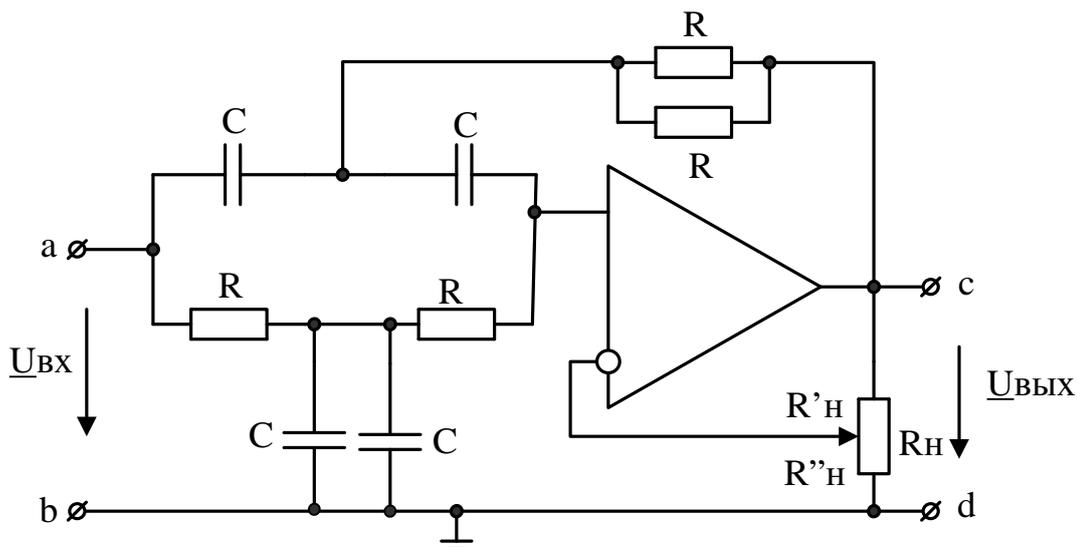


Рис. 3.14. Активный заграждающий фильтр

В заграждающем фильтре (рис. 3.14) все резисторы одинаковы и равны R , все емкости одинаковы и равны C . Расчетные формулы:

$$K(\omega) = \frac{K|\omega^2 - \omega_0^2|}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\omega^2\omega_0^2(2 - K)^2}},$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, K = 1 + \frac{R'_H}{R''_H}$$

Для значений $R=10$ кОм, $C=22$ нФ получим:

$$\omega_0 = \frac{1}{10^4 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 4,545 \cdot 10^3 \text{ 1/c}, f_0 = 723 \text{ Гц}.$$

Этот фильтр подробно исследован в книгах автора по электронике с использованием моделирования в программной среде TINA. Поэтому результаты, полученные в OrCAD, мы будем проверять, сравнивая с моделированием в TINA.

3.4.1. Моделирование активного заграждающего фильтра

Создаем новый проект PR-5 для аналогового и смешанного моделирования на основе проекта simple.opj.

Выберем операционный усилитель типа AD648A. PSpice модель этого ОУ находится в библиотечном файле ...\pspice\oramp.olb. В менеджере проектов надо добавить этот файл в библиотеку проекта PR-5 (рис. 3.15).

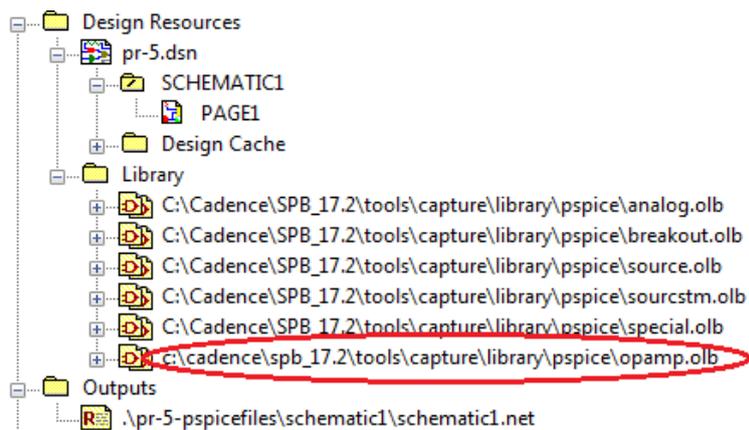


Рис. 3.15. Добавление библиотеки pspice\opamp

Остальные компоненты фильтра выберем из библиотеки Place>PSpice Components. Модель фильтра показана на рис. 3.16. Чтобы не загромождать схему источниками питания (особенно при нескольких ОУ), мы подключили к двум источникам постоянного напряжения V1 и V2 символы VCC из библиотеки CAPSYM. В источнике напряжения V1 к VCC подключен «плюс» напряжения. В источнике V2 переименуем символ на VSS и подключим к нему «минус» напряжения. Теперь к выводам питания ОУ достаточно подключить символы VCC и VSS.

В потенциометре обратной связи R6 установим коэффициент передачи SET=0,8.

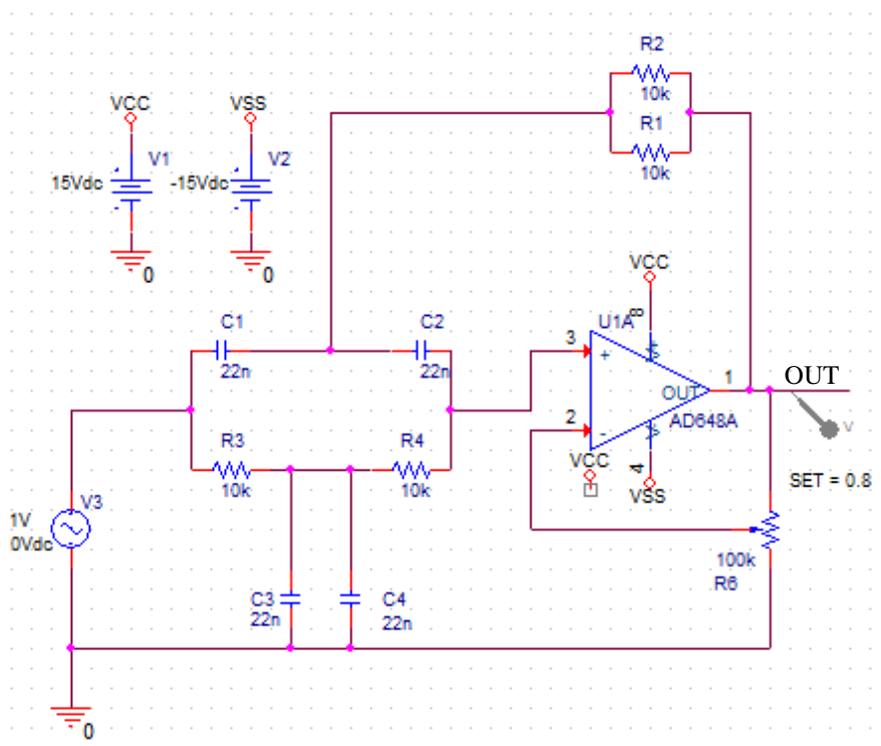


Рис. 3.16. Модель активного заграждающего фильтра

Создадим новый профиль моделирования VAXNTH (notch filter – режекторный фильтр) (рис. 3.17) с разверткой по частоте от 10 Гц до 2 кГц.

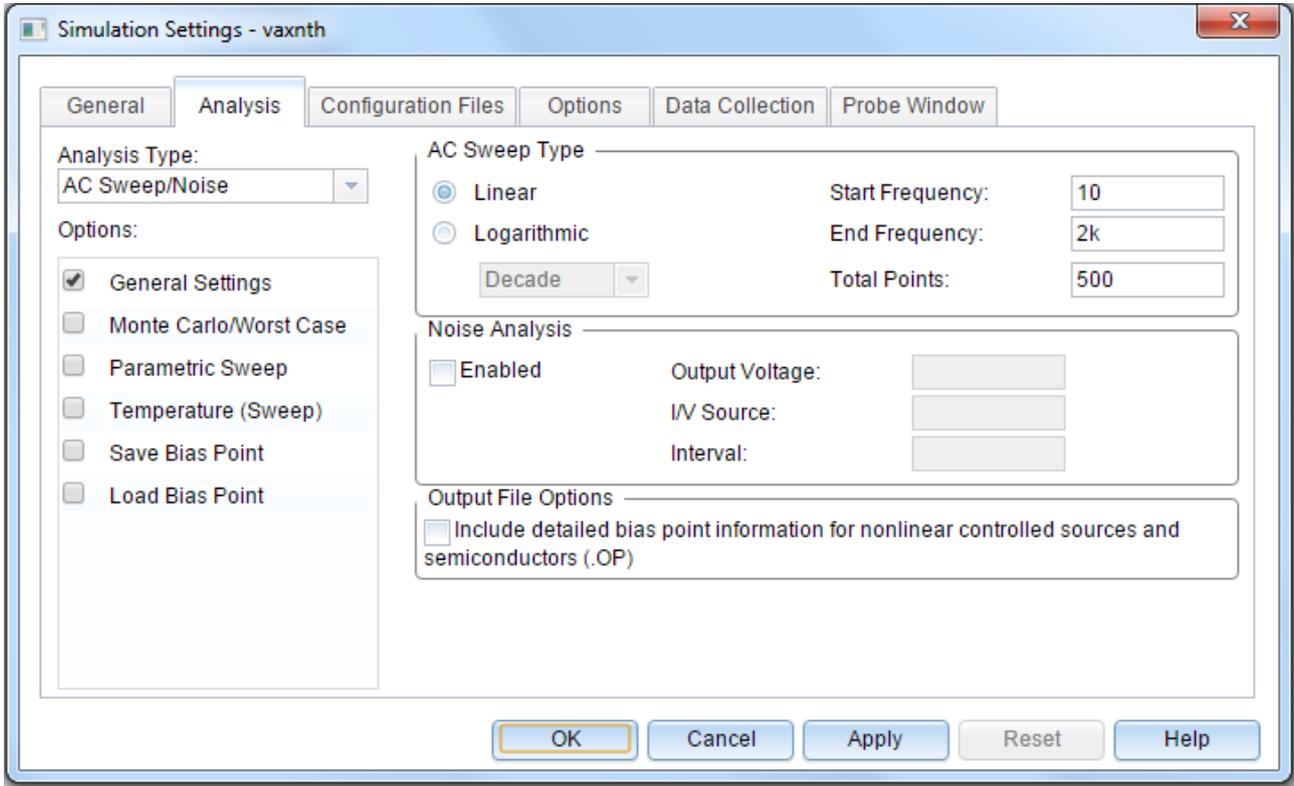


Рис. 3.17. Профиль моделирования заграждающего фильтра

Проводим моделирование и получаем в окне Probe график амплитудно-частотной характеристики заграждающего фильтра (рис. 3.18). Используем одну из функций курсора: Trace > Cursor > Min  или иконку . Частота режекции равна 723,848 Гц. На частоте 10 Гц передача фильтра равна 1,2496.

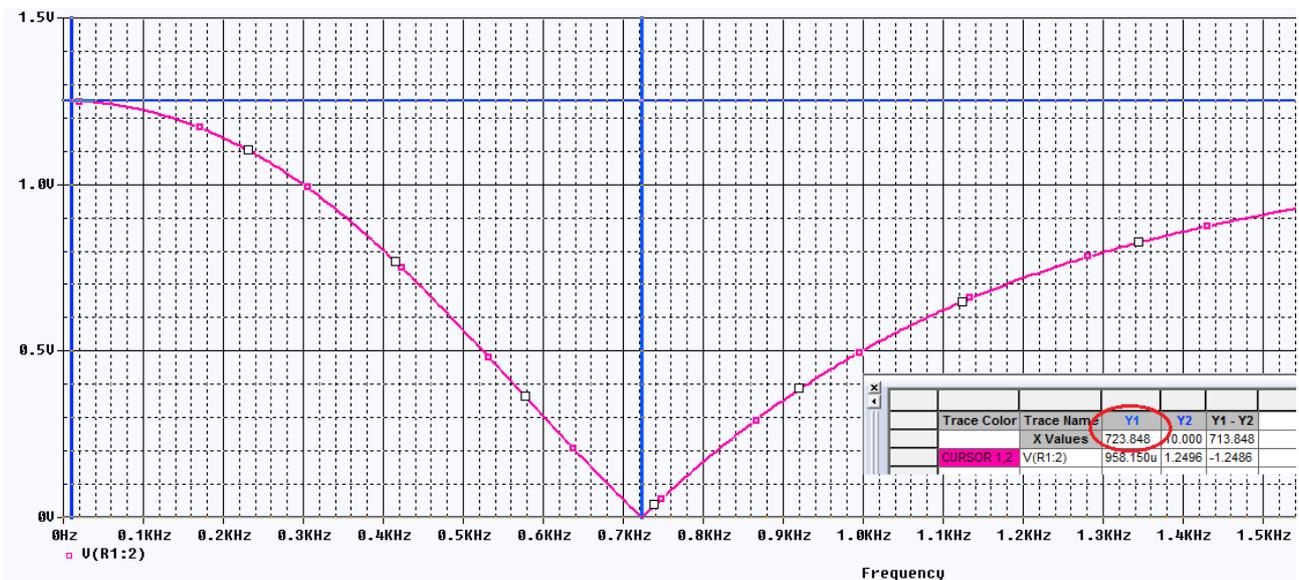


Рис. 3.18. График АЧХ заграждающего фильтра

Для большей точности чтения, увеличьте масштаб в нижней точке графика: View > Zoom > Area или используйте иконки (Рис. 3.19).

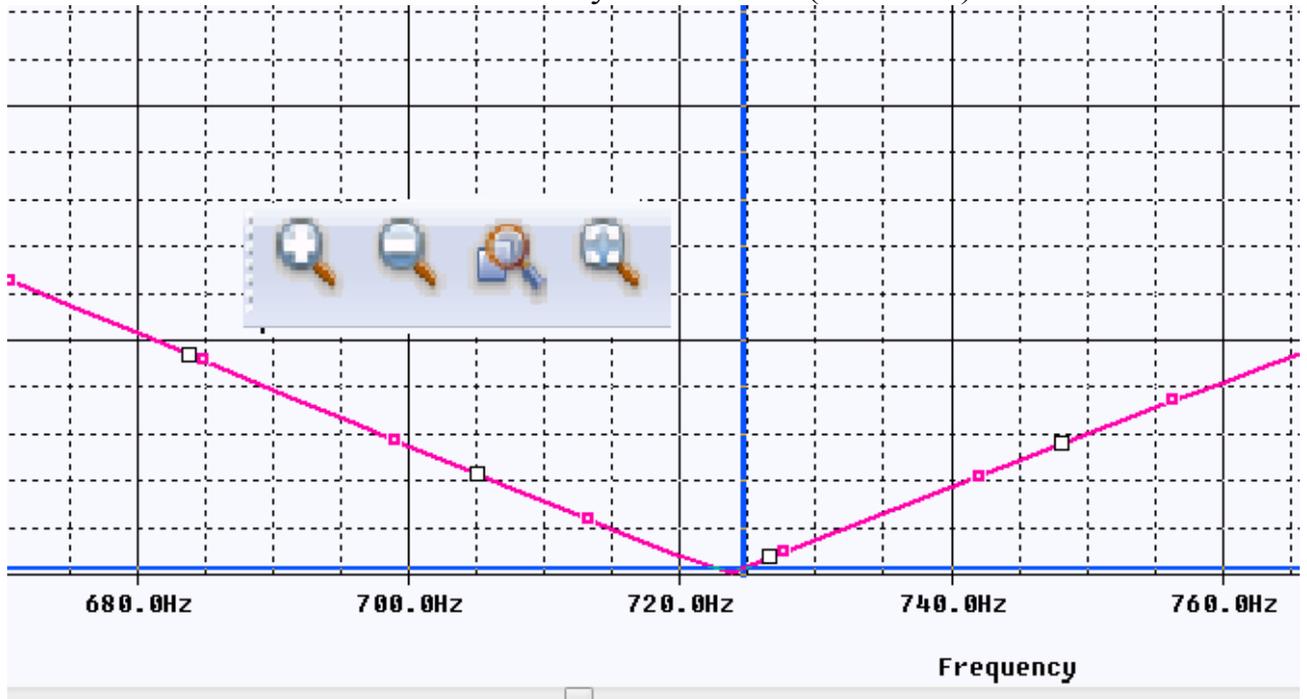


Рис. 3.19. Увеличение масштаба графика

Перестроим дисплей Probe в исходный размер: View > Zoom > Fit.

Для удаления графика выберем имя графика внизу дисплея и нажмем Delete или выберем Trace > Delete all Traces.

3.4.2. Добавление и изменение графиков

Теперь мы собираемся вручную добавить график выходного напряжения $V(out)$. В меню окна Probe выбираем: Trace > Add Trace.

Появляется окно Add Traces (рис. 3.20). В этом окне можно выбрать любой параметр схемы для просмотра графика (токи, напряжения, мощности и пр.).

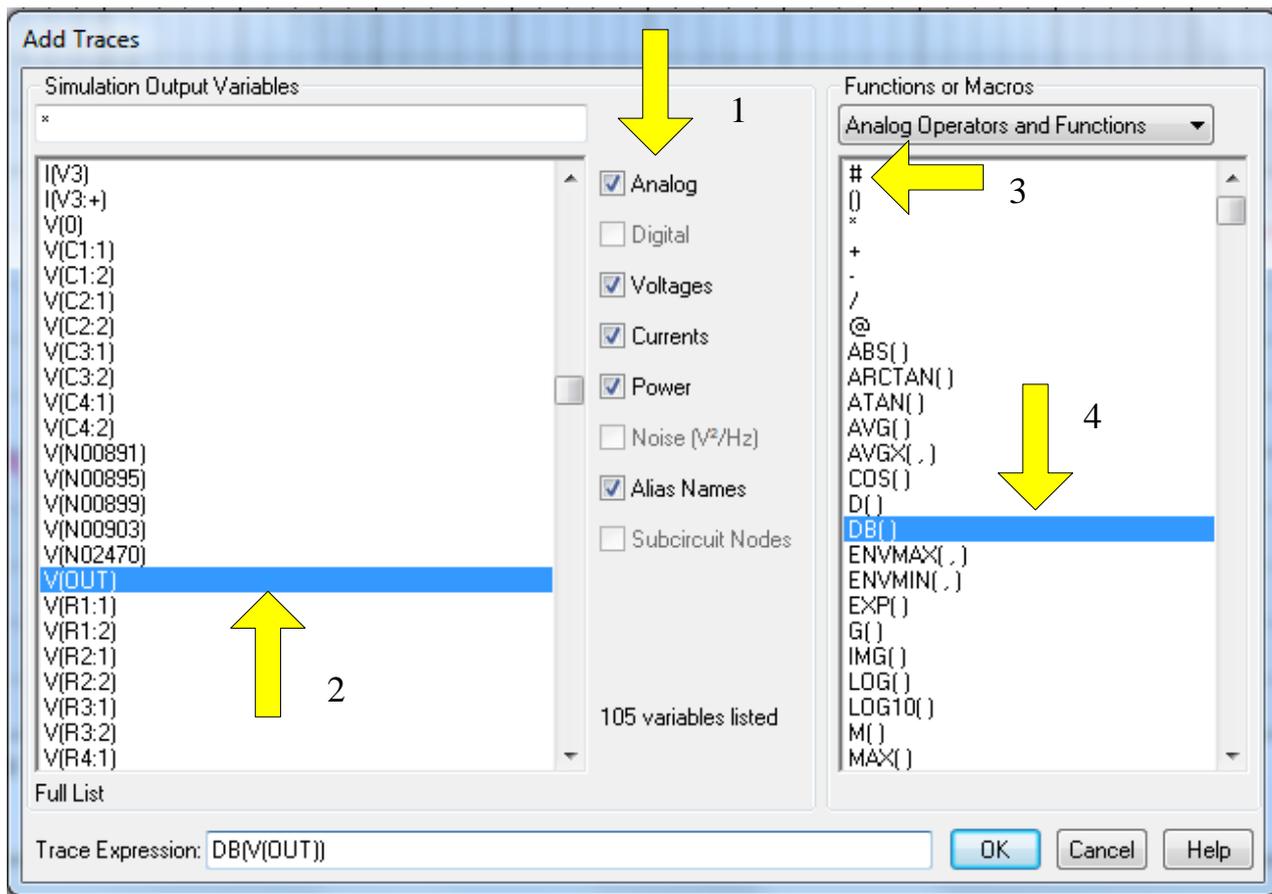


Рис. 3.20. Окно Add Trace

Можно сделать выбор нужных видов графиков в окне (стрелка 1), выбор конкретного графика для отображения в окне Probe (стрелка 2), линейную шкалу координат (стрелка 3) или установить шкалу в децибеллах (стрелка 4). В этом случае в окне Trace Expression должно быть записано: DB[V(OUT)].

Чтобы получить график АЧХ по оси Y в децибеллах, можно также использовать маркер dB Magnitude of Voltage (рис. 3.21).

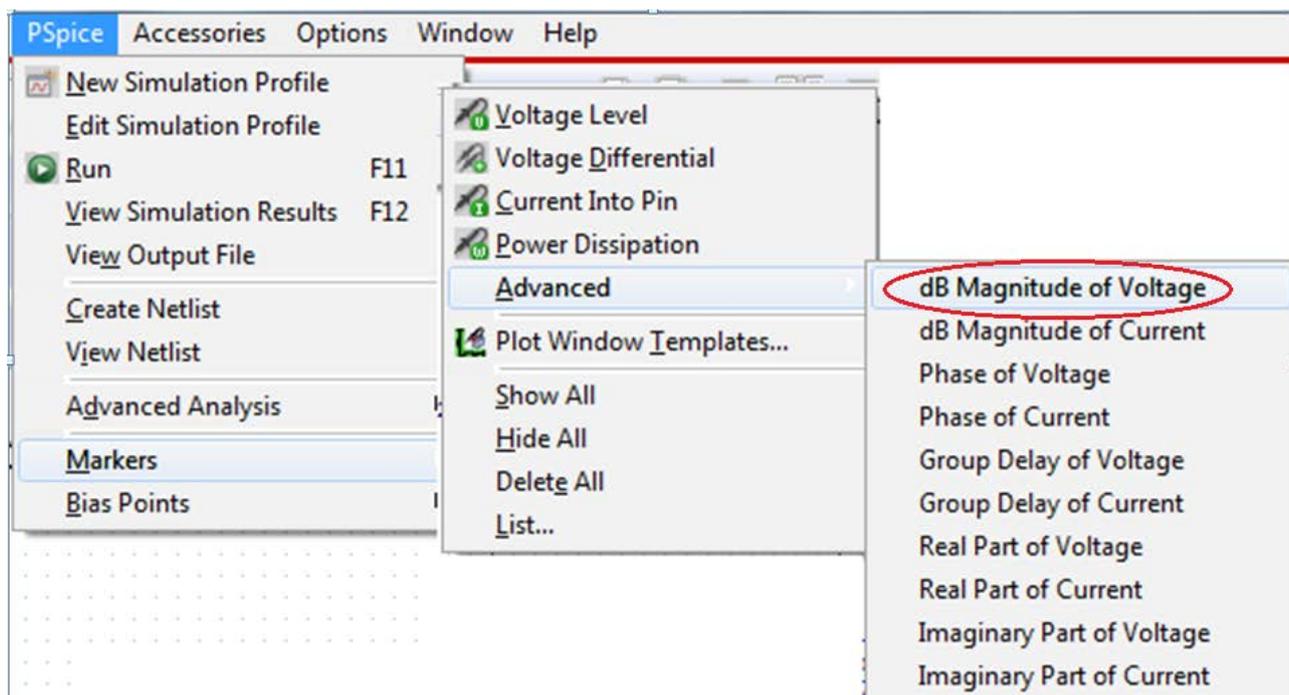


Рис. 3.21. Выбор маркера для измерения в децибеллах

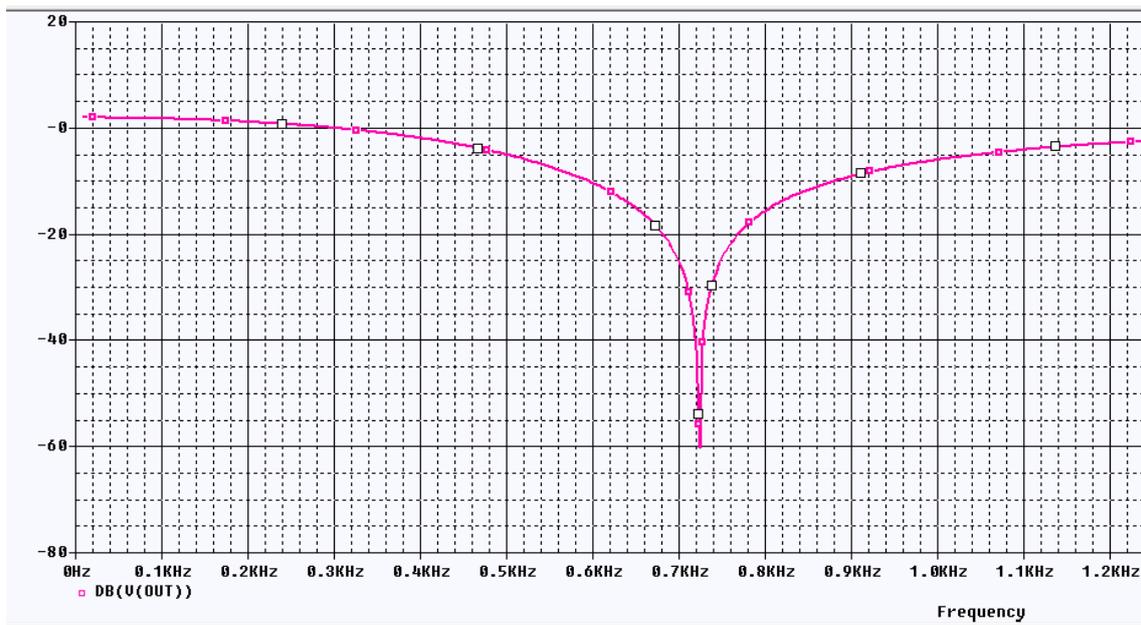


Рис. 3.22. График АЧХ в децибеллах

На рис. 3.23 показано измерение в двух точках схемы и соответствующие этому случаю графики (рис. 3.24).

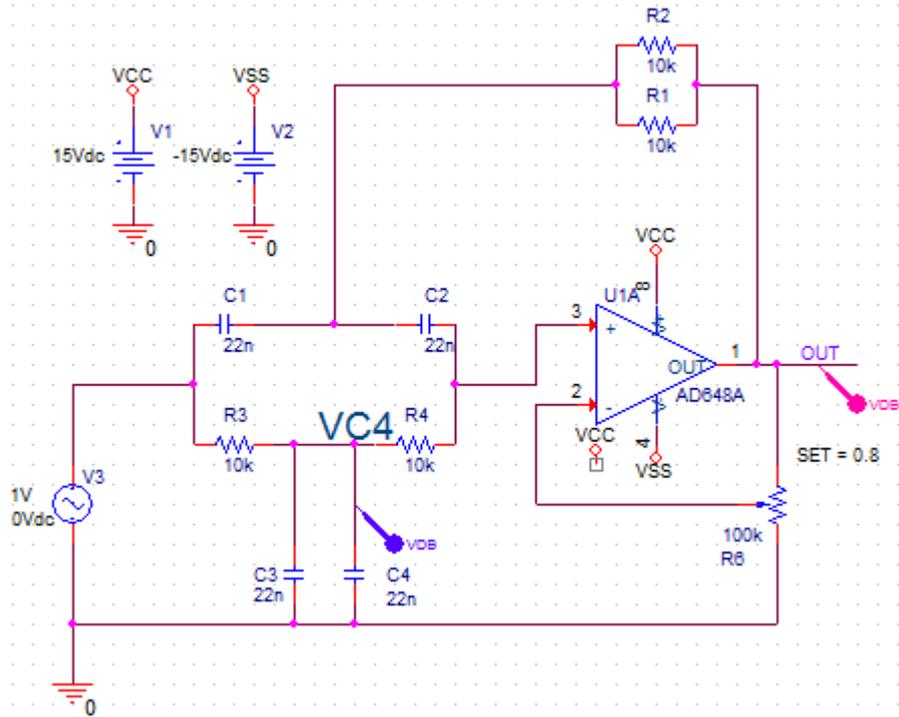


Рис. 3.23. Измерение в двух точках схемы

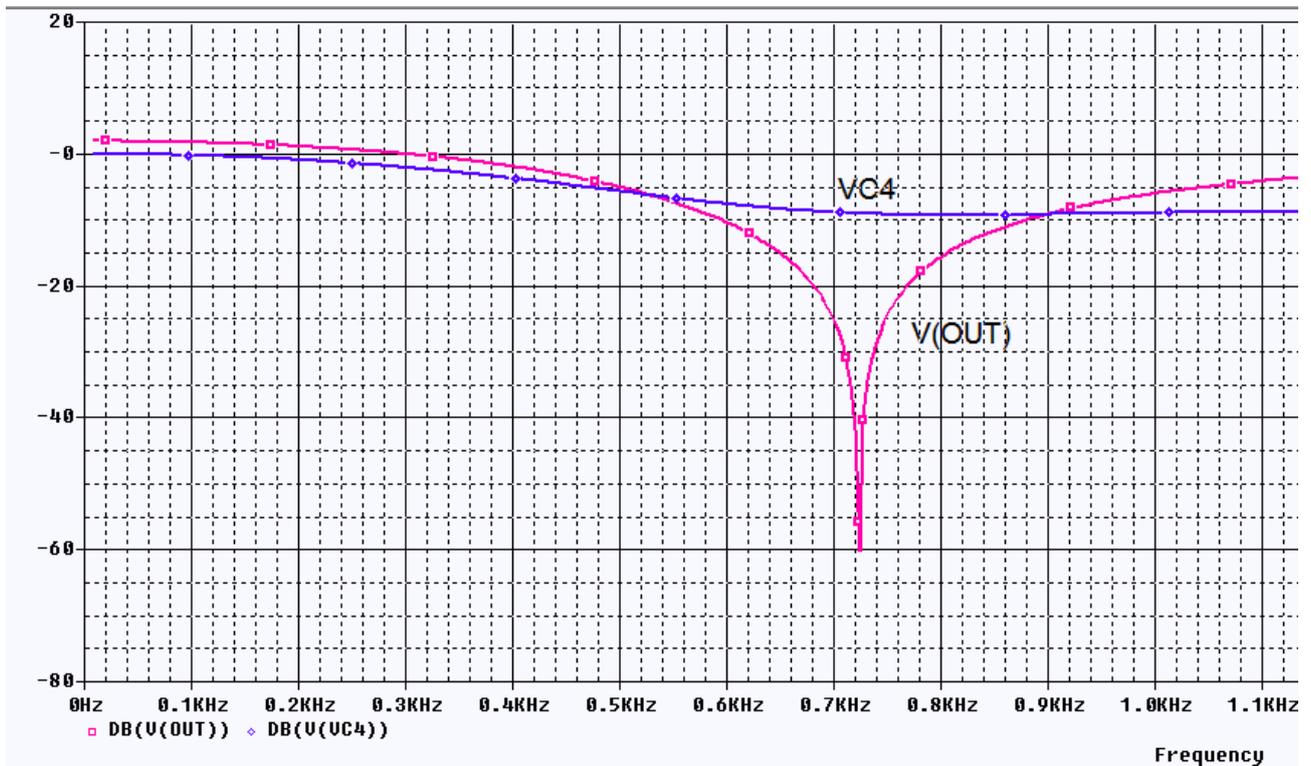


Рис. 3.24. Графики измерений в двух точках

Аналогичный результат мы получим, если в окне Add Trace введем выражение $DB(V(VC4))$.

Для измерения амплитуды и фазы выходного сигнала надо подключить к выходу маркеры db Magnitude of Voltage и Phase of Voltage. На рис. 3.25 показаны графики амплитуды и фазы.

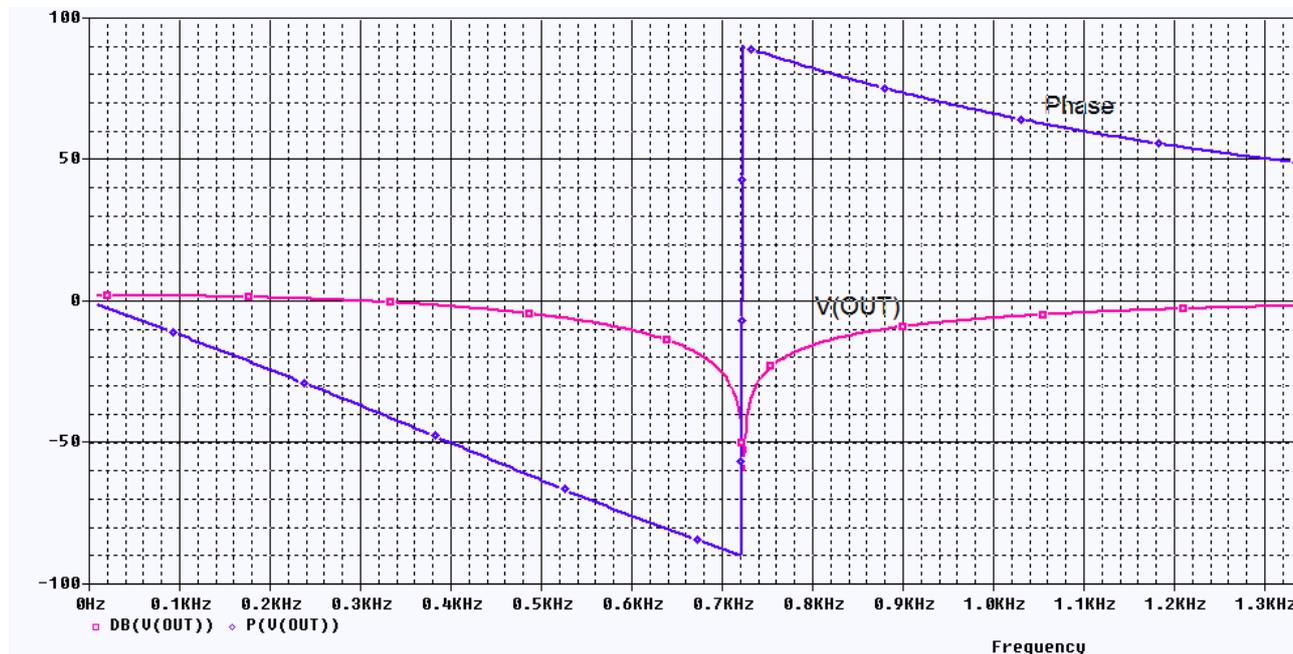


Рис. 3.25. Графики амплитуды и фазы заграждающего фильтра
Второй способ: ввести в окне Add Trace P(V(OUT)).

3.5. Многовариантный анализ активного фильтра

3.5.1. Изменение величины резисторов

Создадим новый проект PR-6 на основе проекта PR-5, выбрав файл проекта PR-5 в окне Create PSpice Project (рис. 3.26).

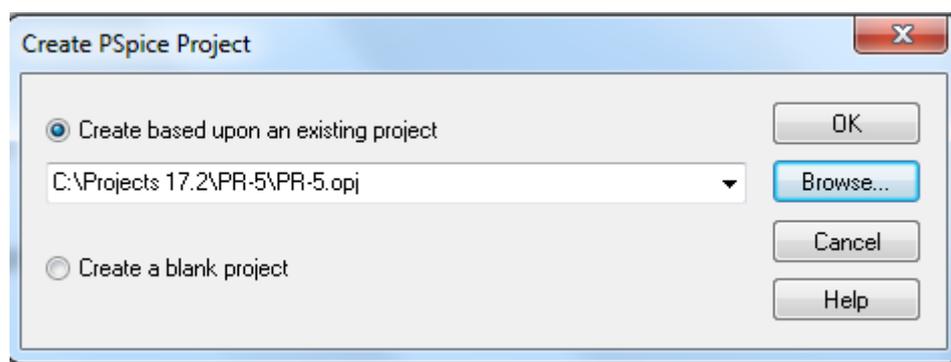


Рис. 3.26. Создание нового проекта на основе существующего

Поставим задачу: определить изменения АЧХ при изменении значения резисторов от 8 кОм до 12 кОм с шагом 1 кОм.

Для этого выполняем следующее.

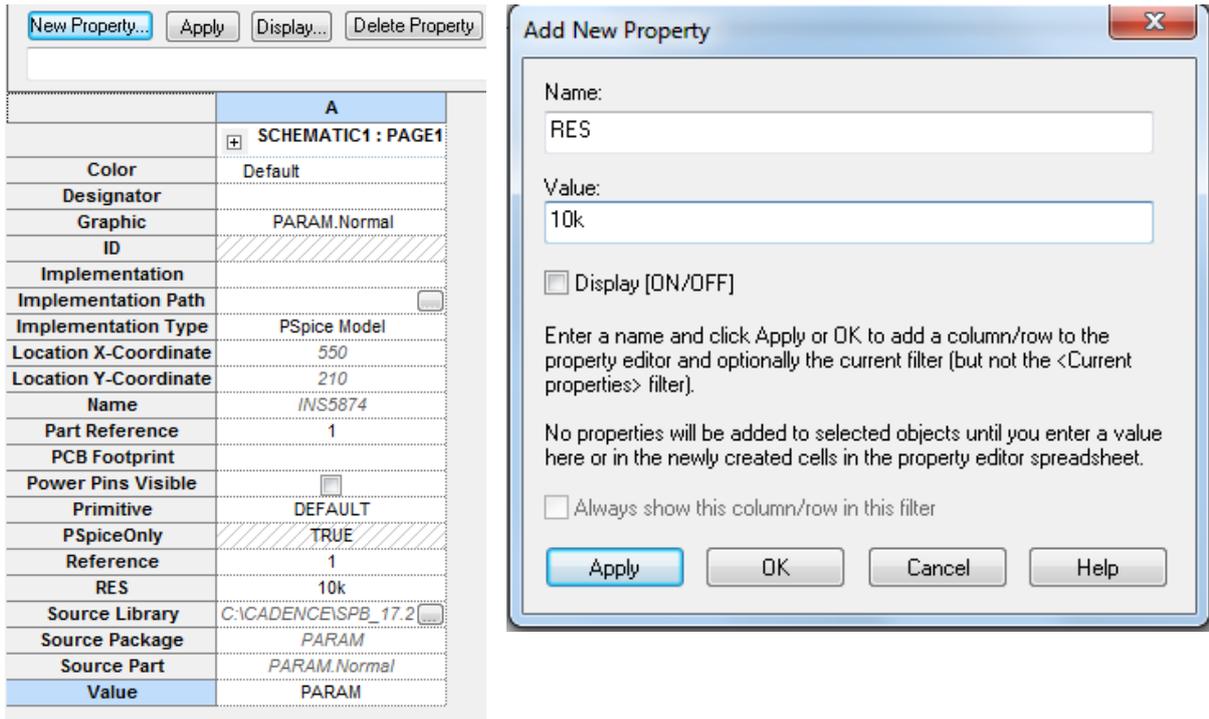
1. Выделяем все резисторы и открываем Edit Properties. В строке Value записываем {RES} в фигурных скобках (рис. 3.27).

	A	B	C	D
	SCHEMATIC1 : PAGE1	SCHEMATIC1 : PAGE1	SCHEMATIC1 : PAGE1	SCHEMATIC1 : PAGE1
Implementation				
Implementation Type	<none>	<none>	<none>	<none>
IO_LEVEL				
IUMODEL				
MNTYMXDLY				
Name	INS500	INS526	INS552	INS578
Part Reference	R1	R2	R3	R4
Source Library	C:\ICADENCE\SPB_17.2	C:\ICADENCE\SPB_17.2	C:\ICADENCE\SPB_17.2	C:\ICADENCE\SPB_17.2
Source Package	R	R	R	R
PSpiceTemplate	R*@REFDES %1 %2 ?TOLE			
PSpiceOnly				
Reference	R1	R2	R3	R4
Value	{RES}	{RES}	{RES}	{RES}
RES				
DIST	FLAT	FLAT	FLAT	FLAT
Location X-Coordinate	460	460	250	340
Location Y-Coordinate	120	80	280	280
MAX_TEMP	RTMAX	RTMAX	RTMAX	RTMAX
POWER	RMAX	RMAX	RMAX	RMAX
SLOPE	RSMAX	RSMAX	RSMAX	RSMAX
Source Part	R.Normal	R.Normal	R.Normal	R.Normal
TC1	0	0	0	0
TC2	0	0	0	0
TOLERANCE				
VOLTAGE	RVMAX	RVMAX	RVMAX	RVMAX

Рис. 3.27. Переименование резисторов на {RES}

2. Выбираем Place-Part, находим библиотеку Special и добавляем в проект. В этой библиотеке находим компонент PARAM и добавляем в проект.

3. Дважды щелкнем на PARAM и открываем в редакторе свойств панель (рис. 3.28.a). Нажимаем New Properties, вводим имя и значение (рис. 3.28.б) и нажимаем Apply > Ok.



a)

б)

Рис. 3.28. Панель свойств резисторов

4. Для проверки сделанного нажимаем Display.

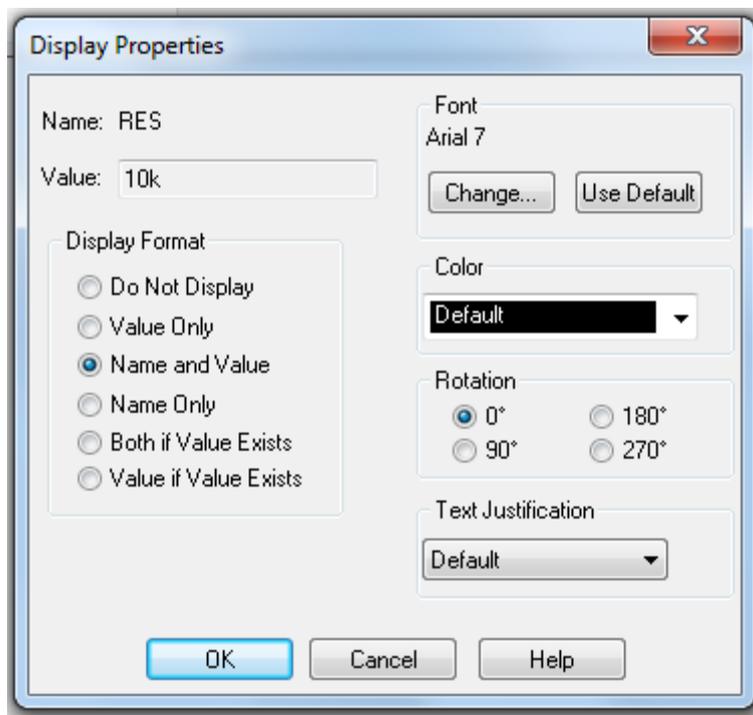


Рис. 3.29. Проверка новых свойств

5. Чтобы сохранить изменения, нажимаем в главном меню Apply и закрываем окно свойств.

После этого схема проекта для многовариантного анализа будет выглядеть так (рис. 3.30):

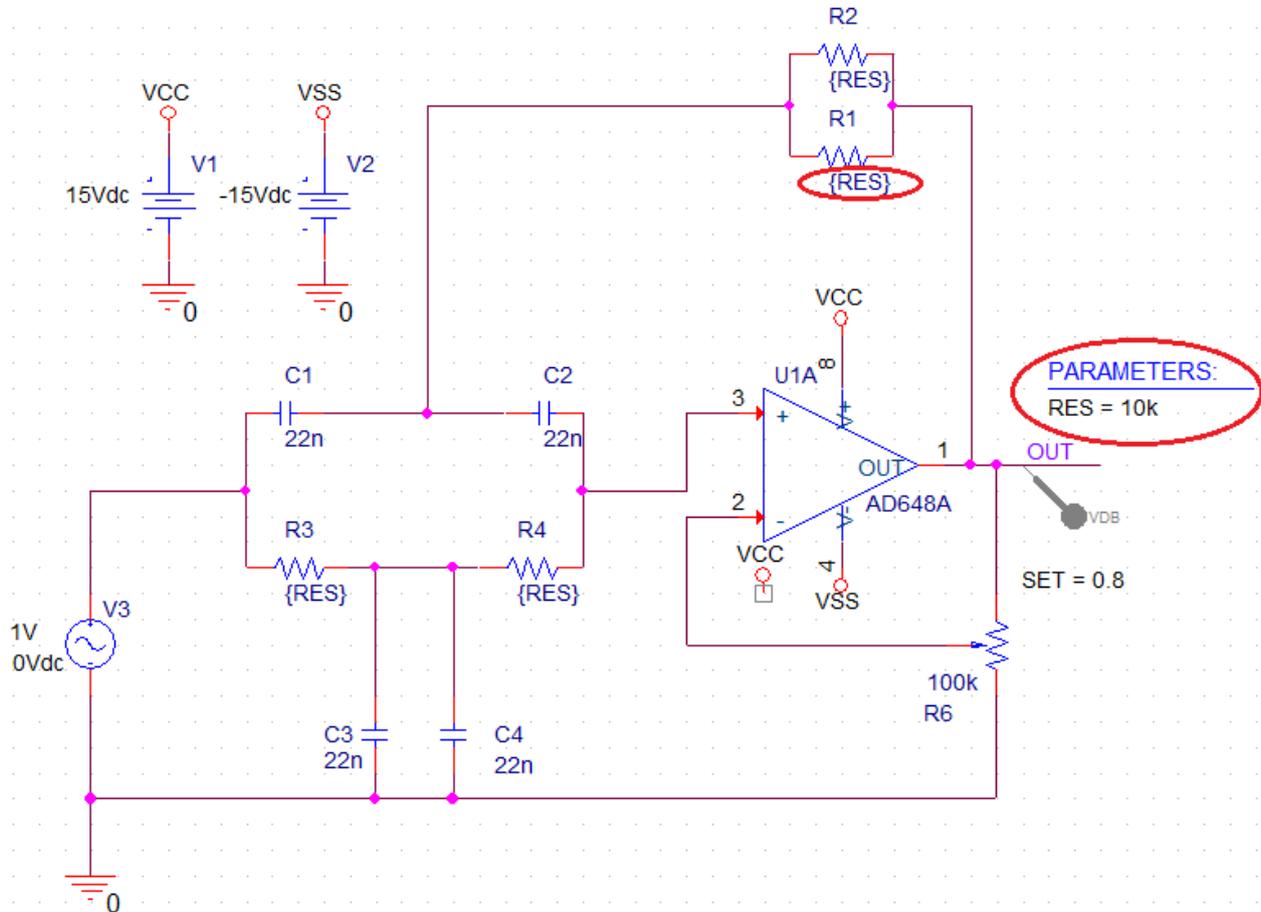


Рис. 3.30. Схема для многовариантного анализа

6. Устанавливаем новый профиль моделирования VAXNTH-2. Профиль моделирования содержит первичную развертку по частоте (рис. 3.31) и вторичную параметрическую развертку по глобальному параметру RES от 8 кОм до 12 кОм с инкрементом 1 кОм (рис. 3.32).

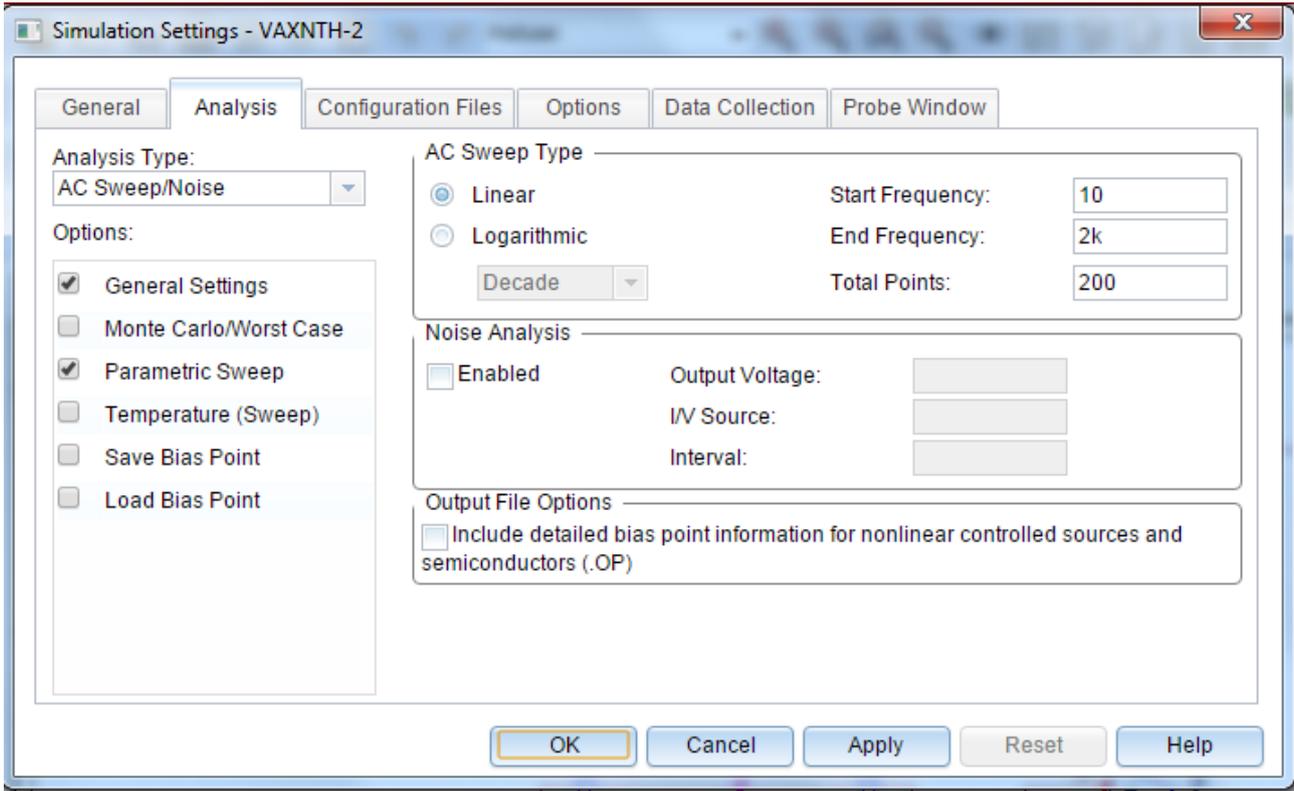


Рис. 3.31. Первичная развертка по частоте

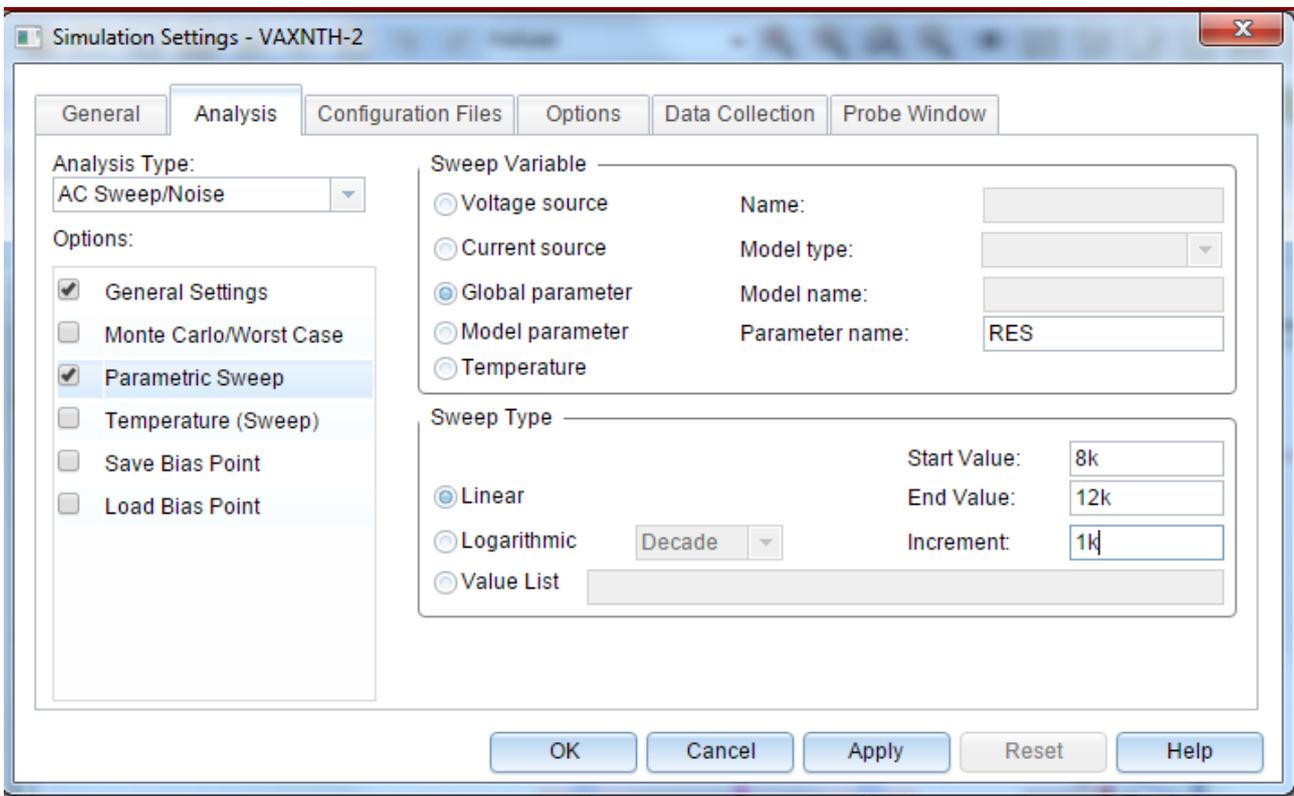


Рис. 3.32. Вторичная параметрическая развертка по глобальному параметру RES

7. Сохраняем введенные в проект изменения и выполняем моделирование.

В окне доступных секций можно выбрать нужные графики или отобразить сразу все (рис. 3.33).

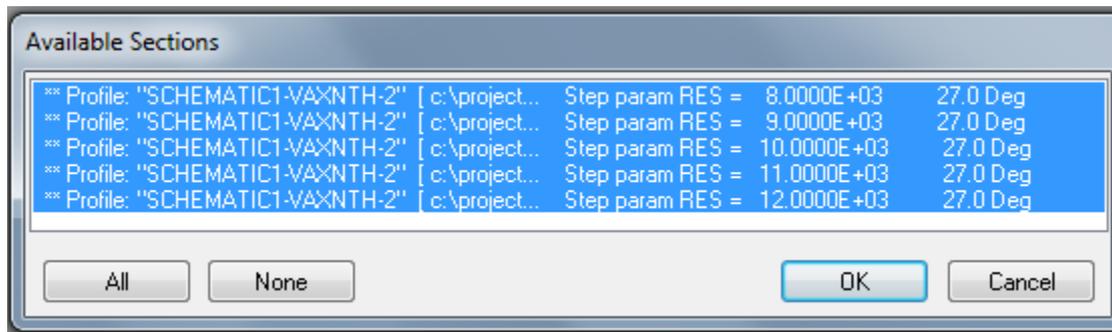


Рис. 3.33. Доступные секции результатов

Все графики показаны на рис. 3.34. Изменение значения резисторов влияет на частоту режекции и ослабление сигнала.

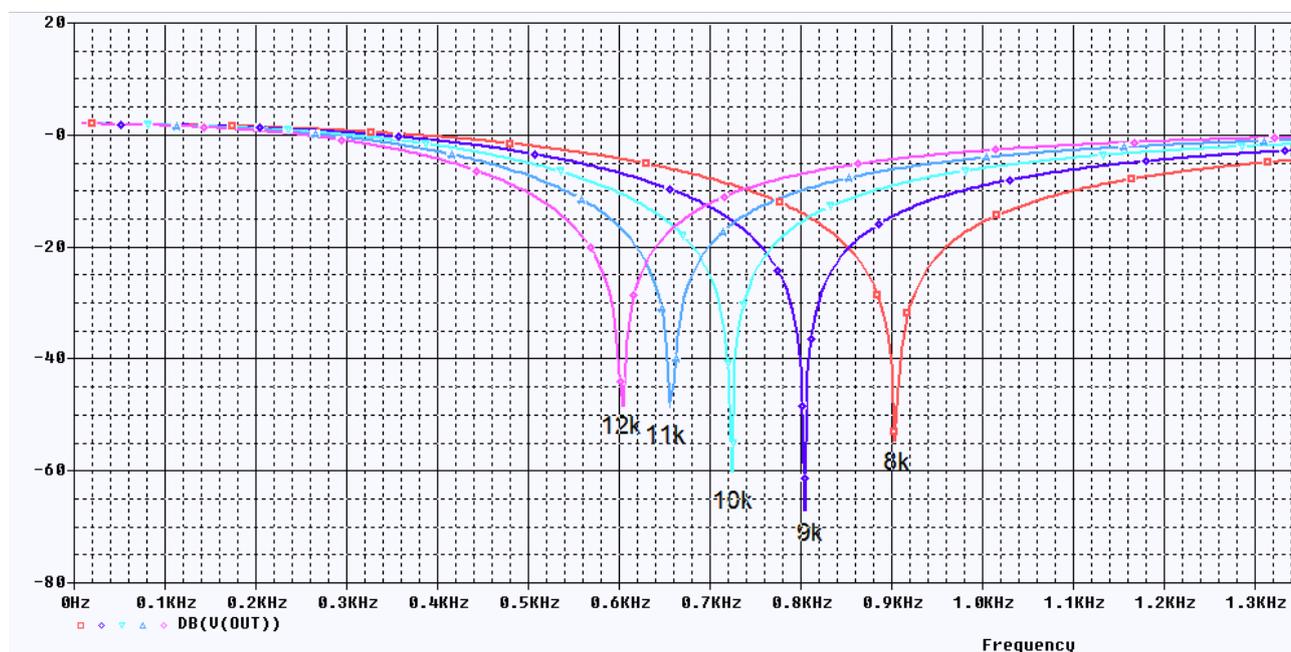


Рис. 3.34. Графики АЧХ для разных значений резисторов

3.5.2. Изменение установки потенциометра обратной связи.

Создадим новый проект PR-7 на основе проекта PR-5. Отметим, что такое создание новых проектов позволит нам легко обращаться к предыдущим сохраненным без изменения схем и профилей моделирования.

Будем исследовать влияние установки потенциометра обратной связи R5 на амплитудно-частотные характеристики ЗФ.

Делается это так:

1. Сделайте двойной щелчок по свойству SET и измените значение по умолчанию от 0,5 на {ratio}. Не забывайте поставить фигурные скобки.

2. Из библиотеки Special выбираем PARAM. Двойным щелчком открываем окно свойств. Устанавливаем переменный параметр ratio и нажимаем Apply (Рис. 3.35).

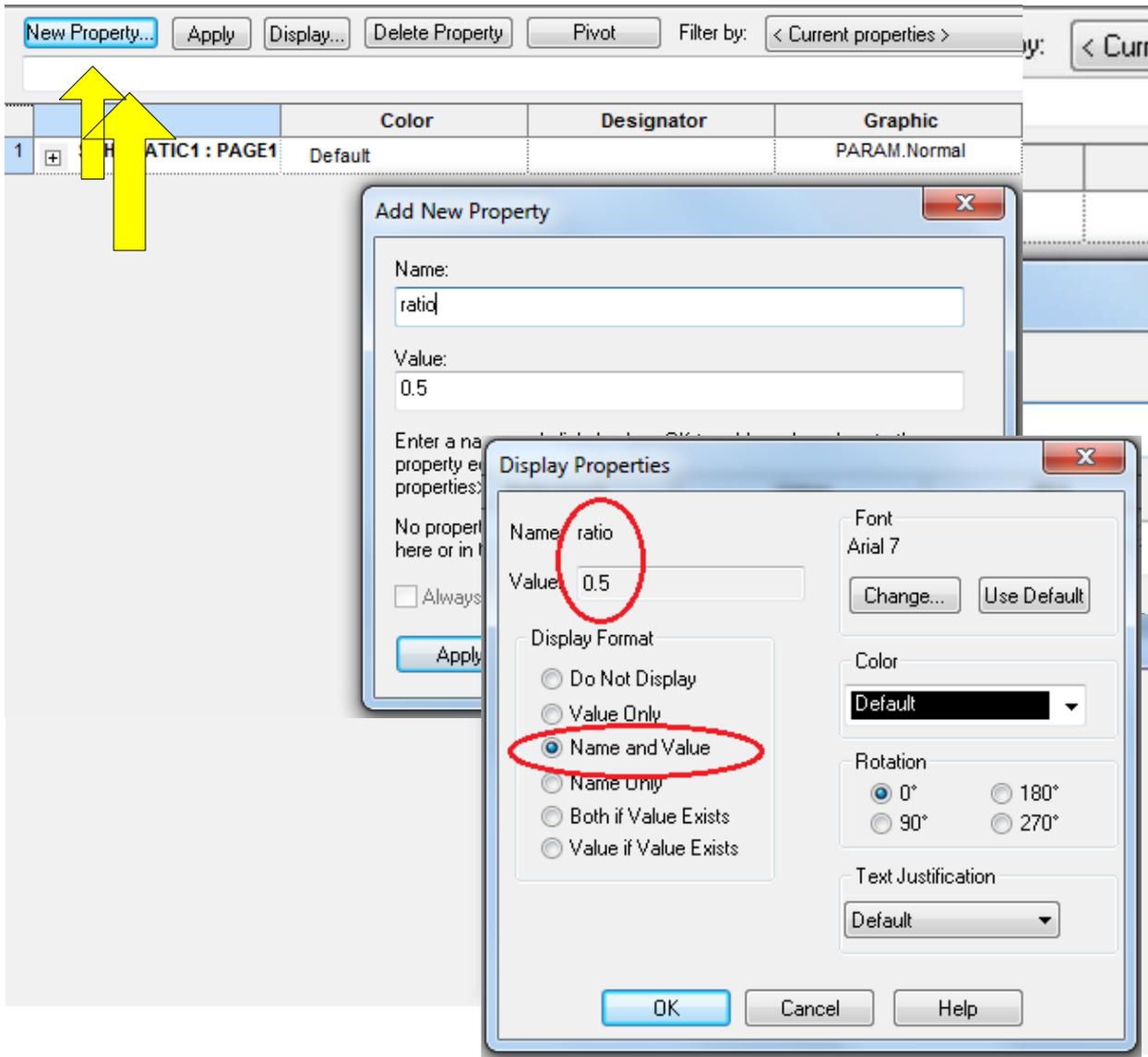


Рис. 3.35. Установка параметра ratio для потенциометра

3. В свойствах компонента «Потенциометр» видим Value=PARAM. Выделяем ratio=0.5 (точка !) и нажимаем Display. Проверяем установку (рис. 3.35).

4. В главном меню нажимаем Apply для сохранения установок.

На рис. 3.36 показана схема заграждающего фильтра с переменным потенциометром.

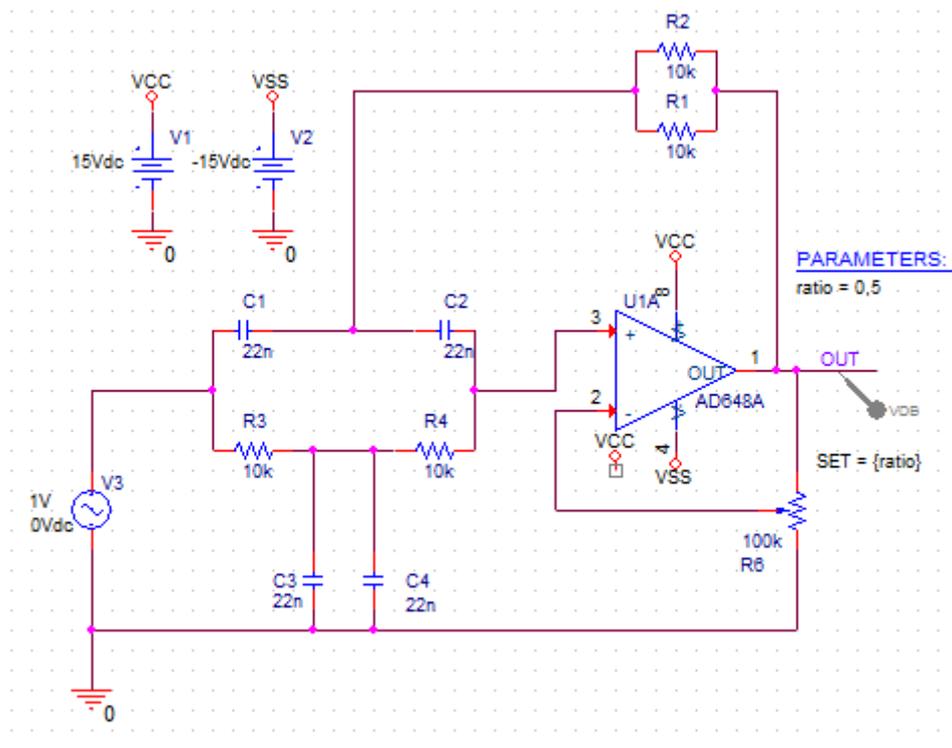


Рис. 3.36. Схема ЗФ с переменным потенциометром

5. Развертку по частоте сохраняем из проекта PR-5.

Устанавливаем профиль моделирования по развертке параметра SET (рис. 3.37). Параметр ratio будем менять от 0.5 до 0.9 с инкрементом 0.1.

Обращаем внимание на то, что в этих десятичных дробях ставят «точку».

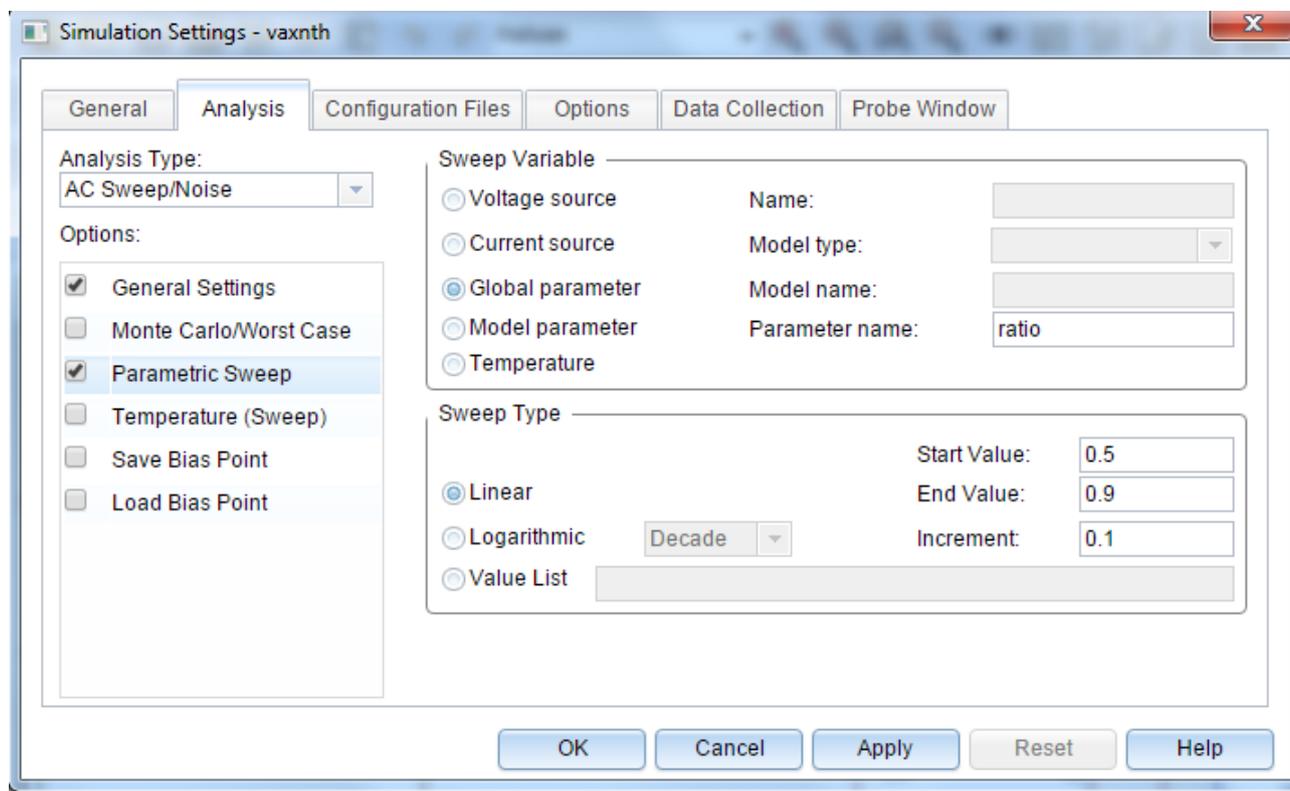


Рис. 3.37. Установка профиля параметрической развертки по параметру ratio.
Нажимаем: Apply > Ок.

6. Выполняем моделирование. Таблица доступных разделов показана на рис. 3.38.

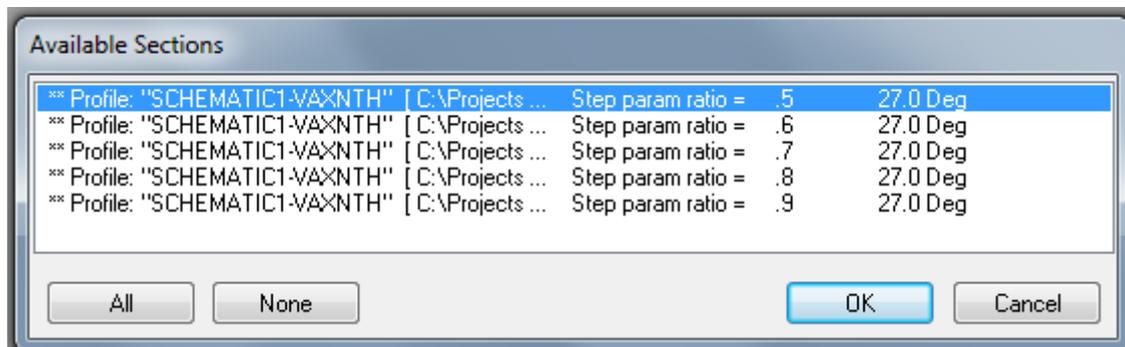


Рис. 3.38. Таблица доступных разделов

Графики АЧХ заграждающего фильтра при разных установках потенциометра обратной связи показаны на рис. 3.39.

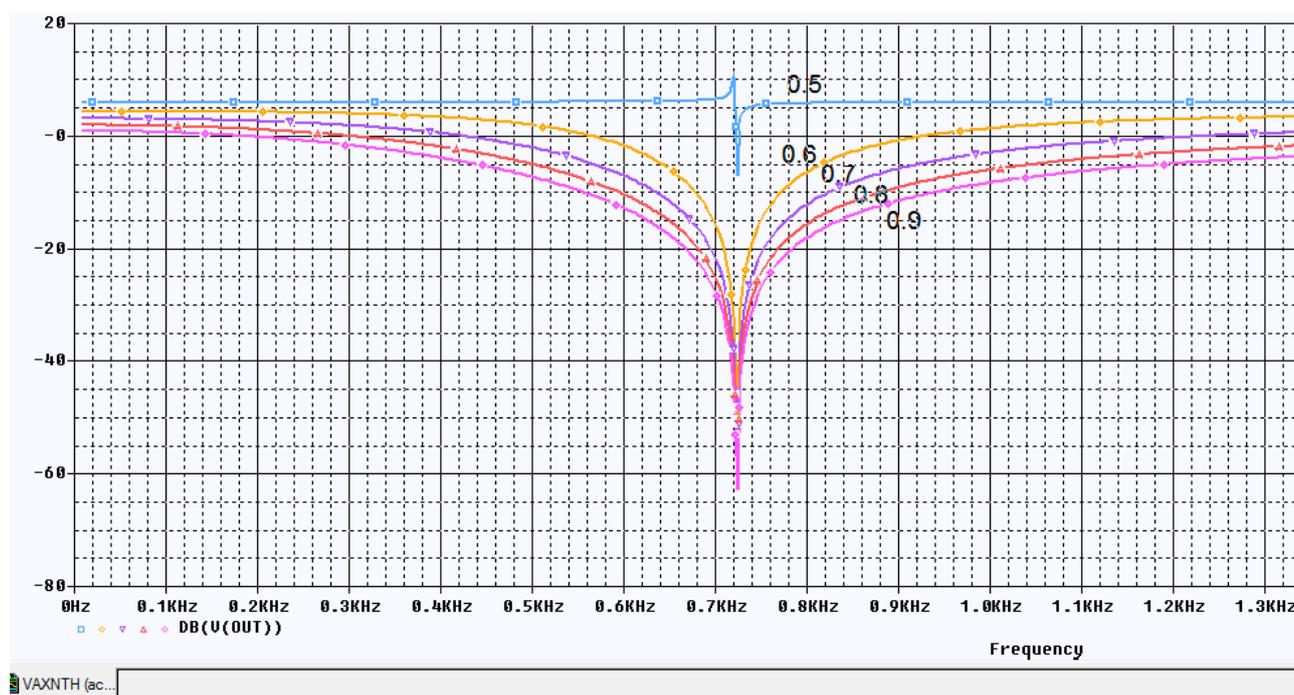


Рис. 3.39. Графики АЧХ ЗФ при разных начениях установки SET

Отметим, что значения изменяемого параметра можно задавать списком чисел, разделенных запятыми (рис. 3.40)

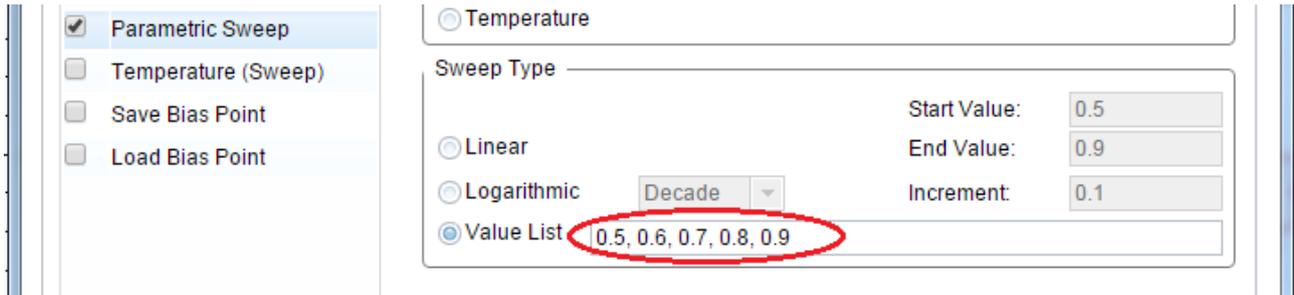


Рис. 3.40. Список значений переменного параметра

3.6. Контрольные вопросы

1. Как выполняют расчет электрической цепи синусоидального тока символическим методом ?
2. Как рассчитывают мгновенную и активную мощность в цепи синусоидального тока ?
3. Что такое действующее значение синусоидального напряжения и чем оно отличается от амплитудного ?
4. Какие переменные источники напряжения и тока применяют в OrCAD для моделирования частотных характеристик цепи ?
5. Какие источники синусоидальных сигналов применяют в OrCAD для моделирования формы сигналов и переходных процессов ?
6. Как надо задавать профиль моделирования для исследования амплитудно-частотных характеристик ?
7. Как используют курсоры для измерений на графиках в окне Probe ?
8. Как можно добавить или изменить графики в окне Probe после моделирования ?
9. Как проводят многовариантный анализ модели активного фильтра при изменении параметров компонентов ?
10. Как проводят многовариантный анализ активного фильтра при изменении потенциометра в цепи обратной связи ?

Глава 4. Анализ методом Монте-Карло

4.1. Принципы метода Monte Carlo

Анализ методом Монте-Карло, по существу, статистический анализ, который вычисляет отклик схемы, когда параметры модели устройства случайным образом изменялись между установленными пределами допусков в соответствии с заданным статистическим распределением. Например, все схемы, которые встречались до сих пор были смоделированы с использованием фиксированных значений компонентов.

Реальные дискретные компоненты, такие как резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы имеют определённый допуск (1%-10%).

Другие дискретные компоненты и полупроводники в цепи также будут иметь допуски и таким образом, совокупный эффект всех допусков компонентов может привести к значительным отклонением от ожидаемого отклика цепи.

Анализ методом Монте-Карло даёт статистические данные с предсказанием влияния случайного изменения параметров модели или значения компонентов (дисперсия) в заданных пределах допуска. Сформированные случайные значения соответствуют статистическому распределению. Анализ цепи (постоянного тока, переменного тока или переходных процессов) многократно повторяется в каждом запуске с новыми значениями случайных параметров.

В методе Монте-Карло происходит генерации нового набора выбранных случайным образом значений параметров компонентов или модели. Чем больше количество серий, тем больше вероятность того, что каждый компонент примет значения в пределах своего диапазона допустимых значений и будет использоваться для моделирования. Часто выполняются сотни или даже тысячи опытов Монте-Карло, чтобы охватить как можно больше возможных значений компонентов в пределах их границ допуска.

Метод Монте-Карло предсказывает устойчивость или отказ схемы путём изменения значения параметров компонента или модели в заданных пределах допуска.

Результаты анализа методом Монте-Карло можно использовать для создания и отображения гистограммы для статистических данных, вместе со сводкой статистических данных. Это обеспечивает наглядное визуальное представление статистических результатов анализа методом Монте-Карло.

4.2. Моделирование заграждающего фильтра по методу Монте – Карло

Создадим папку PR-8 и новый проект PR-8 на основе проекта PR-5 для аналогового и смешенного моделирования.

Проверим функционирование схемы, выполнив анализ АЧХ (рис. 4.1).

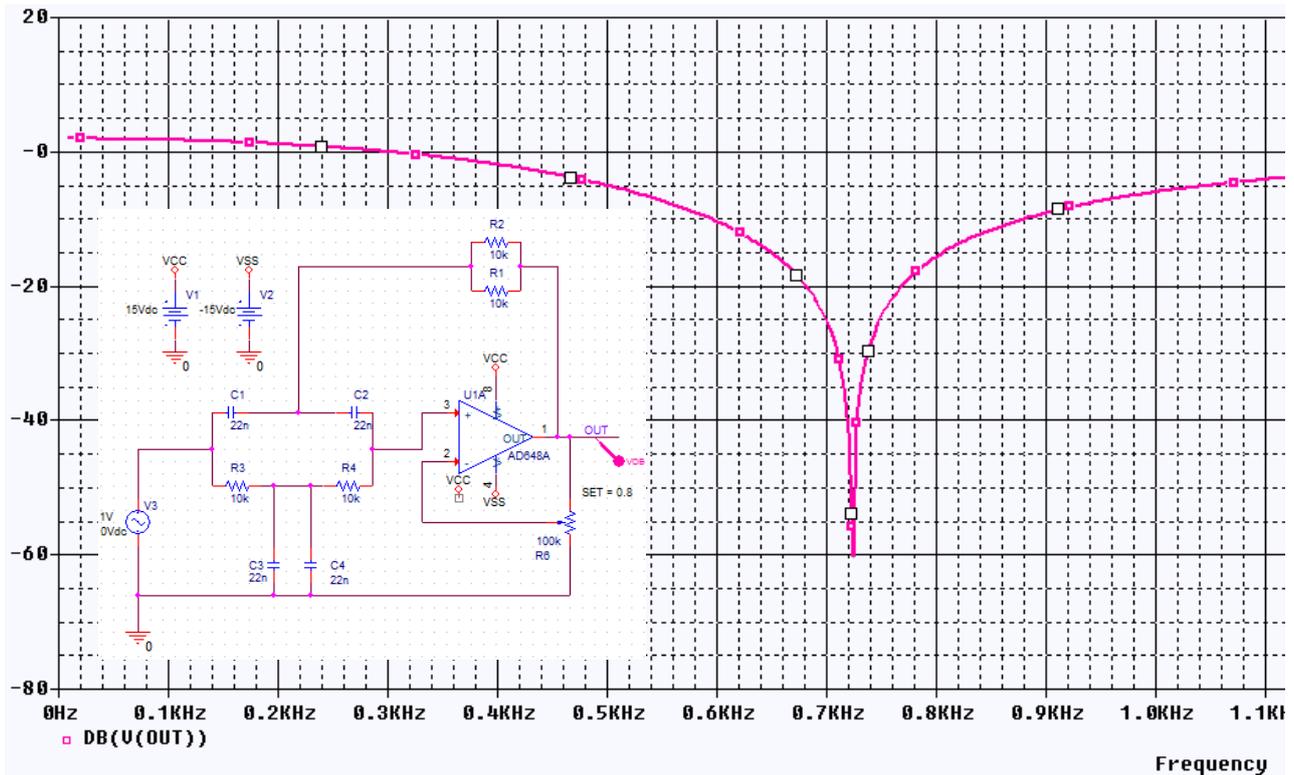


Рис. 4.1. Проверка функционирования схемы ЗФ

Исследуем влияние точности пассивных компонентов схемы (резисторов и конденсаторов) на форму амплитудно-частотной характеристики заграждающего фильтра методом Монте-Карло

Для начала выделим на схеме все резисторы, откроем окно свойств и установим свойство TOLLERANCE, например, равное 5% (рис. 4.2).

New Property... Apply Display... Delete Property Pivot Filter by: Capture PSpice Help						
5%						
	Part Reference	Source Library	Reference	Value	TOLLERANCE	VOLTAGE
1	SCHEMATIC1 : PAGE1 R1	C:\CADENCE\SPB_17.	R1	10k	5%	RVMAX
2	SCHEMATIC1 : PAGE1 R2	C:\CADENCE\SPB_17.	R2	10k	5%	RVMAX
3	SCHEMATIC1 : PAGE1 R3	C:\CADENCE\SPB_17.	R3	10k	5%	RVMAX
4	SCHEMATIC1 : PAGE1 R4	C:\CADENCE\SPB_17.	R4	10k	5%	RVMAX

Рис. 4.2. Установка точности резисторов

Создадим новый профиль моделирования, выберем AC Sweep, установим параметры развертки по частоте, как и в прошлом исследовании. Далее активируем пункт Monte Carlo. Установим параметры как на рис. 4.3., особое внимание стоит обратить на параметр Output variable.

Мы выбрали распределение Гаусса, количество опытов 100, задали произвольно начальное случайное число 17336 для генератора случайных чисел и выбрали опцию MC Load Save для сохранения результатов моделирования в файле (рис. 4.3, 4.4).

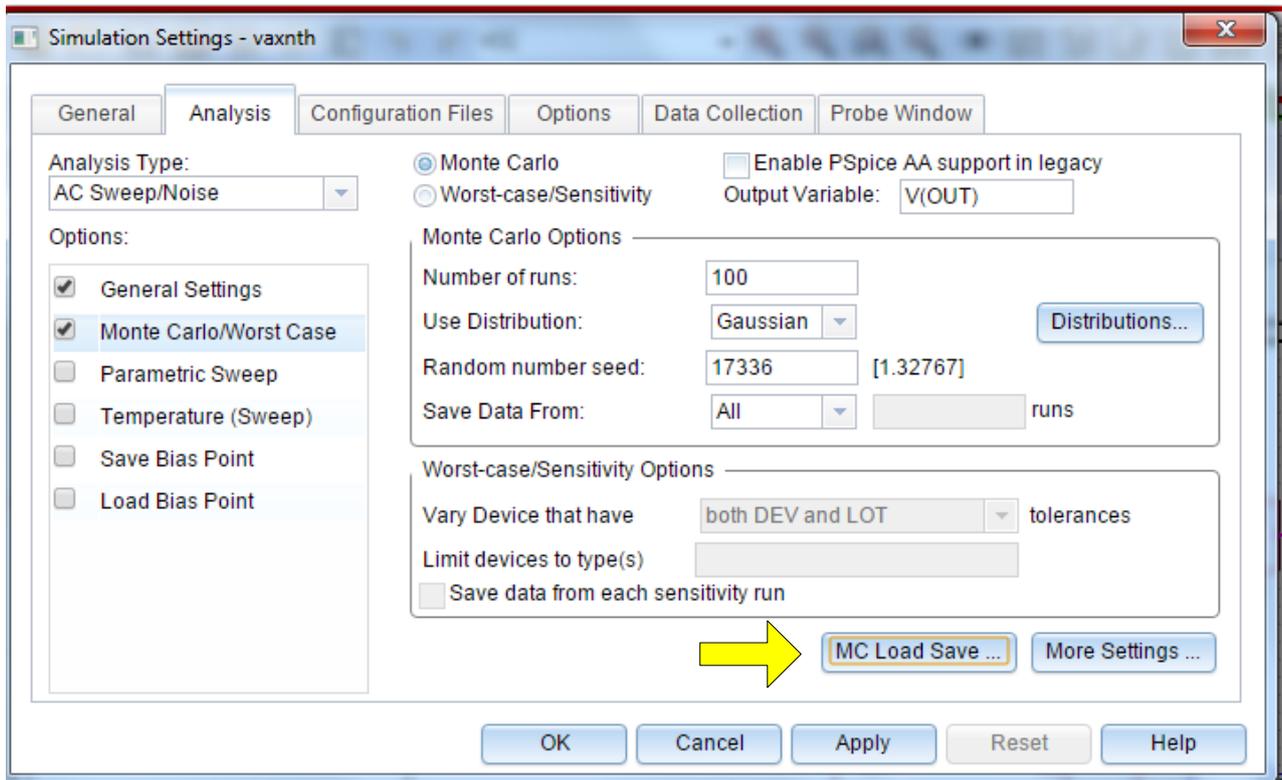


Рис. 4.3. Установка параметров режима Монте-Карло

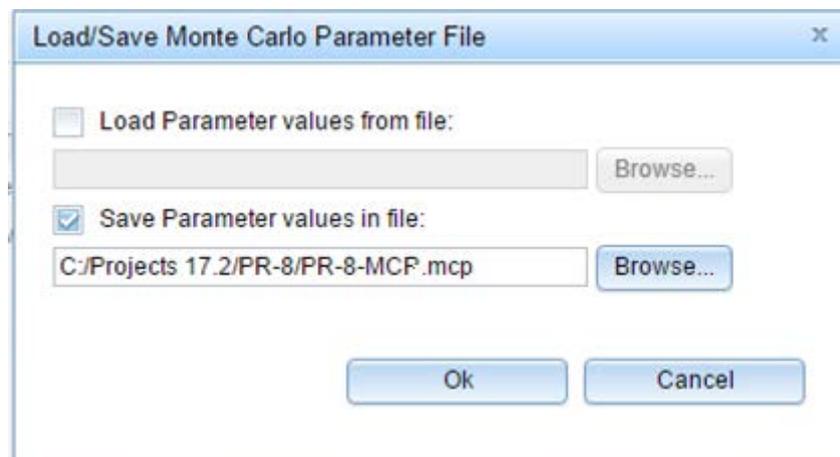


Рис. 4.4. Сохранение значений параметров в файле

Запускаем симуляцию и после некоторого времени получаем в окне Probe таблицу доступных разделов (рис. 4.5) и графики АЧХ (рис. 4.6).

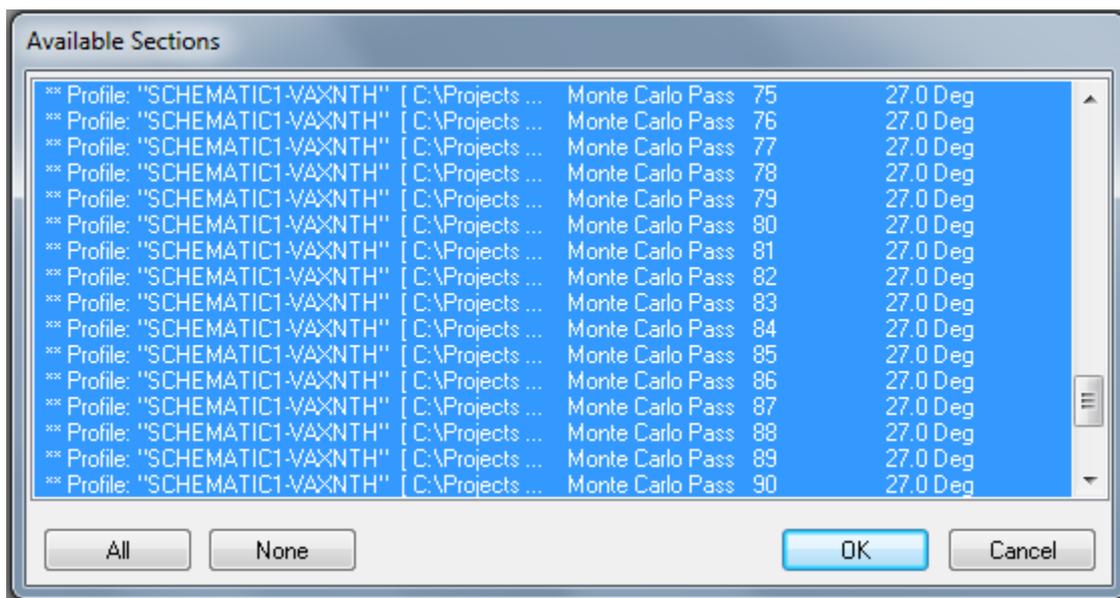


Рис. 4.5. Таблица доступных графиков

Выбираем все графики и получаем результаты статистического исследования (рис. 4.6).

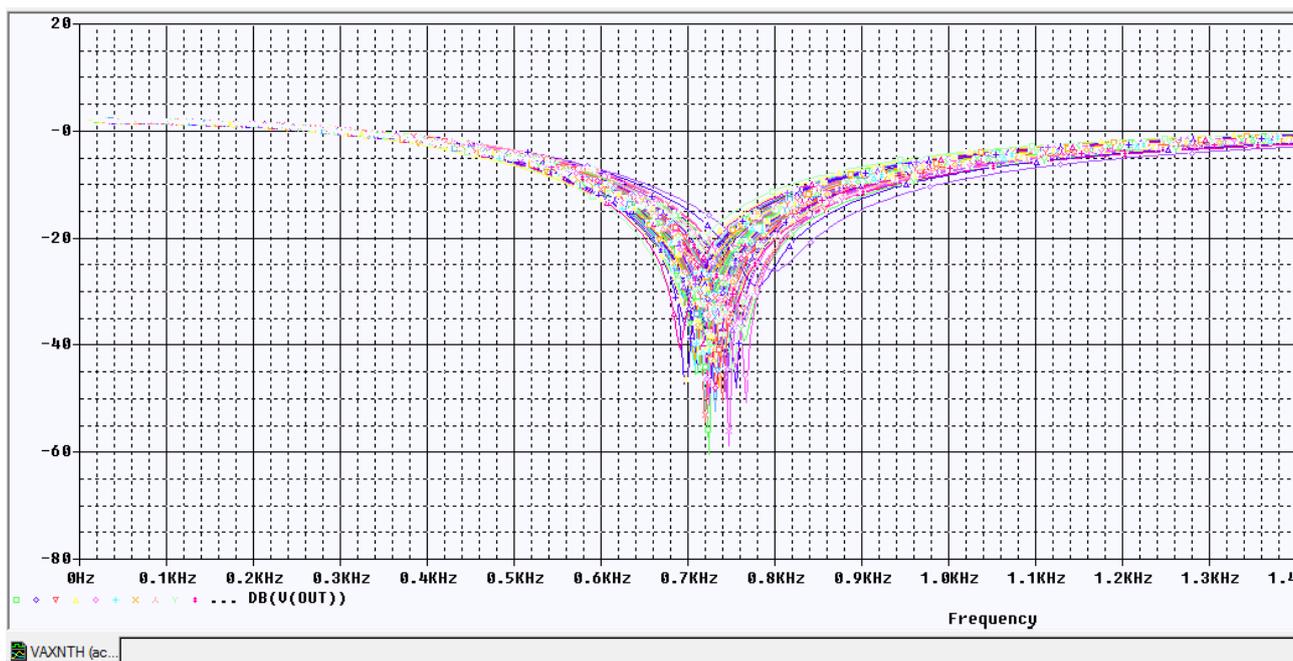


Рис. 4.6. Набор из 100 графиков статистического исследования

Далее выберем Trace -> Performance analysis и нажмем в открывшемся окне ОК. После выберем Trace -> Add trace., в окне слева укажем Min(1), после справа выберем V(OUT) и нажмем ОК (рис. 4.7).

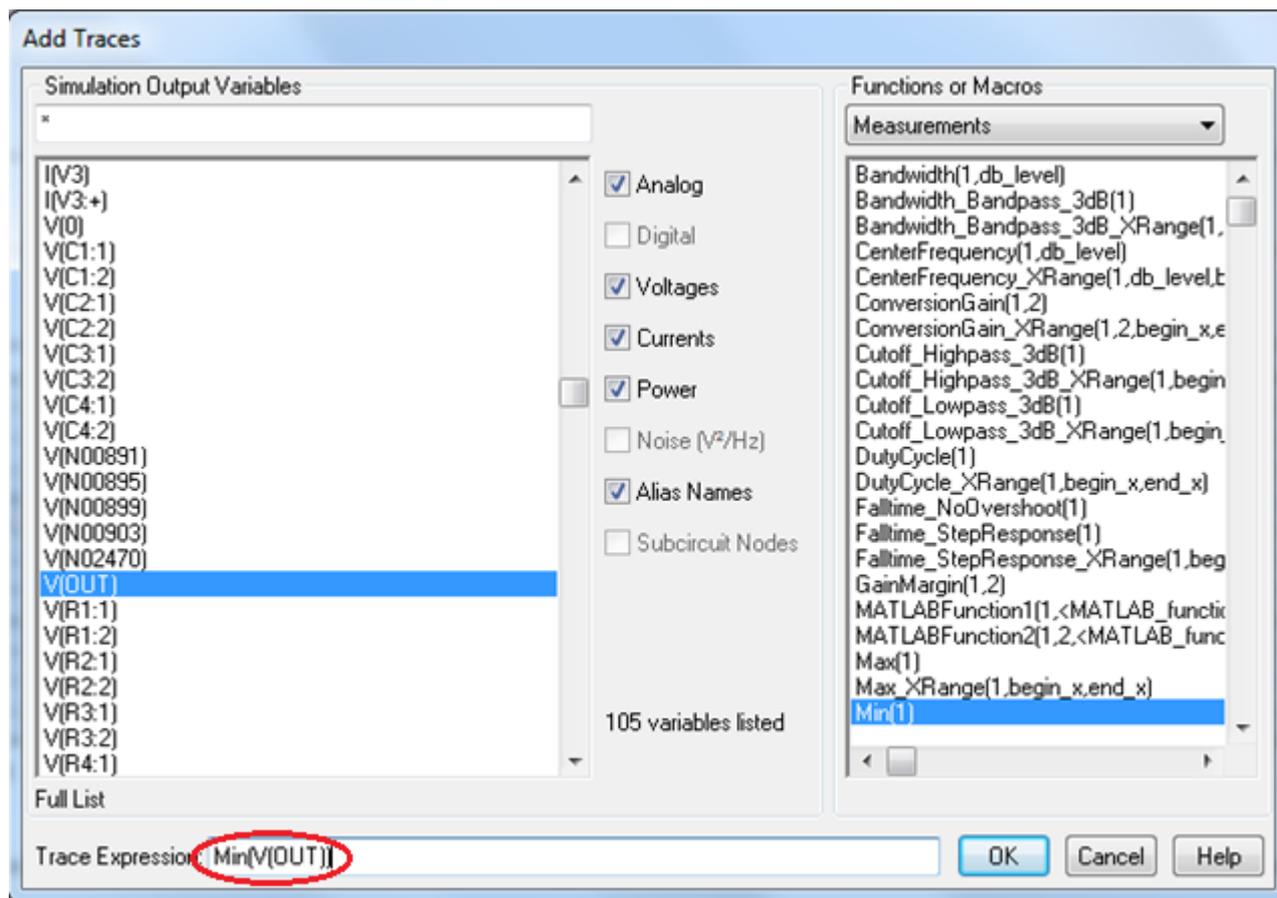


Рис. 4.7. Установка дополнительного анализа

Получим расширенное представление о работе фильтра в виде гистограммы распределения минимальных напряжений на выходе фильтра (рис. 4.8).

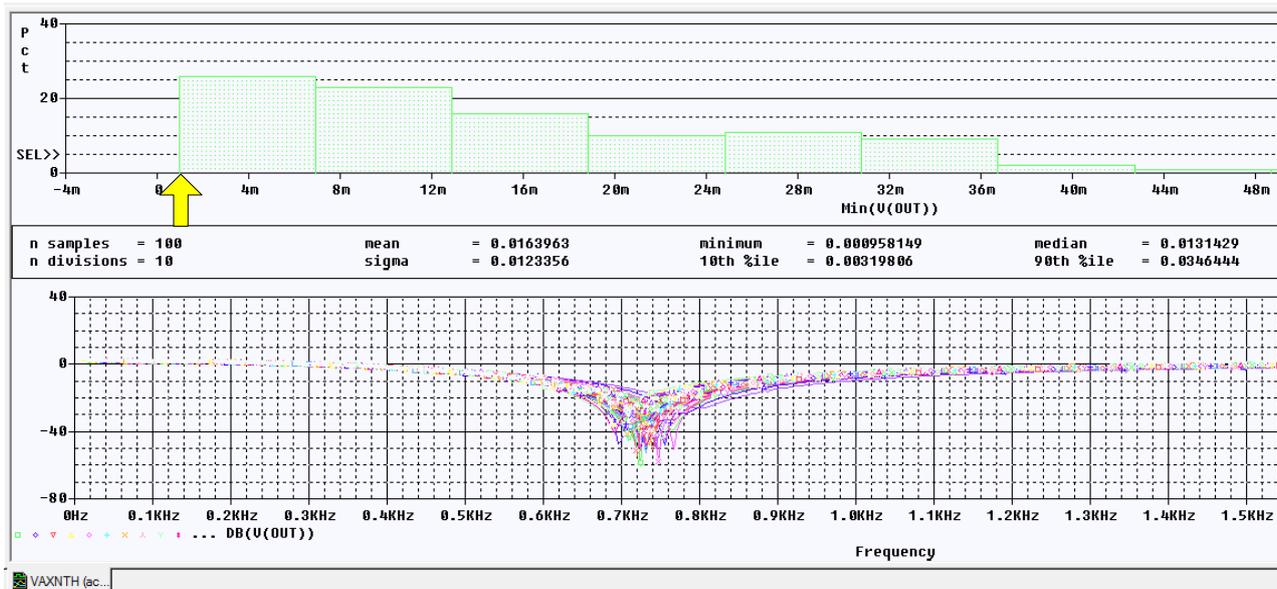
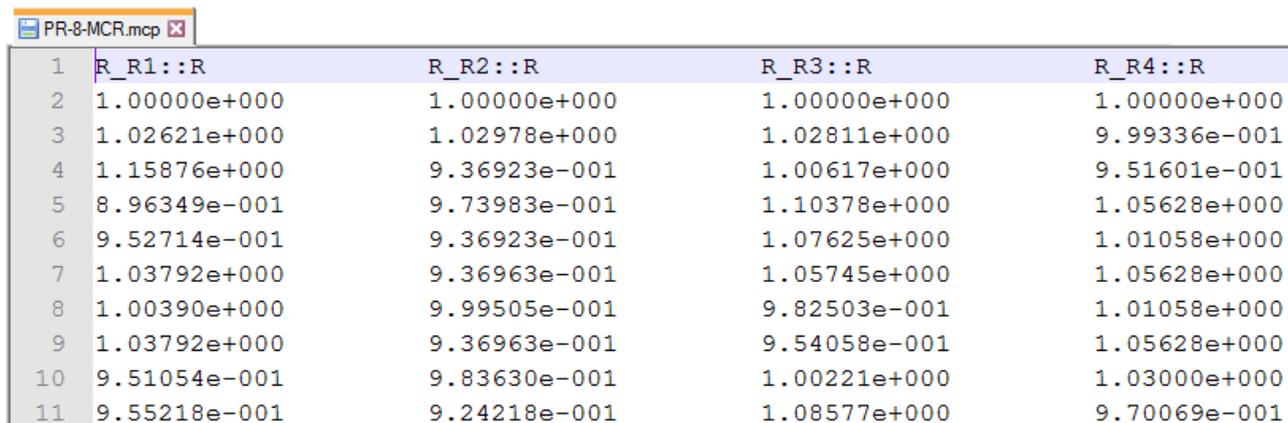


Рис. 4.8. Гистограммы распределения минимальных напряжений V(OUT)

Это распределение показывает, что минимальное значение составляет примерно 0,001, что соответствует затуханию – 60 дБ. В худшем случае минимальное значение равно 0,048 или – 26 дБ.

В папке PR-8 файл с расширением .mcp можно открыть в Notepad ++ и посмотреть, как менялись значения случайных чисел, задающих точность резисторов (рис. 4.9).



	R_R1::R	R_R2::R	R_R3::R	R_R4::R
1	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000
2	1.02621e+000	1.02978e+000	1.02811e+000	9.99336e-001
3	1.15876e+000	9.36923e-001	1.00617e+000	9.51601e-001
4	8.96349e-001	9.73983e-001	1.10378e+000	1.05628e+000
5	9.52714e-001	9.36923e-001	1.07625e+000	1.01058e+000
6	1.03792e+000	9.36963e-001	1.05745e+000	1.05628e+000
7	1.00390e+000	9.99505e-001	9.82503e-001	1.01058e+000
8	1.03792e+000	9.36963e-001	9.54058e-001	1.05628e+000
9	9.51054e-001	9.83630e-001	1.00221e+000	1.03000e+000
10	9.55218e-001	9.24218e-001	1.08577e+000	9.70069e-001
11				

Рис. 4.9. Просмотр файла сохраненных значений случайных чисел для разброс резисторов

4.3. Исследование влияния точности двух видов компонентов

Введем дополнительно точность 5% в значения конденсаторов (рис. 4.10).

		SLOPE	TOLERANCE	VC1	VC2	VOLTAGE
1	SCHEMATIC1 : PAGE1	CSMAX	5%	0	0	CMAX
2	SCHEMATIC1 : PAGE1	CSMAX	5%	0	0	CMAX
3	SCHEMATIC1 : PAGE1	CSMAX	5%	0	0	CMAX
4	SCHEMATIC1 : PAGE1	CSMAX	5%	0	0	CMAX

Рис. 4.10. Установка точности конденсаторов

Повторяем моделирование по методу Монте – Карло и получаем минимальное значение выходного напряжения 0,098, что соответствует затуханию - 20,175 дБ.

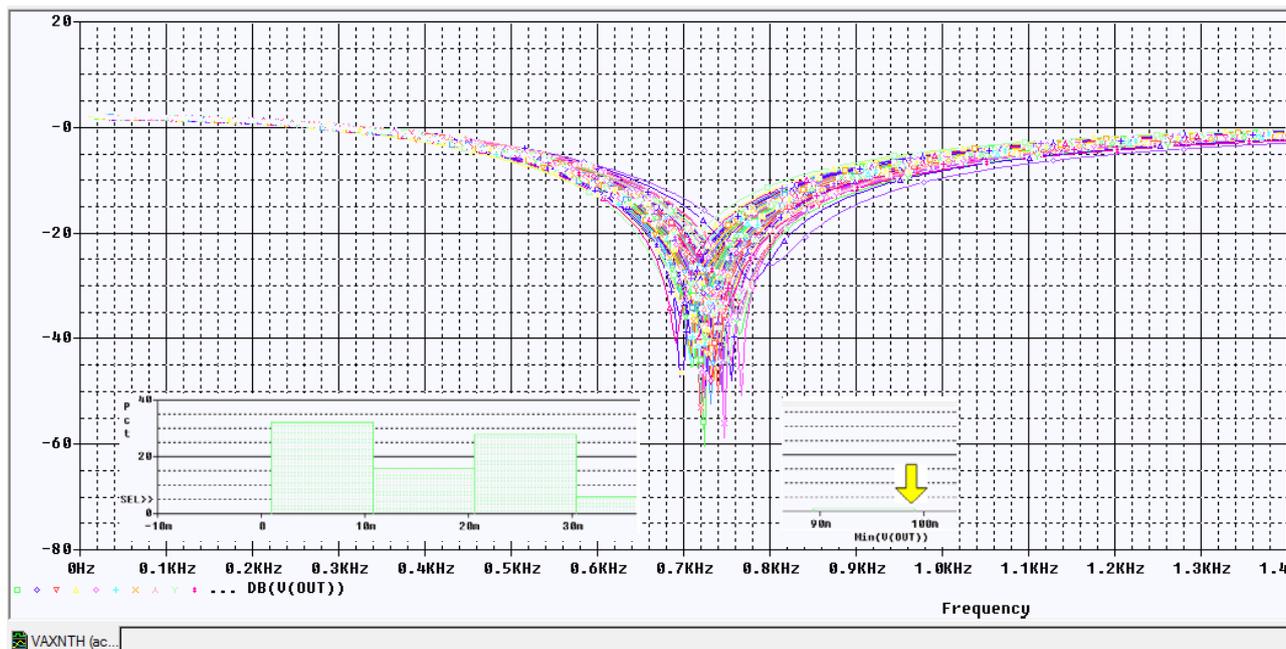


Рис. 4.11. Результаты моделирования в случае неточности резисторов и конденсаторов

В новом файле .msr теперь будут значения случайных чисел, моделирующих разбросы значений резисторов и конденсаторов (рис. 4.12)

1	C_C1::C	C_C2::C	C_C3::C	C_C4::C			
2	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000			
3	1.02621e+000	1.02978e+000	1.00011e+000	0.99999e+000			
4	1.15876e+000	9.36923e-001	R_R1::R	R_R2::R	R_R3::R		
5	8.96349e-001	9.73983e-001	1.00000e+000	1.00000e+000	1.00000e+000		
6	9.52714e-001	9.36923e-001	9.66080e-001	1.00437e+000	1.00405e+000		
7	1.03792e+000	9.36963e-001	1.05936e+000	9.63318e-001	1.08164e+000		
8	1.00390e+000	9.99505e-001	9.64851e-001	9.88920e-001	1.09300e+000		
9	1.03792e+000	9.36963e-001	9.77861e-001	9.70941e-001	9.69953e-001		
10	9.51054e-001	9.83630e-001	1.04016e+000	9.88920e-001	9.68252e-001		
11	9.55218e-001	9.24218e-001	9.76104e-001	9.70941e-001	1.08789e+000		
12	1.01391e+000	9.87342e-001	1.04016e+000	8.80670e-001	1.00055e+000		
13	1.03859e+000	9.24218e-001	9.76104e-001	1.06116e+000	1.08789e+000		
			1.10057e+000	9.73607e-001	9.85141e-001		

Рис. 4.12. Случайные числа для разброса резисторов и конденсаторов

Обратите внимание, что первая строка случайных чисел содержит только единицы и соответствует точным значениям резисторов и конденсаторов.

4.4. Повторное использование значений случайных параметров

Повторное использование значений параметров модели из предыдущего опыта Монте-Карло позволяет ускорить моделирование и дает повторение результатов. Делаем это так:

Выбираем PSpice> Edit Simulation Profile. Выполняем установки профиля моделирования в соответствии с рис. 4.3.

Далее в окне Load/Save Monte Carlo Parameter File включаем опцию Load Parameter values from file и в папке проекта находим последний запомненный

файл случайных чисел (рис. 4.13). Нажимаем **Ok**. Результаты статистического моделирования будут повторяться.

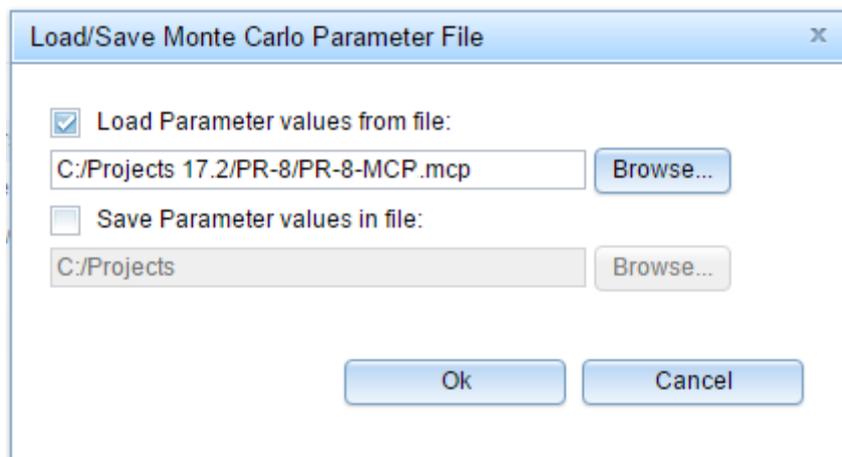


Рис. 4.13. Загрузка файла запомненных случайных чисел

После моделирования повторятся результаты, показанные на рис. 4.11.

В окне Probe выбрав **View>Output File**, для каждого пуска можно просмотреть основные режимы схемы (рис. 4.14).

```

***** 03/11/18 12:14:41 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 *****
** Profile: "SCHEMATIC1-VAXNTH" [ C:\Projects 17.2\PR-8\pr-8-pspicefiles\schematic1\vaxnth.sim ]

****     SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION     TEMPERATURE = 27.000 DEG C
          MONTE CARLO PASS 12
*****

NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE      NODE   VOLTAGE
( OUT)-111.5E-06 ( VCC)  15.0000 ( VSS) -15.0000 (N00891) 192.1E-09
(N00895)-111.5E-06 (N00899) 412.2E-09 (N00903) 0.0000 (N02470)-88.84E-06
(X_U1A.6) 1.751E-09 (X_U1A.7)-111.5E-06
(X_U1A.8)-111.5E-06 (X_U1A.9) 0.0000
(X_U1A.10) .7970 (X_U1A.11) 14.8560

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME          CURRENT
V_V1          -2.152E-04
V_V2          2.150E-04
V_V3          2.065E-11
X_U1A.vb      1.751E-14
X_U1A.vc      1.300E-11
X_U1A.ve      1.478E-11
X_U1A.vlim   -1.131E-09
X_U1A.vlp    -1.500E-11
X_U1A.vln    -1.500E-11

TOTAL POWER DISSIPATION 6.45E-03 WATTS

```

Рис. 4.14. Режимы схемы для пуска №12

4.5. Создание гистограмм

Файл данных может стать довольно большим при запуске метода Monte – Карло, поэтому, чтобы посмотреть только выход фильтра, вы устанавливаете маркер напряжения на выходе фильтра.

Для сбора данных только для отмеченного узла делаем следующее:

1. В меню PSpice выберите Edit Simulation Profile и на вкладке Data Collection установите только Voltages>At Markers Only. Остальные данные не будут вычисляться. Нажмите «ОК» (рис. 4.15).

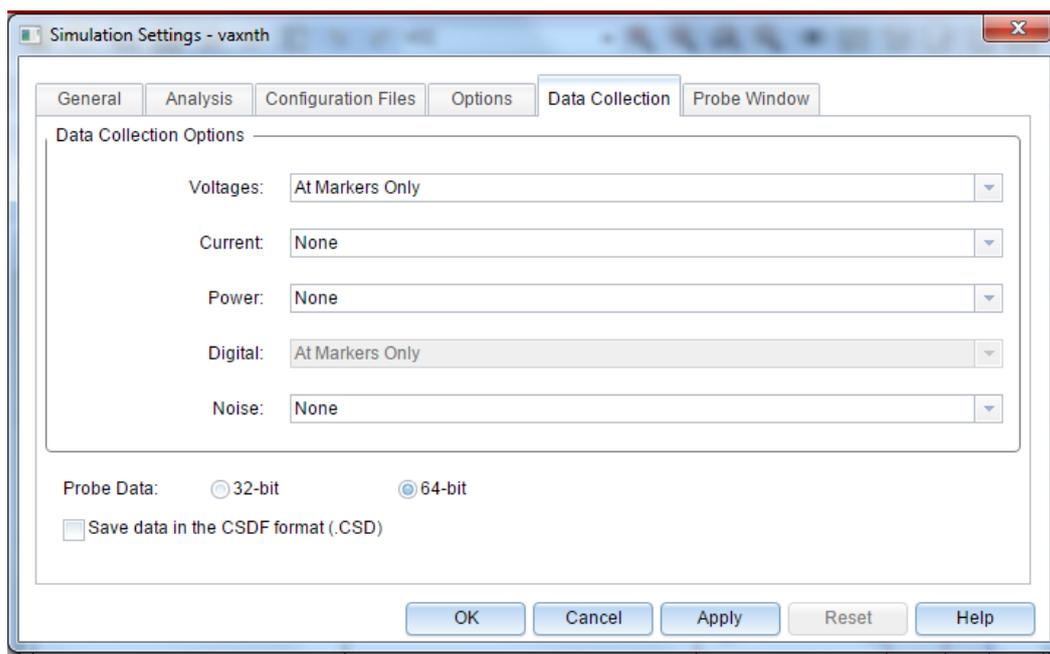


Рис. 4.15. Сбор данных только напряжений с маркеров

Количество секций гистограммы можно установить, выбрав Tools>Options>Probe Setting (рис. 4.16).

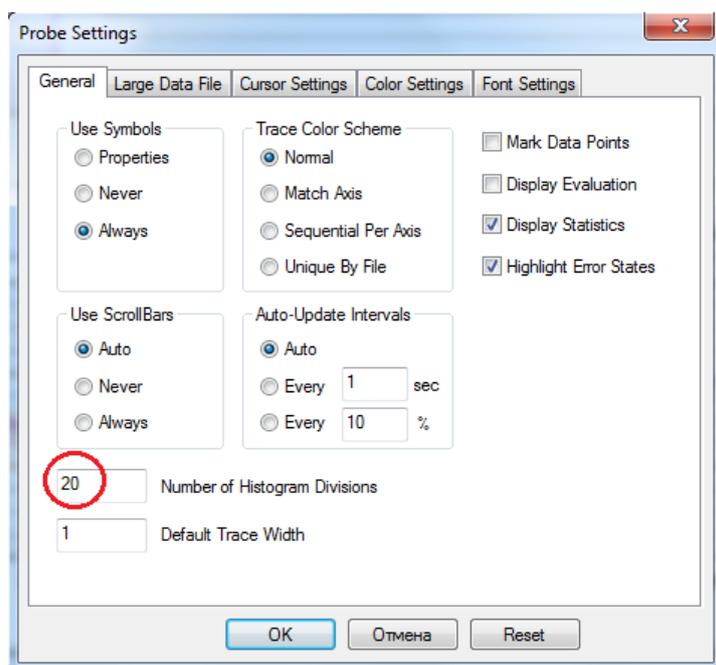


Рис. 4.16. Установка количества секций гистограммы

Для создания диаграммы надо в окне Probe выбрать Trace>Performance Analysis. После появления нового окна для гистограммы выполните Add Trace и проведите установки, показанные на рис. 4.7.

Результаты моделирования и гистограммы можно размещать в разных окнах (рис. 4.17).

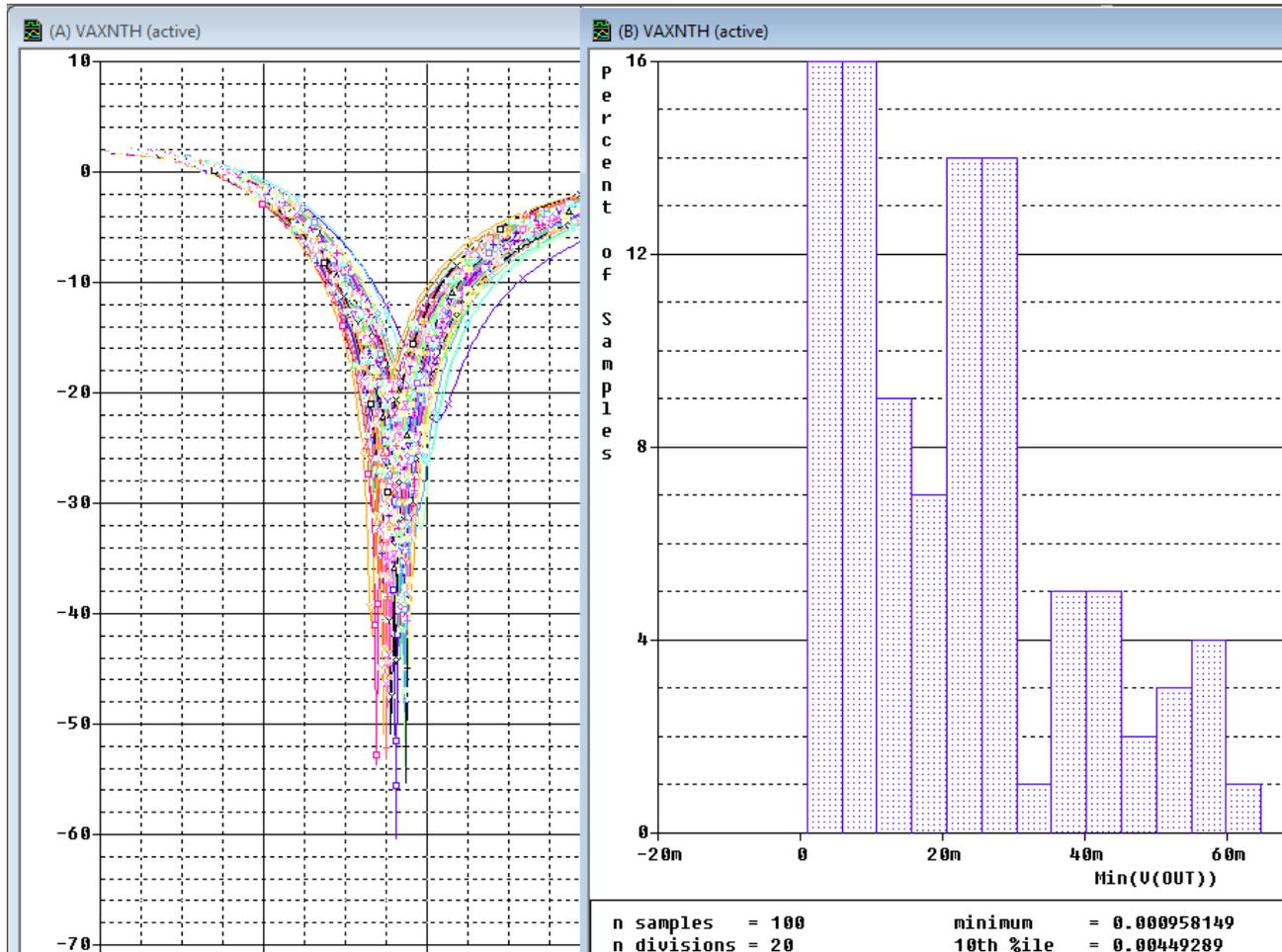


Рис. 4.17. Представление результатов статистического моделирования

4.6. Контрольные вопросы

1. Поясните сущность метода Монте – Карло и цели его применения.
2. Как устанавливают точность параметров компонентов схемы ?
3. Как устанавливают профилт моделирования в методе Монте – Карло ?
4. Как выполняют постобработку и дополнительный анализ результатов статистического исследования ?
5. Как сохранить значения случайных чисел после моделирования и повторно использовать их ?
6. Как отобразить результаты исследования на гистограммах ?

Глава 5. Анализ наихудшего случая

5.1. Функции сравнения для наихудшего случая

Анализ худшего случая (Worst Case Analysis) используется для идентификации наиболее важных компонентов, которые будут влиять на работу и характеристики цепи. Первоначально анализ чувствительности выполняется на каждом отдельном компоненте, которому присвоен допуск. Значение компонента устремляют к обоим пределам его допуска с небольшим процентом от его максимального значения, чтобы увидеть, какой предел будет иметь большее влияние на работу в худшем случае. Анализ наихудшего конкретного случая затем выполняется путём установки всех значений компонентов к их пределам допуска, которые показали худшие результаты работы. Для того, чтобы уменьшить количество запусков моделирования, используют функции сравнения для обнаружения отличий худшего случая на выходе от номинального режима (оценивают минимальное, максимальное или пороговое различия).

Как и в методе Монте-Карло, функции сравнения обнаруживают и сравнивают результат отклика схемы с заданными параметрами. Есть пять функций, которые могут определить худший случай:

YMAX находит в каждом сигнале наибольшее расстояние в направлении Y от номинального прогона;

MAX находит максимальное значение каждого сигнала;

MIN находит минимальное значение каждого сигнала;

RISE_EDGE находит первый случай превышения сигналом порогового значения. Функция предполагает, что будет по крайней мере одна точка, которая лежит ниже указанного значения и эта точка будет следовать после превышения.

FALL_EDGE находит первое снижение сигнала ниже порогового значения. Функция предполагает, что будет по крайней мере одна точка, которая лежит выше указанного значения и эта точка будет следовать после нижней точки.

5.2. Анализ смещения частоты режекции в заграждающем фильтре

Создадим папку PR-9 и новый проект на основе проекта PR-5.

Выделим резисторы R1 – R4 и в свойствах установим их точность 5%.

Отредактируем профиль моделирования. Первичную развертку по частоте установим как и ранее в соответствии с рис. 3.17.

Вы можете определить модели почти для всех примитивных аналоговых компонентов схемы, таких как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и полупроводниковые приборы. Для каждой модели PSpice использует номинальное, минимальное и максимальное вероятные значения, спецификаторы DEV/LOT; тип распределения вероятности (например, «равномерное» или «гауссово») игнорируется.

Критерий определения наихудших значений параметров для соответствующей модели определены в операторе WC как функция любой стандартной

выходной переменной в заданном диапазоне развертки. Надо выбрать одну из этих пяти функций сортировки.

Вы можете определить худшее по наивысшему (HI) или самому низкому (LO) возможному значению параметров функция сопоставления относительно номинального значения.

Установим опцию Monte Carlo/Worst Case и выполняем установки, показанные на рис. 5.1. Установка DEV and LOT означает, что точности резисторов в устройстве и партии резисторов одинаковые.

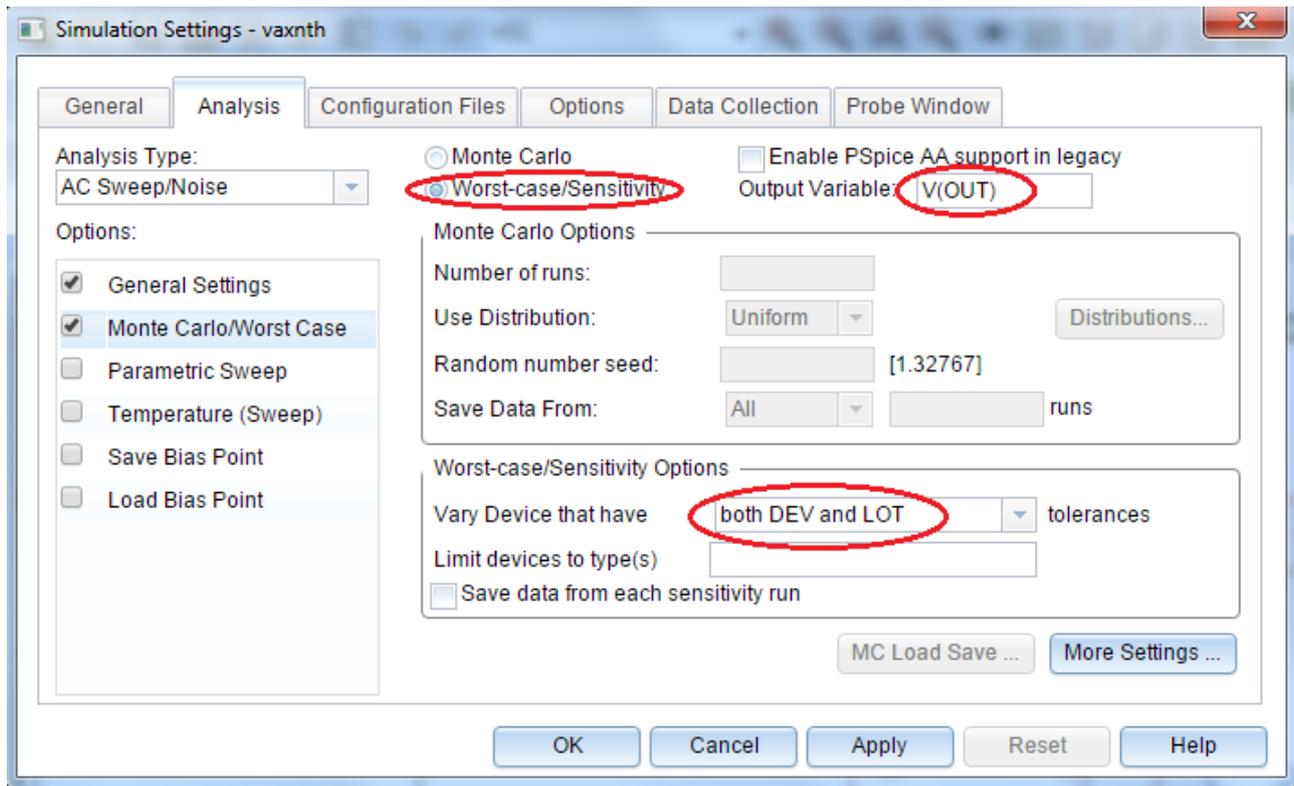


Рис. 5.1. Установки для поиска отклонения по частоте

Далее выбираем дополнительные установка (More Settings) и устанавливаем поиск минимального значения в направлении снижения (рис. 5.2): В окне Find можно выбрать одну из пяти функций, определяющих худший случай. Поиск худшего случая сначала будем вести при отклонении параметров в сторону уменьшения (Low).

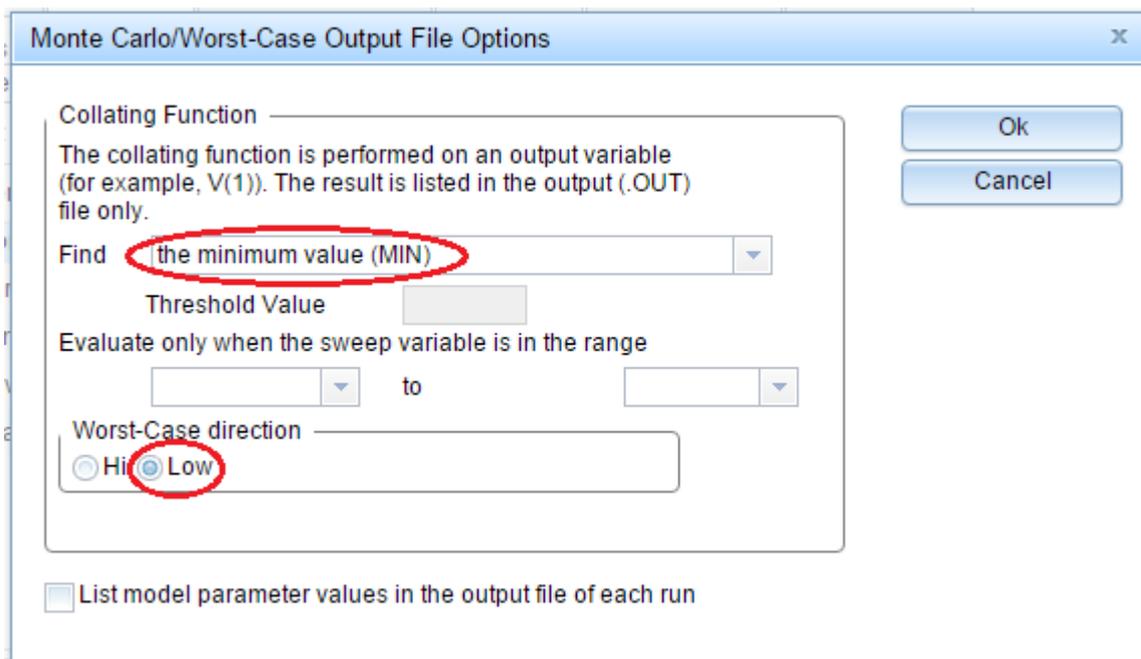


Рис. 5.2. Установка параметров поиска худшего случая

В настройках Options устанавливаем отображение выходного файла (рис. 5.3) и проверяем основные настройки аналогового моделирования (рис. 5.4).

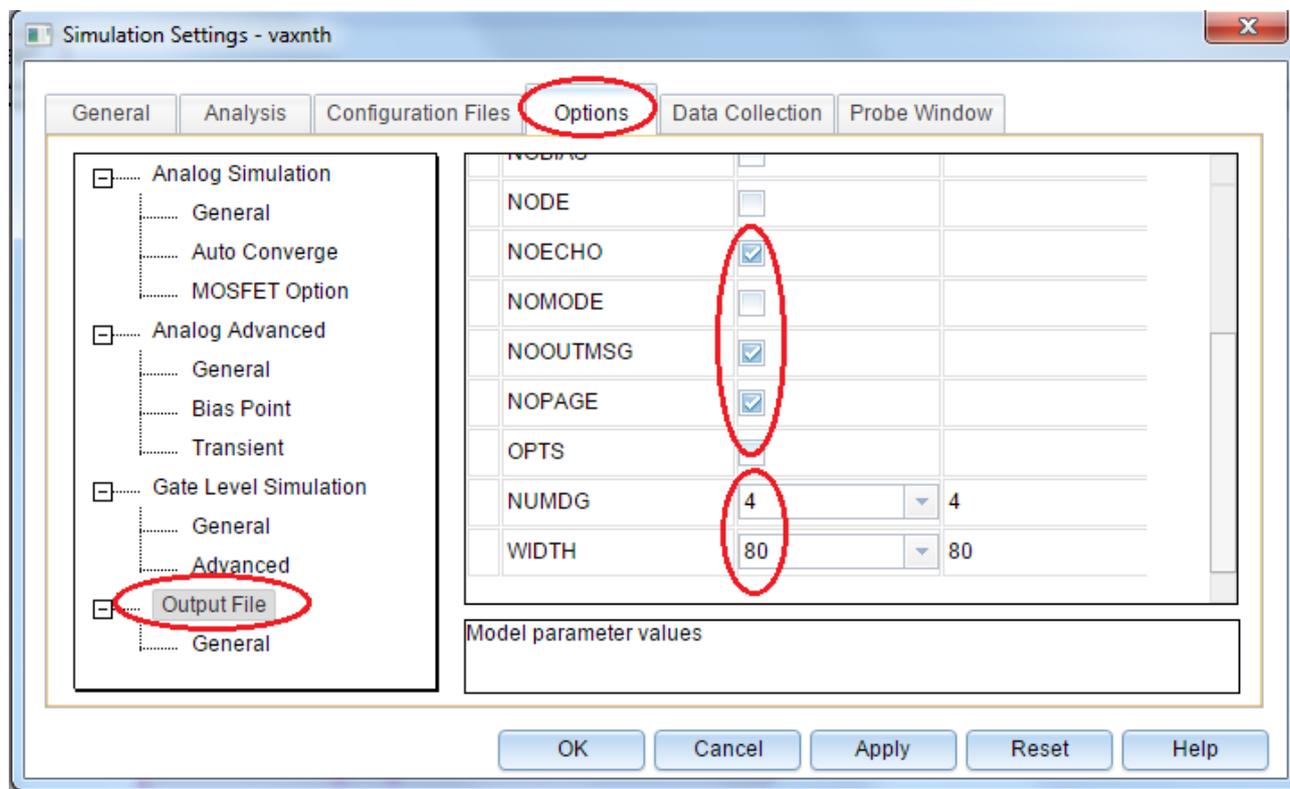


Рис. 5.3. Установка отображения выходного файла

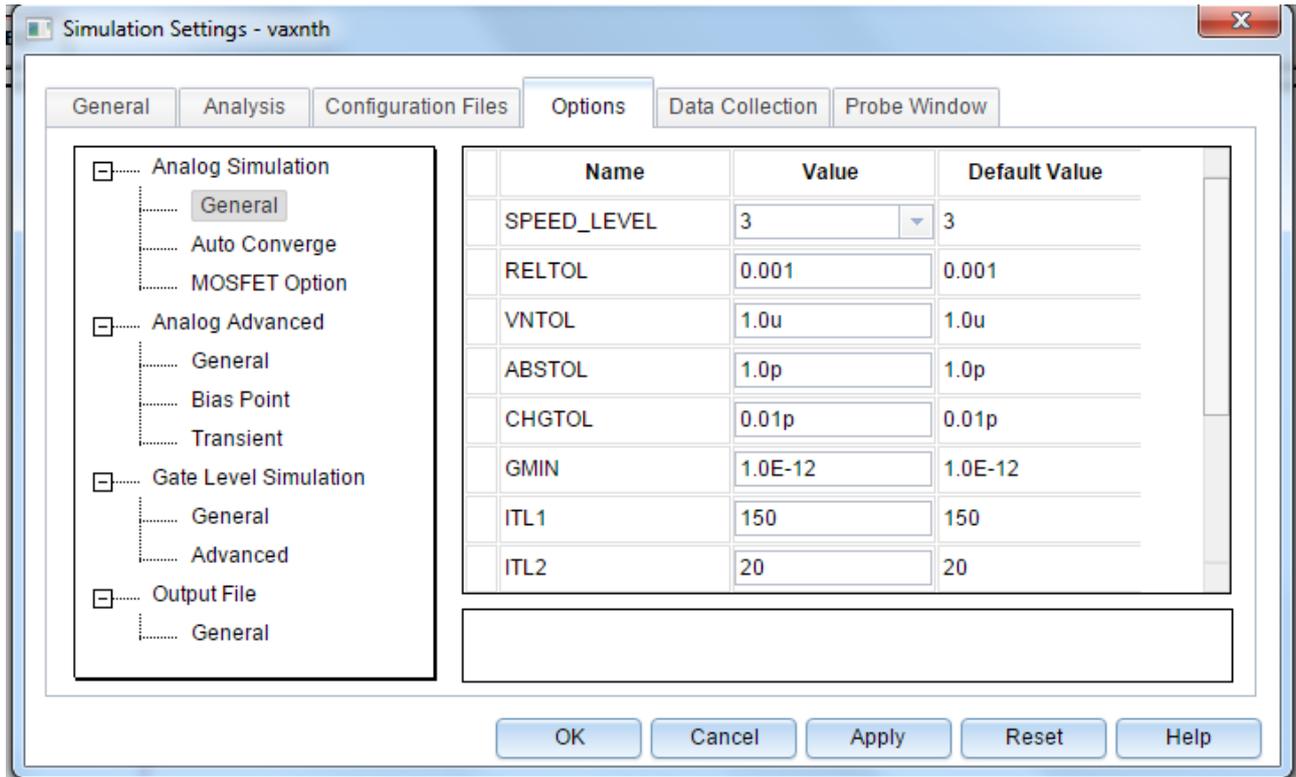


Рис. 5.4. Проверка настроек аналогового моделирования

После этого нажимаем RUN, получаем два доступных решения (рис. 5.5) и открываем графики АЧХ (Рис. 5.6).

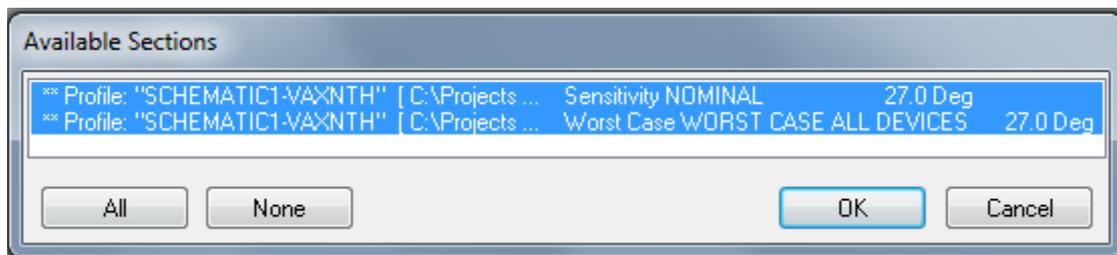


Рис. 5.5. Доступные решения поиска худшего случая.

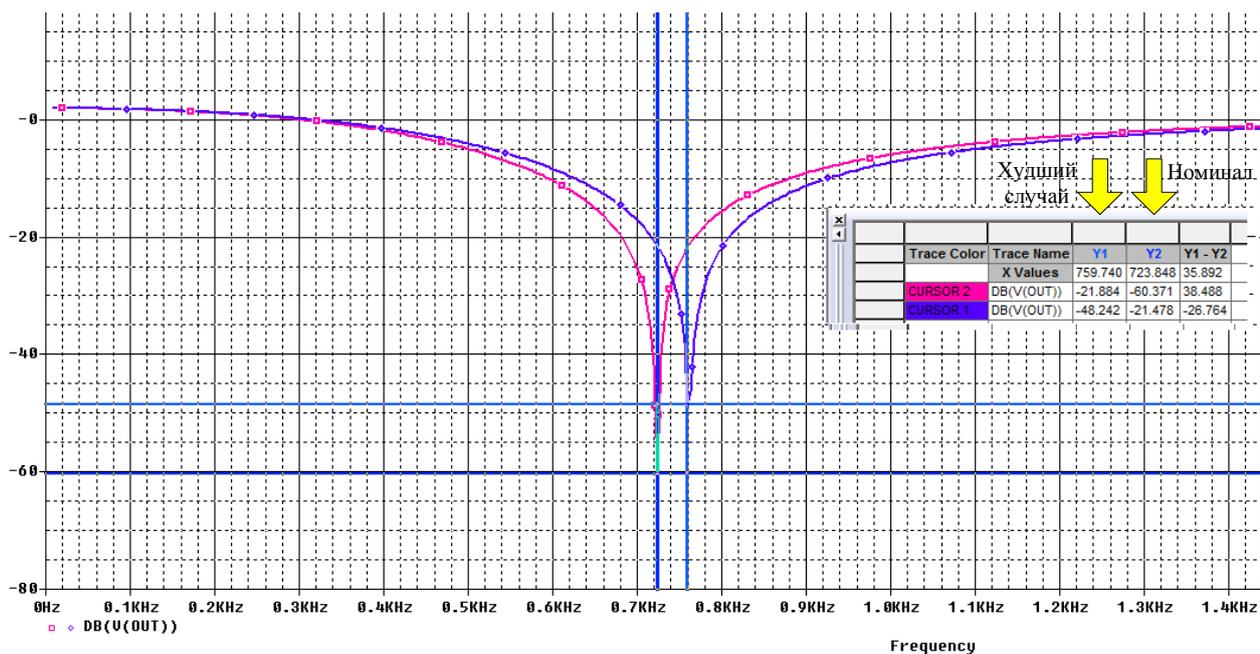


Рис. 5.6. Графики АЧХ заграждающего фильтра

Левый график с частотой режекции 723,848 Гц соответствует номинальным параметрам фильтра без разброса значений резисторов.

Правый график с частотой режекции 759,740 Гц соответствует худшему случаю. Отклонение частоты режекции от номинальной составляет 35,89 Гц.

Дополнительно введём разброс параметров конденсаторов 5% и повторим моделирование. Полученные графики номинального и худшего случая показаны на рис. 5.7.

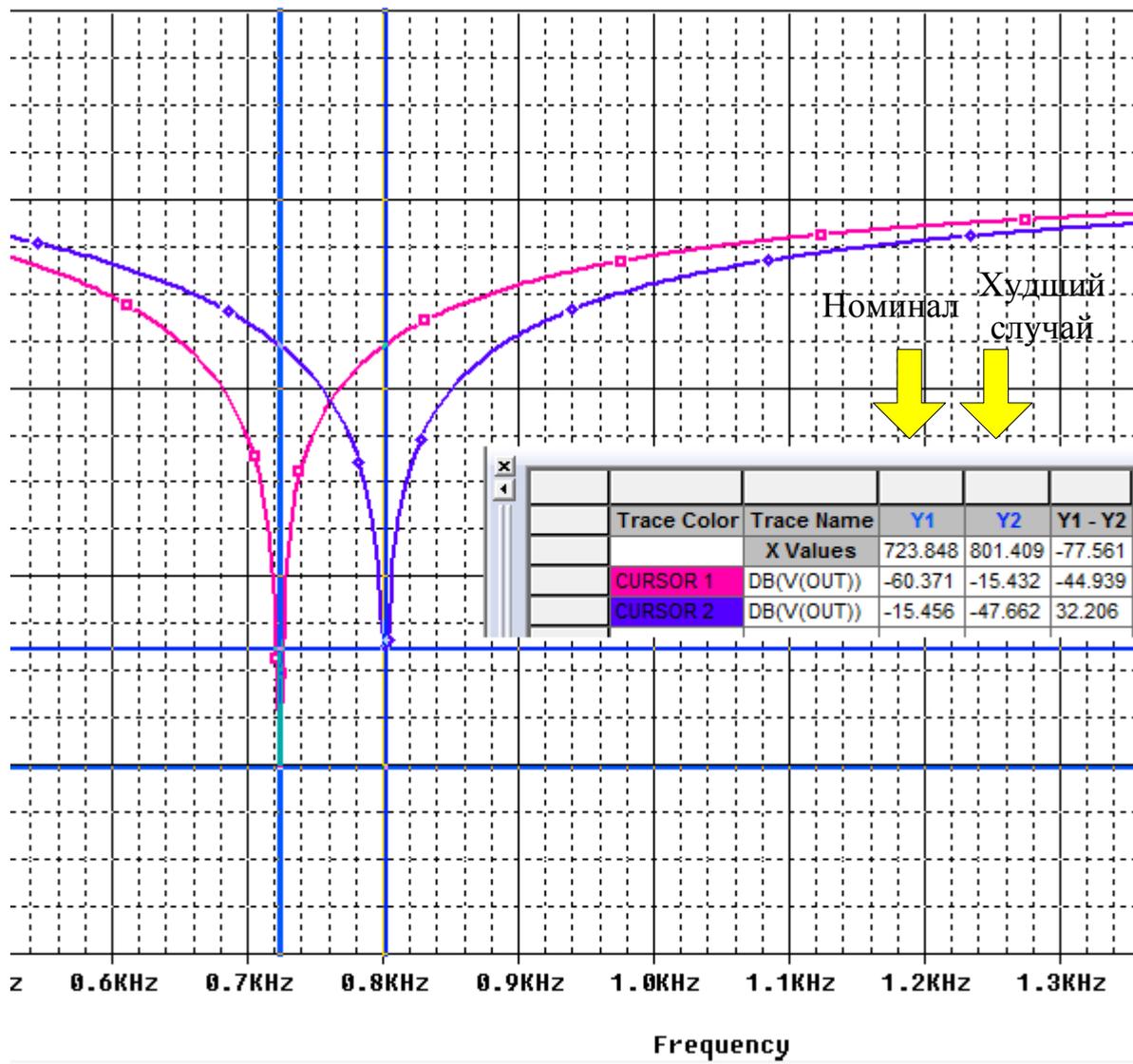


Рис. 5.7. Графики АЧХ для точности резисторов и конденсаторов 5% и отклонении в сторону уменьшения

Теперь частота режекции для худшего случая увеличилась до 801,409 Гц. Отклонение от номинальной частоты составляет 74,56 Гц.

Рекомендации как улучшить устройство содержатся в выходном файле Output File (рис. 5.8).

Результаты анализа чувствительности печатаются в выходном файле (.OUT). Для каждого измененного параметра показано процентное изменение в функции сортировки и значения переменной развертки, при которой функции сортировки были измерены. Параметры указаны для наихудшего запуска. Например, функция сортировки была наихудшей, когда первый параметр, напечатанный в списке был изменен.

Когда вы используете функцию сортировки YMAX, выходной файл также перечисляет среднее значение отклонения и среднеквадратическое отклонение «сигма». Они основаны на изменениях в выходной переменной от номи-

нального значения в каждой точке развертки для каждой оценки чувствительности.

5.3. Оптимизация схемы по результатам анализа худшего случая

Вы можете использовать анализ наихудшего случая для выполнения ручной оптимизации с PSpice. Условие монотонности обычно выполняется, если параметры имеют очень ограниченный диапазон. Выполнение анализа наихудшего случая с жесткими допусками на параметры выдают в выходном файле чувствительность и наихудшие результаты. Вы можете использовать их для определения того, как должны быть изменены параметры для достижения желаемого ответа. Затем вы можете сделать корректировки номинальных значений в файле схемы и выполнить моделирование худшего случая для нового набора градиентов.

```

RUN                MINIMUM VALUE
R_R4 R_R4 R        1.5978E-03 at F = 723.85
                   ( 667.55% change per 1% change in Model Parameter)
C_C2 C_C2 C        1.5968E-03 at F = 723.85
                   ( 666.54% change per 1% change in Model Parameter)
C_C1 C_C1 C        1.5963E-03 at F = 723.85
                   ( 665.98% change per 1% change in Model Parameter)
R_R3 R_R3 R        1.5956E-03 at F = 723.85
                   ( 665.33% change per 1% change in Model Parameter)
C_C3 C_C3 C        1.1846E-03 at F = 723.85
                   ( 236.38% change per 1% change in Model Parameter)
C_C4 C_C4 C        1.1846E-03 at F = 723.85
                   ( 236.38% change per 1% change in Model Parameter)
R_R1 R_R1 R        1.1844E-03 at F = 723.85
                   ( 236.1 % change per 1% change in Model Parameter)
R_R2 R_R2 R        1.1844E-03 at F = 723.85
                   ( 236.1 % change per 1% change in Model Parameter)
s
**** 03/13/18 11:11:45 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 ****
** Profile: "SCHEMATIC1-VAXNTH" [ C:\Projects 17.2\PR-9\pr-9-pspicefiles\schematic1\vaxnth.sim ]

****      UPDATED MODEL PARAMETERS      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
                WORST CASE ALL DEVICES
*****
Device  MODEL  PARAMETER  NEW VALUE  (Decreased)
C_C1    C_C1    C           .95        (Decreased)
C_C2    C_C2    C           .95        (Decreased)
C_C3    C_C3    C           .95        (Decreased)
C_C4    C_C4    C           .95        (Decreased)
R_R1    R_R1    R           .95        (Decreased)
R_R2    R_R2    R           .95        (Decreased)
R_R3    R_R3    R           .95        (Decreased)
R_R4    R_R4    R           .95        (Decreased)
s
**** 03/13/18 11:11:45 ***** PSpice Lite (March 2016) ***** ID# 10813 ****
** Profile: "SCHEMATIC1-VAXNTH" [ C:\Projects 17.2\PR-9\pr-9-pspicefiles\schematic1\vaxnth.sim ]

****      SORTED DEVIATIONS OF V(OUT)      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
                WORST CASE SUMMARY
*****

```

Рис. 5.8. Выходной файл

В выходном файле рекомендовано уменьшить номиналы резисторов и конденсаторов на 5%. Выполним это и повторим моделирование. Теперь в худшем случае отклонение частоты режекции от номинальной составляет 71,75 Гц (рис. 5.8).

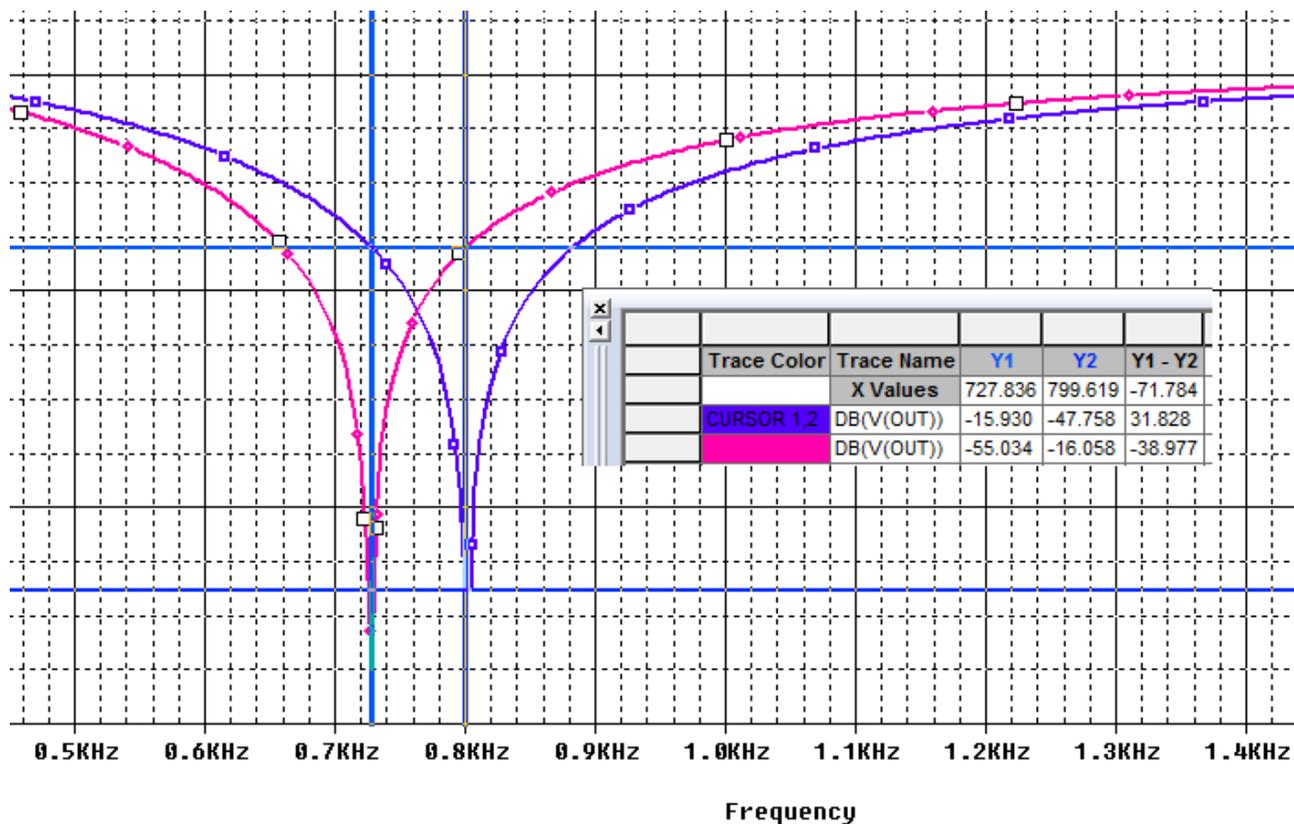


Рис. 5.8. Графики АЧХ для измененных параметров резисторов и конденсаторов

Для номинальных значений резисторов и конденсаторов выполним поиск худшего случая, если отклонения параметров происходят в сторону увеличения (рис. 5.9). Частота режекции уменьшится до 656,052 Гц, а отклонение от номинала составит 67,796 Гц.

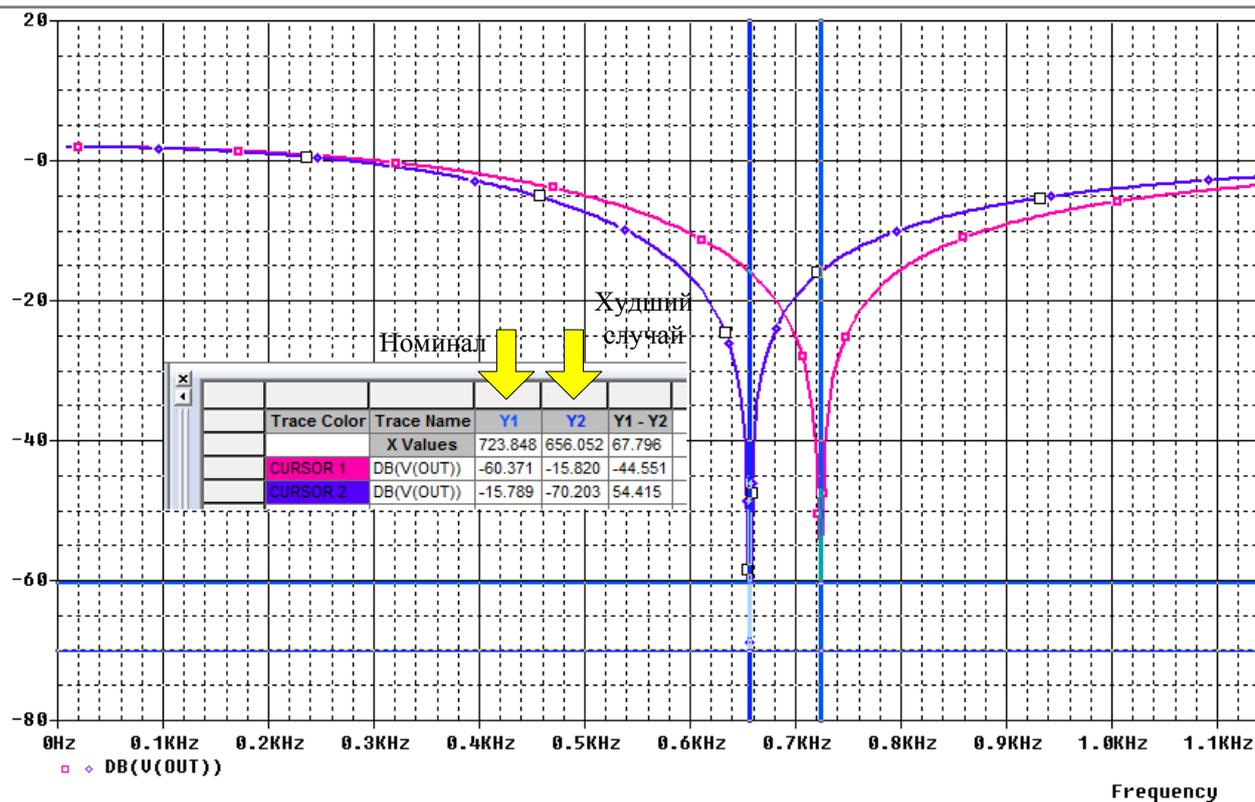


Рис. 5.9. Графики АЧХ для точности резисторов и конденсаторов 5% и отклонении в сторону увеличения

Анализ Монте-Карло (.МС) может быть полезен, когда нельзя использовать анализ наихудшего случая. Анализ Монте-Карло часто можно использовать для проверки или улучшения результатов анализа наихудшего случая.

Анализ Монте-Карло случайным образом выбирает возможные значения параметров, которые можно рассматривать как случайный выбор точек в пространстве параметров. В худшем случае предполагается, что наихудшие результаты где-то на поверхности этого пространства, и параметры (к которым чувствителен выход) находятся в одном из своих экстремальных значений.

Если это не так, то анализ Монте-Карло может найти точку, в которой результаты хуже. Чтобы попробовать это, замените .WC в файле профиля моделирования схемы на .МС <#runs>, где <#runs> - это количество симуляций, которые вы хотите выполнять. Больше трасс обеспечивает более высокое доверие к результатам.

5.4. Контрольные вопросы

1. Для чего применяют анализ наихудшего случая и как его выполняют ?
2. По каким функциям определяют наихудший случай в OrCAD ?
3. Какие установки в профиле моделирования надо сделать для анализа худшего случая ?
4. Какие оценки худшего случая можно получить для заграждающего фильтра при отклонении параметров компонентов ?

5. Как выполнить оптимизацию схемы по результатам анализа худшего случая ?

Глава 7. Редактор стимулов

Редактор стимулов (внешних воздействий) представляет собой графический инструмент, который помогает создать аналоговые и цифровые входные сигналы для исследования переходных процессов.

С помощью редактора стимулов вы можете сформировать:

- аналоговые стимулы с синусоидальной волной, импульсом, кусочно-линейные и экспоненциальные импульсы, одночастотные формы фазомодулированных сигналов;
- цифровые стимулы, которые варьируются от простых тактов до сложных шаблонов импульсов и шинных последовательностей.

Редактор стимулов позволяет рисовать аналоговые кусочно-линейные и все цифровые стимулы, щелкнув в точках вдоль временной шкалы в местах, которые соответствуют определенным входным значениям и которые вы хотите получить на графиках переходных процессов.

7.1. Ввод и редактирование стимулов

Файл стимула содержит временные определения для аналоговых или цифровых входных сигналов. вы можете создать файл стимула:

- вручную, используя стандартный текстовый редактор, такой как Блокнот, для создания числового определения файла стимула с типичным расширением файла - .STM или
- автоматически, используя редактор стимулов (который генерирует .STL расширение файла).

Не всегда требуется файл стимула. В некоторых случаях, таких как источники постоянного тока и переменного тока, вы должны использовать условный символ и установить его свойства.

Использованные в проекте стимулы хранятся в папке Stimulus Files Менеджера проектов.

Библиотека SOURCSTM включает три источника, показанные на рис. 7.1, каждый из которых обеспечивает интерфейс с определённым стимулом в Редакторе стимулов.

Создадим новый проект PR-14. Выполним Place Part и из библиотеки SOURCSTM поместим на страницу источники VSTIM, ISTIM, DigStm1 (рис. 7.1).

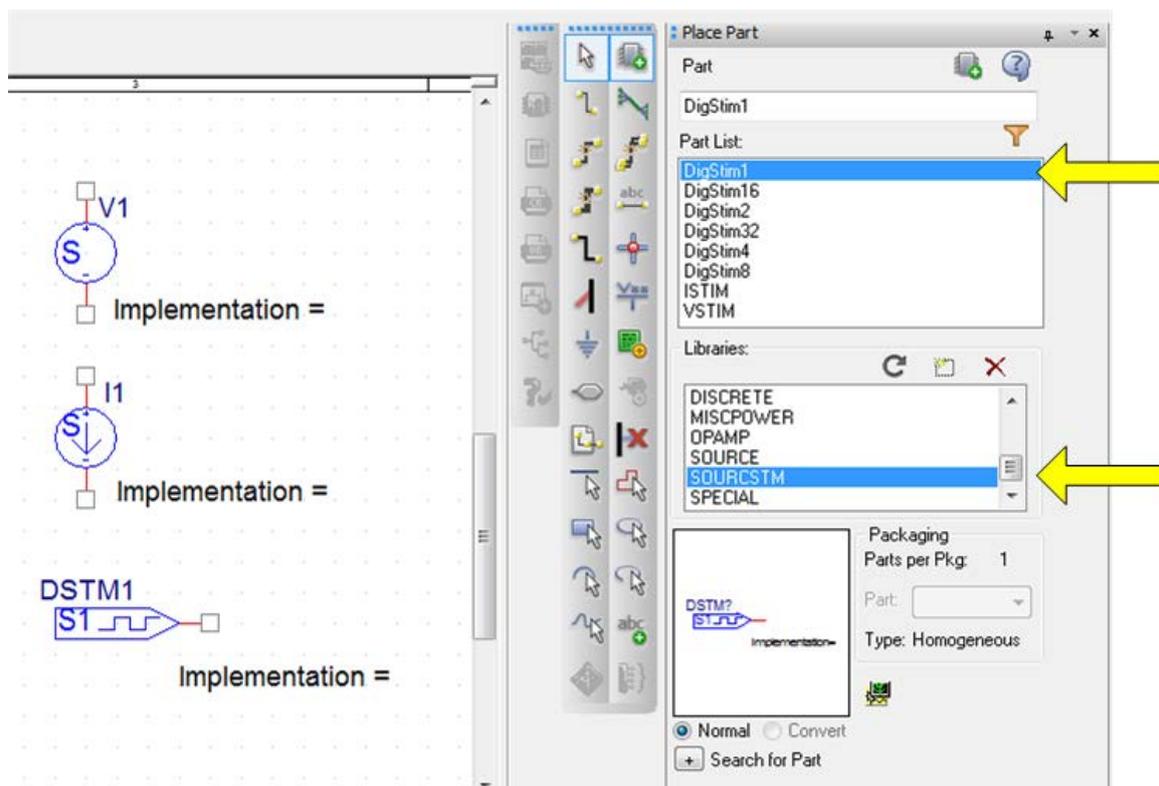


Рис. 7.1. Стимулы из библиотеки SOURCSTM

Когда вы впервые разместите один из источников из библиотеки SOURCSTM, то свойство его реализации (implementation=) отображается на схеме. Это свойство относится к названию стимула, который определяется в редакторе стимулов. Вы можете или ввести имя стимула на схеме, чтобы начать моделировать с этим названием, или Вам будет предложено ввести имя стимула в Редакторе стимулов уже после начала работы.

7.2. Стимулы для переходных процессов

7.2.1. Экспоненциальные источники

Экспоненциальные формы сигналов могут быть определены для напряжения или тока с использованием VSTIM или ISTIM источников, соответственно.

Установим источник напряжения VSTIM и в свойствах компонента создадим его имя **exp** (рис. 7.2).

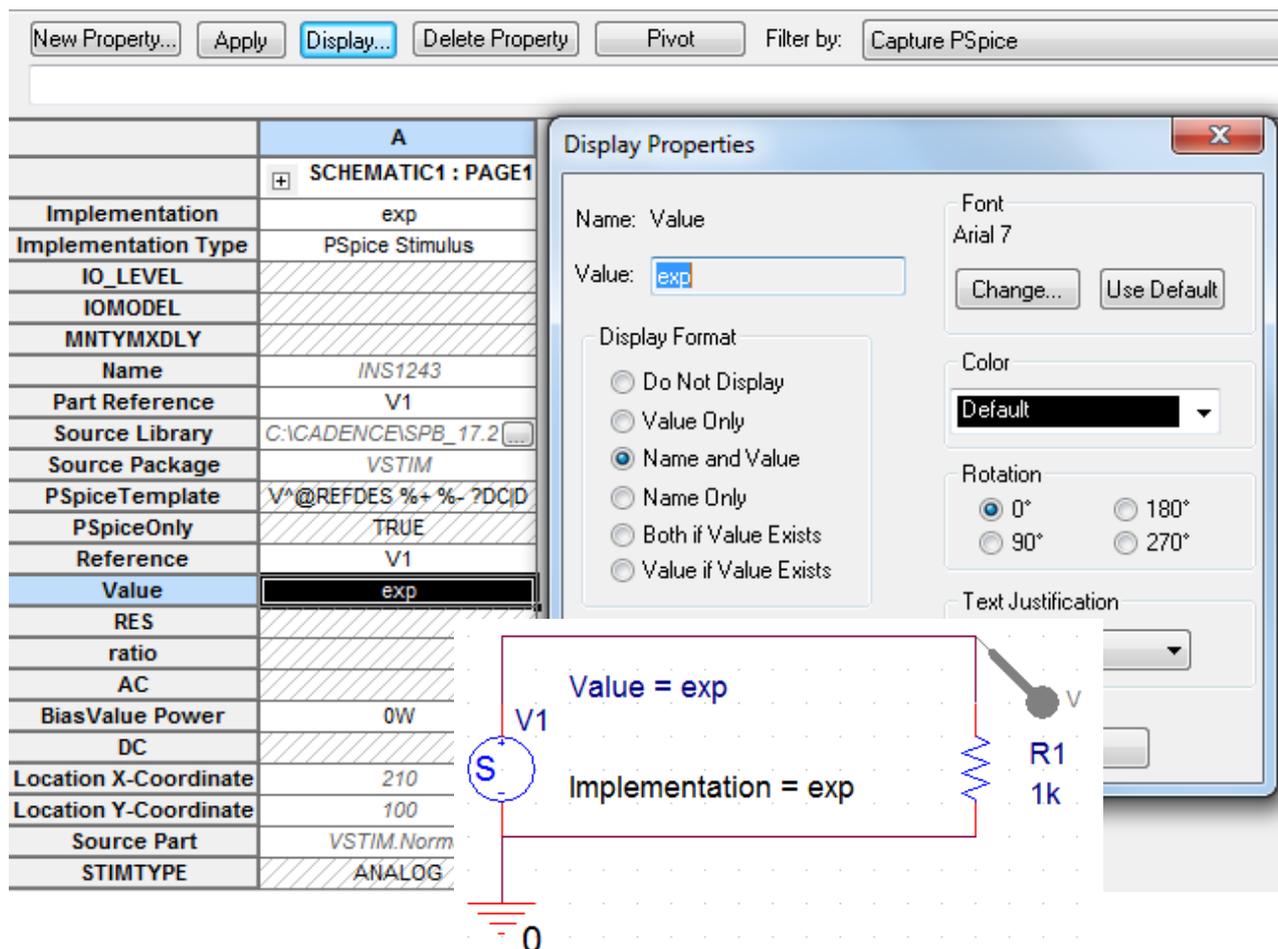


Рис. 7.2. Схема с экспоненциальным источником напряжения

Экспоненциальные формы сигнала задаются установкой параметров импульса.

Для того, чтобы запустить Редактор стимулов, выделите источник exp, выполните щелчок правой кнопкой мыши (RMB) и в меню свойств выберите Edit PSpice Stimulus.

При запуске редактора стимулов окно New Stimulus будет выглядеть как показано на рис. 7.3. Обратите внимание, что имя файла стимула соответствует имени профиля PSpice моделирования, в данном случае PR-14.stl.

Окно New Stimulus позволяет определять аналоговые и цифровые сигналы и предлагает Вам ввести имя стимула, если вы ещё не определили имя в Capture.

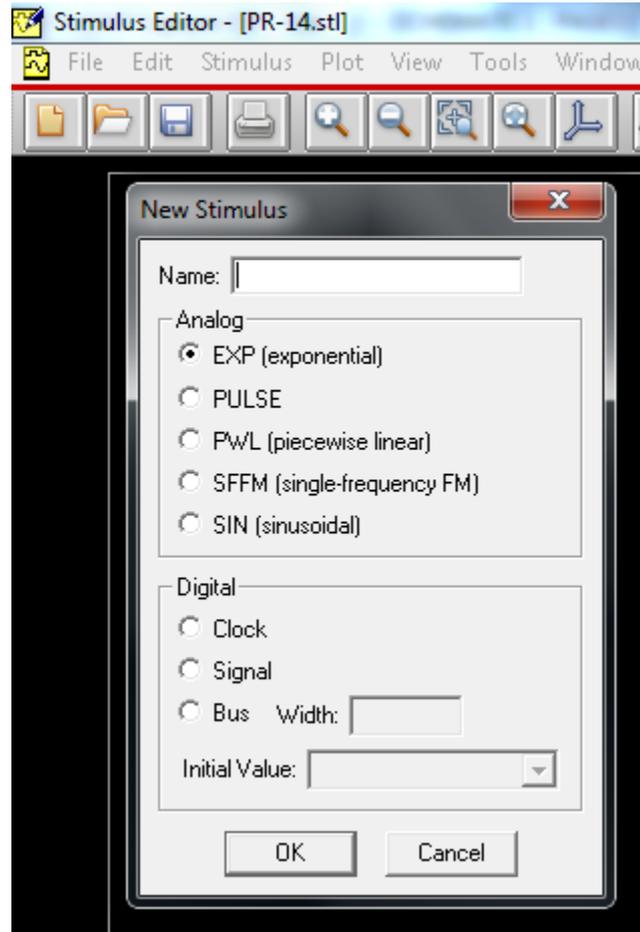


Рис. 7.3. Окно редактора стимулов

Вводим имя стимула exp, выбираем аналоговый стимул EXP и нажимаем Ok. Далее устанавливаем параметры экспоненциального импульса (рис. 7.4). Эти параметры включают начальное значение, пиковое значение, задержку начала нарастания, постоянную времени фронта нарастания, задержку до спада (нарастания), постоянную времени спада (нарастания).

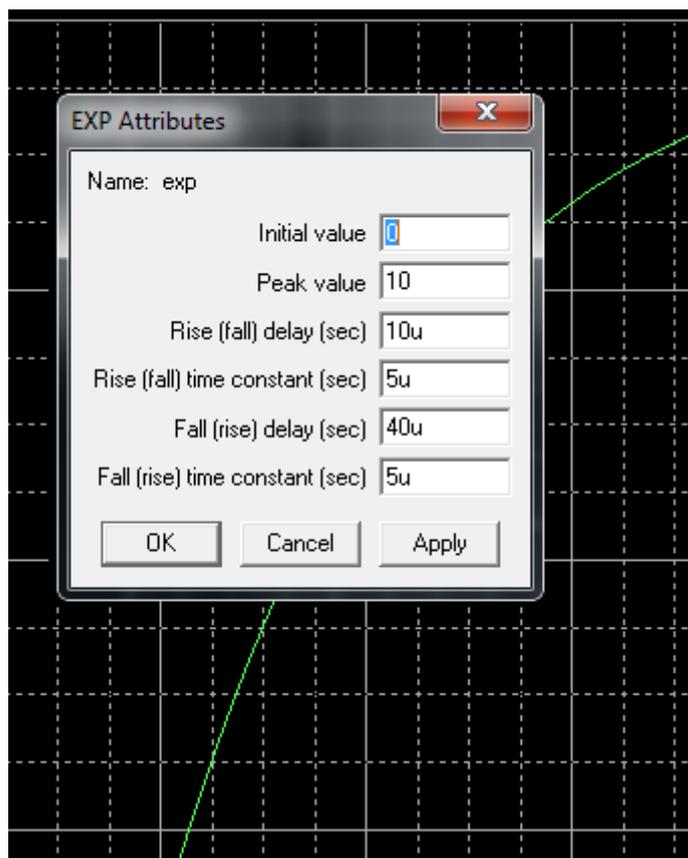


Рис. 7.4. Параметры экспоненциального импульса

Нажимаем Apply и Ok. Диаграмма напряжения отображается в окне Редактора стимулов. При закрытии окна редактора стимулов файл стимула должен сохраняться в проекте. Если это не произошло, надо выполнить File > Save As и указать место для сохранения (рис. 7.5).

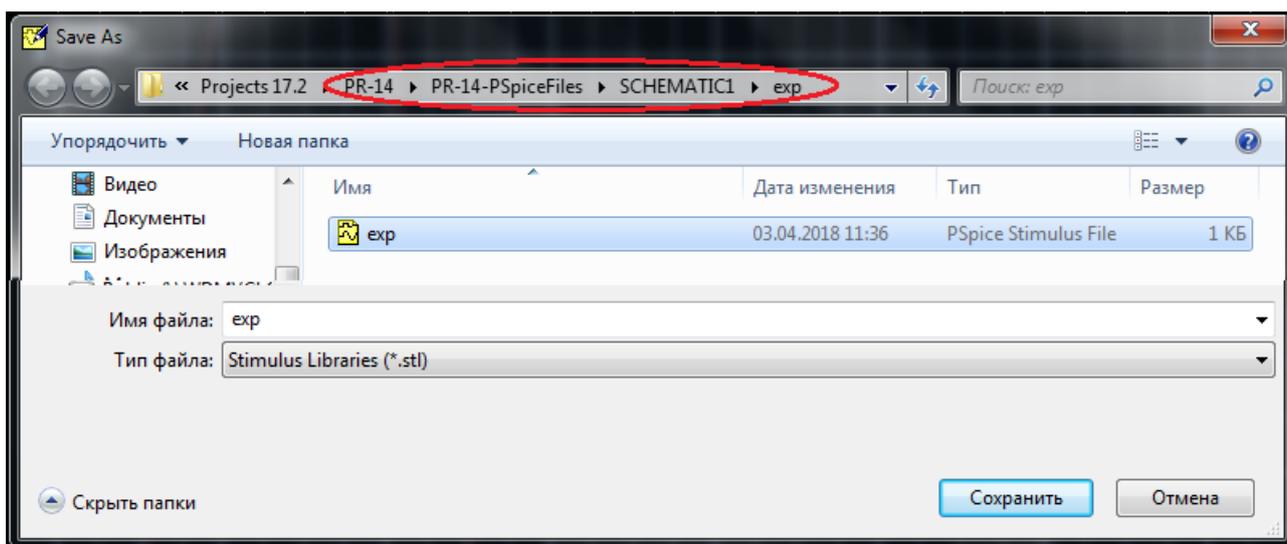


Рис. 7.5. Сохранения файла стимула

Так как отображение в Редакторе стимулов происходит на черном фоне для лучшей наглядности мы выпоним моделирование, чтобы получить ту же форму импульса на светлом поле.

Для этого надо создать профиль моделирования.

7.2.2. Профили моделирования

Начиная с версии 16.3, файлы стимулов связаны с текущим активным профилем моделирования и могут быть доступны через профиль моделирования и вкладку Configuration Files. В предыдущих версиях, были отдельные вкладки для Stimulus, Library и Include Options.

Итак, в проекте создаем новый профиль моделирования под названием exp. Устанавливаем тип анализа Transient на время 100 мкс с максимальным шагом 1 мкс.

Далее на вкладке Configuration Files в категории Stimulus открываем из папки проекта файл экспоненциального стимула .\exp.stl и добавляем этот файл в профиль exp (рис. 7.6).

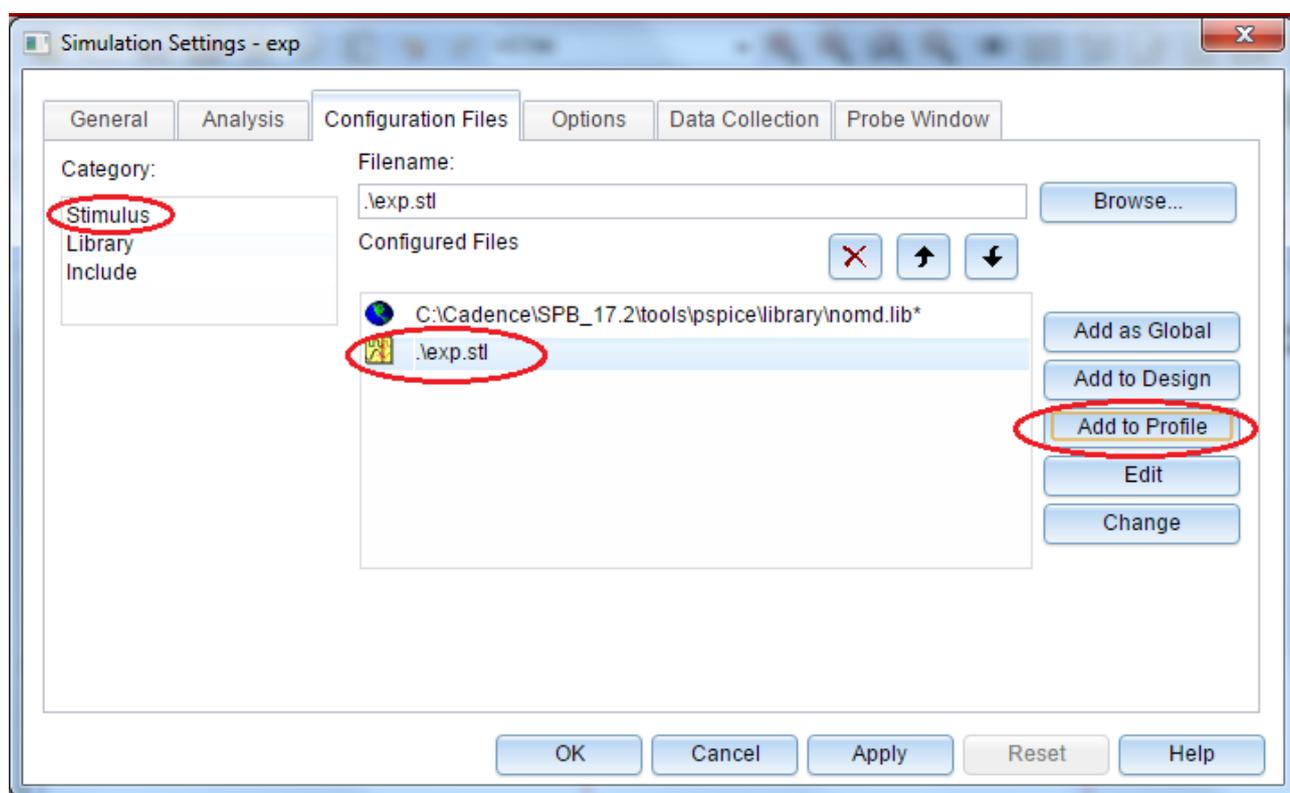


Рис. 7.6. Добавление файла стимула в профиль моделирования

Теперь под файлами профиля моделирования вы увидите файл exp.stl (рис. 7.7).

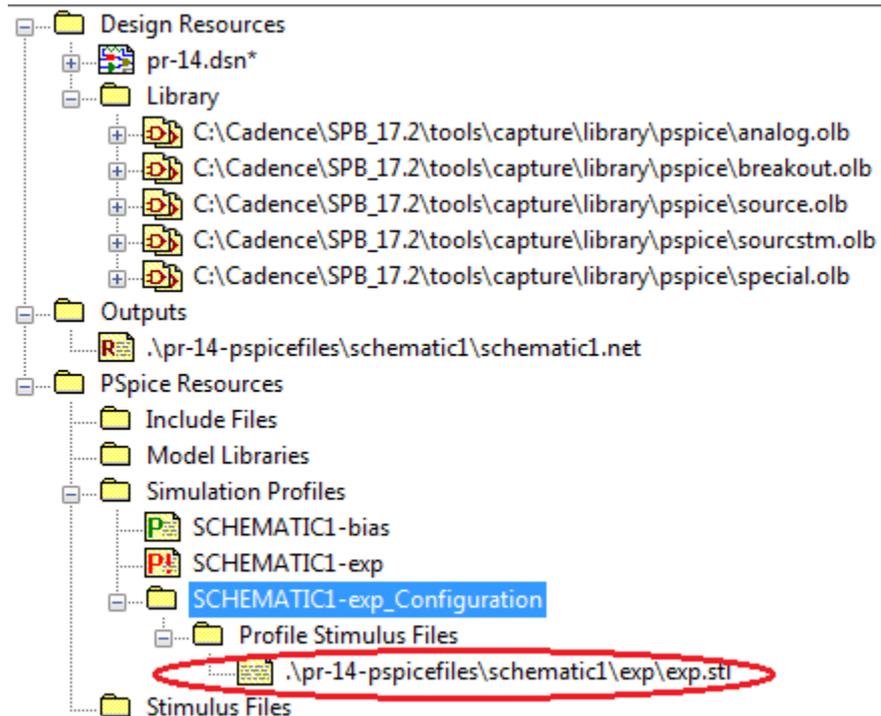


Рис. 7.7. Файл стимула в профиле моделирования

Если вы не видите файл стимула, то вы можете искать Filename. После этого вы можете добавить файл стимула к профилю (Add to Profile).

Есть и другие опции:

- добавить в Global: все проекты будут иметь доступ к файлу стимула;
- добавить в Design: только текущий дизайн будет иметь доступ к файлу стимула.

Добавление файла стимула как Global полезно, если вы создали стандартный набор стимулов, чтобы тестировать все ваши цепи. Вы можете добавить несколько файлов стимулов и организовать порядок использования, нажав на стрелки вверх и вниз. Красный крест удаляет выбранный файл стимула. Профиль Schematic – bias устанавливается автоматически и его можно удалить.

Сохраняем установленный профиль моделирования exp и выполняем Run. В окне Probe получим форму экспоненциального импульса (рис. 7.8)

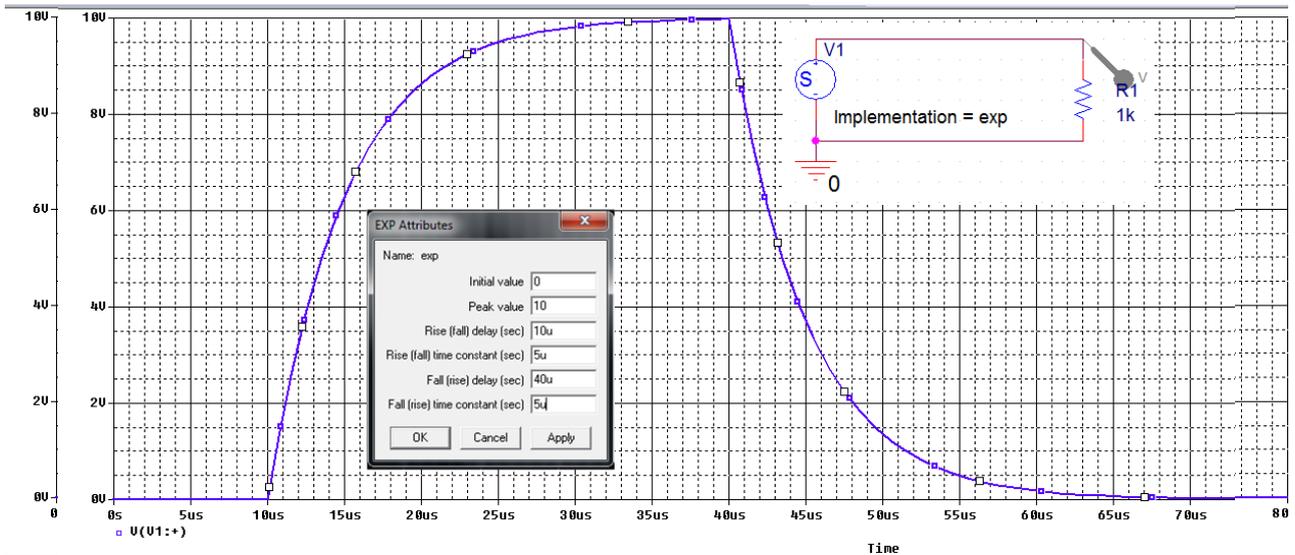


Рис. 7.8. Форма экспоненциального импульса

7.2.3. Импульсные источники

Сформируем импульсный сигнал для источника напряжения. В свойствах источника напряжения вводим имя pulse.

Для установки параметров импульсов выделяем источник, выбираем Edit PSpice Stimulus. Если загружен стимул с другой формой сигнала, закрываем окно, нажимаем Stimulus>New. В окне New Stimulus выбираем форму стимула, вводим имя pulse и вводим параметры импульсов (рис. 7.9).

Устанавливаем профиль моделирования pulse типа Transient на время 400 мкс с шагом 1 мкс. Добавляем в файлы конфигурации pulse как глобальный стимул и выполняем моделирование (рис. 7.9).

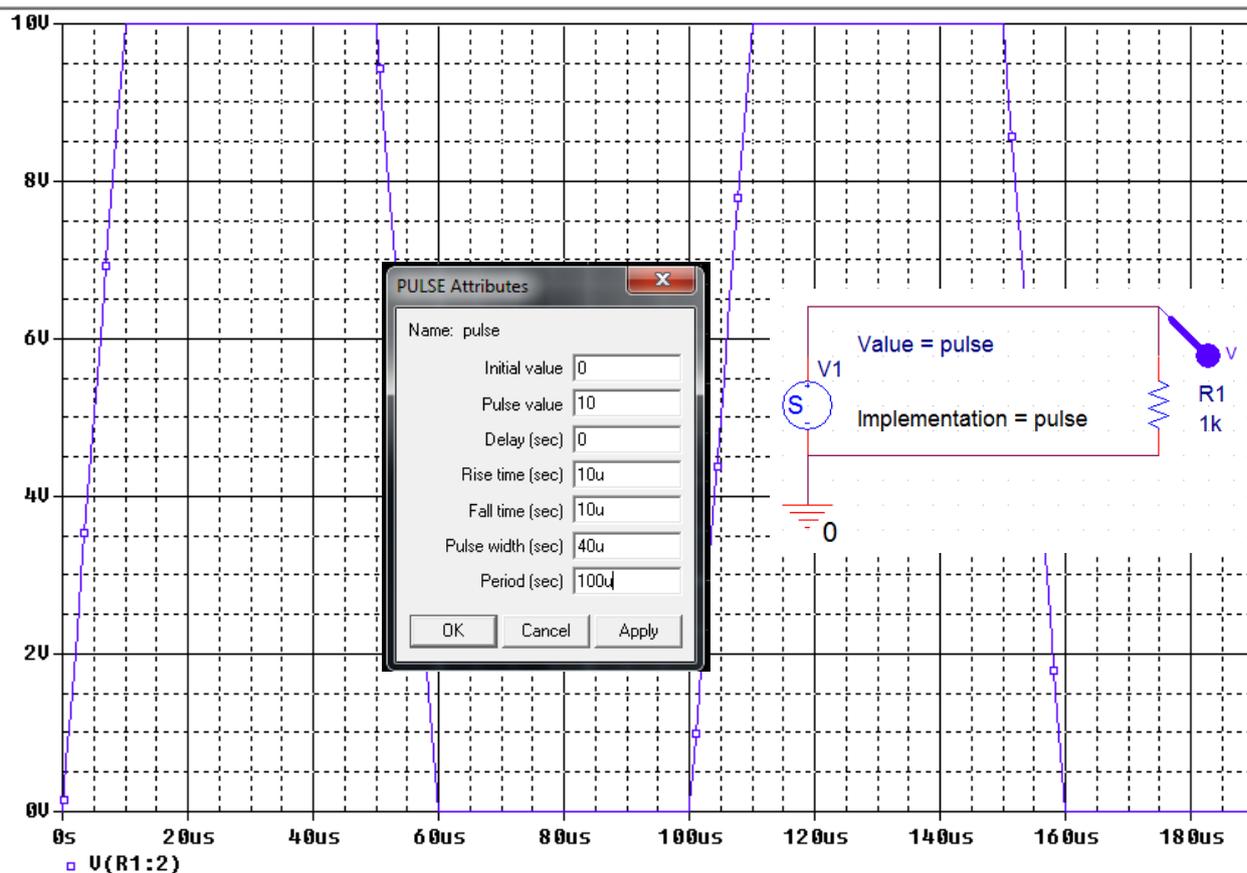


Рис. 7.9. Установка параметров импульсов и результаты моделирования

7.2.4. Синусоидальные сигналы

Изменим название источника напряжения на Vsin. На рис. 7.10 показаны атрибуты для синусоиды. Полное определение включает в себя атрибуты для затухающей синусоиды с фазовым углом и значением смещения. Смещение - это начальное постоянное напряжение или ток в момент времени 0 сек, амплитуда является максимальным напряжением или током, частота (Гц) - число циклов в секунду. Время задержка (s) является задержкой старта, коэффициент демпфирования (1/s) определяет экспоненциальное затухание или нарастание сигнала, угол сдвига фаз (в градусах) представляет собой фазовый угол.

Устанавливаем параметры синусоиды и сохраняем файл стимула в папке текущего проекта.

Устанавливаем профиль моделирования Transient на время 40 мс с максимальным шагом 100 мкс. Файл стимула Vsin добавляем как глобальный. Выполняем RUN и получаем на выходе синусоидальный сигнал (рис. 7.10).

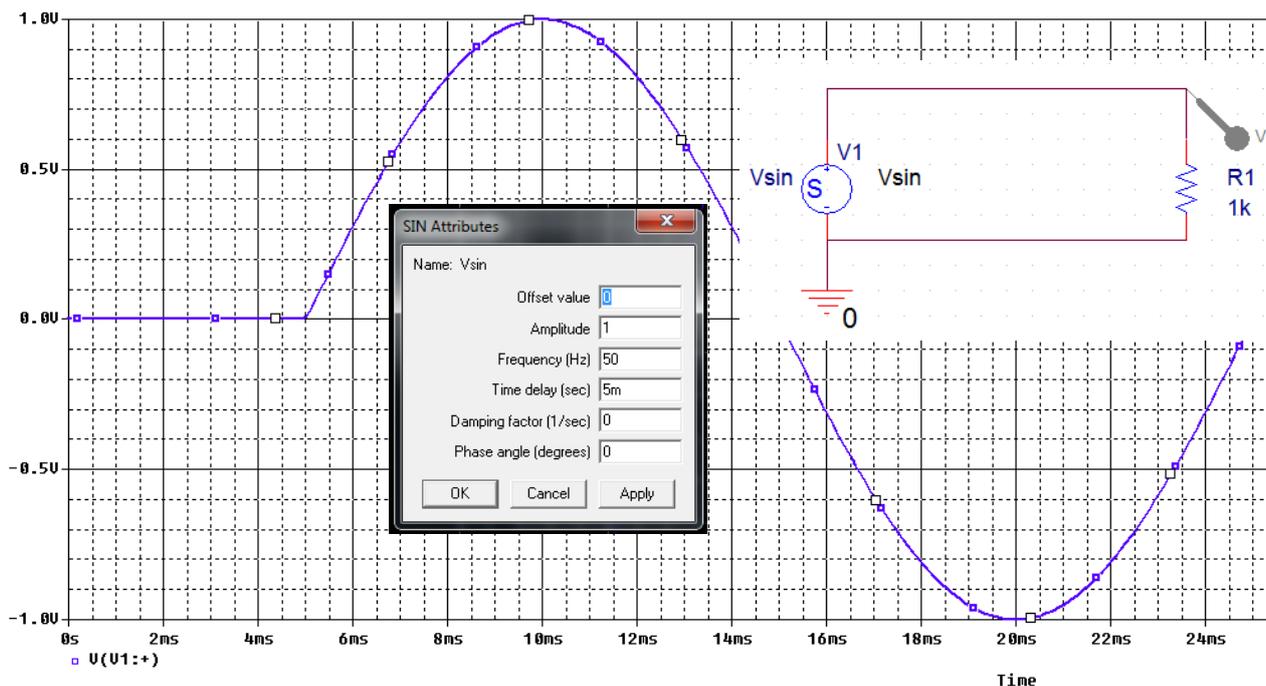


Рис. 7.10. Установка параметров и результаты моделирования синусоидального сигнала

7.2.5. Простая частотная модуляция (SFFM)

Этот источник генерирует частотно-модулированный синусоидальный сигнал, как показано (рис. 7.11), который показывает модуляцию несущей частоты. Модулированный сигнал задан формулой:

$$v(t) = V_{off} + V_{ampl} \cdot \sin \left[(2\pi f_c t + (\text{mod} \cdot \sin(2\pi f_m t)) \right],$$

где:

V_{off} - напряжение смещения;

V_{ampl} - максимальное значение напряжения;

mod- индекс модуляции;

f_c - несущая частота;

f_m - частота модуляции.

Установки стимула SFFM показаны на рис. 7.11.

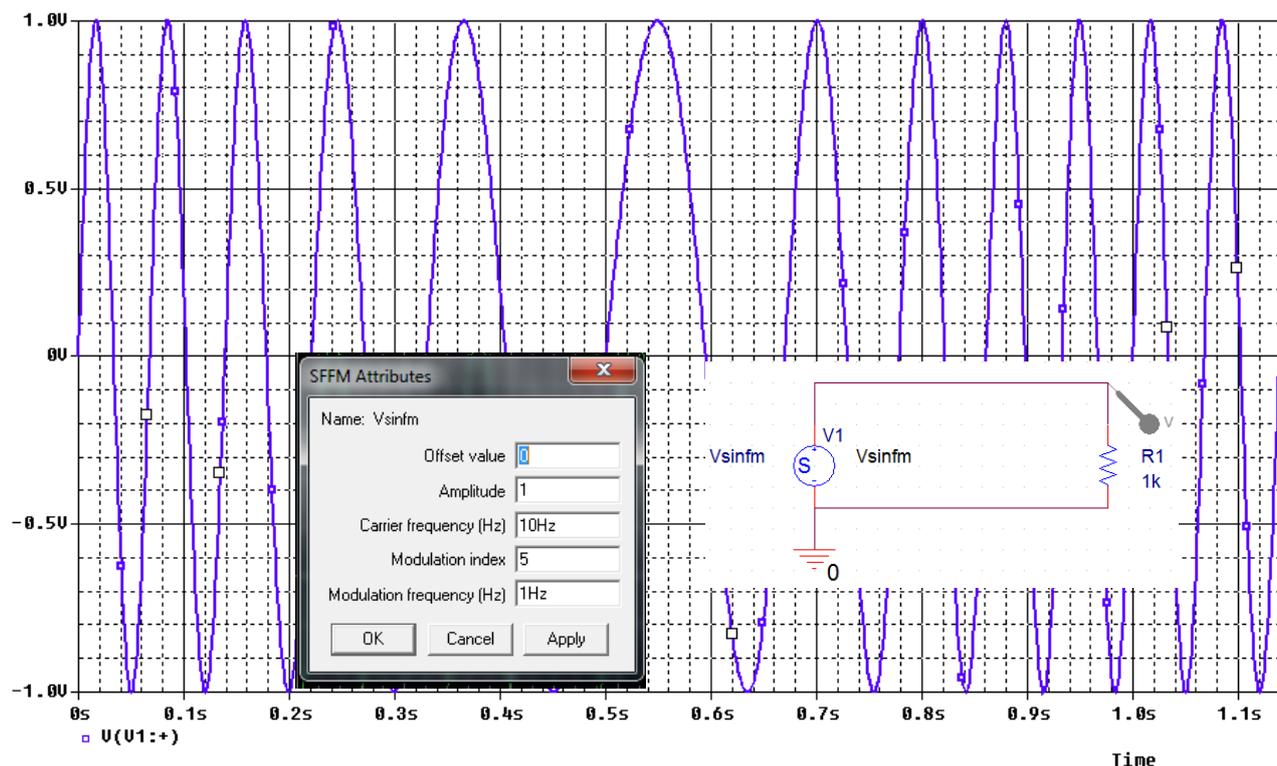


Рис. 7.11. Установка параметров сигнала с частотной модуляцией

Просмотреть все введенные в проект стимулы можно, выбрав в меню окна стимулов Stimulus > Get.

Чтобы удалить ненужные стимулы и очистить экран надо выделить ненужный и выполнить Remove (рис. 7.11).

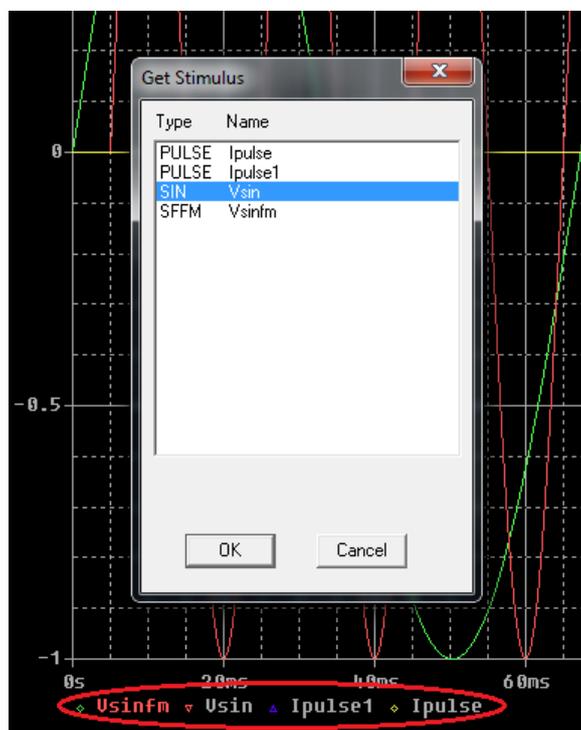


Рис. 7.11. Удаление лишних стимулов

Для очистки экрана от графика можно подвести курсор к названию стимула и нажать Delete.

7.2.6. Кусочно-линейная аппроксимация

Кусочно-линейная (VPWL – voltage piecewise-linear) аппроксимация позволяет сделать волну напряжения или тока произвольной формы. Вы определяете оси времени и напряжения (или тока), а затем используете курсор, чтобы нарисовать форму волны.

Создаем источник Vin1 и выберем новый стимул PWL (рис. 7.12). В окне редактора стимулов открываем Plot > Axis Setting и устанавливаем масштабы отображения графика стимула по времени и напряжению.

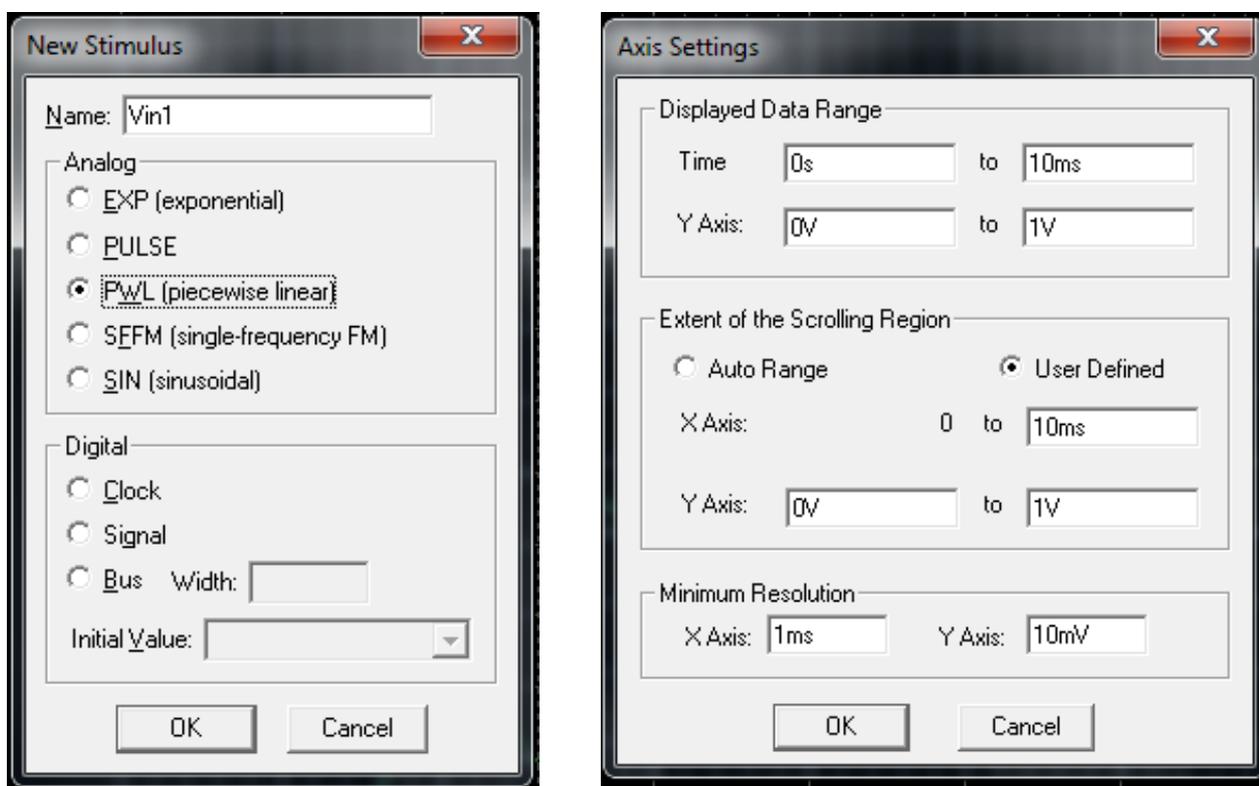


Рис. 7.12. Установка графического ввода стимула

После этого появится курсор-карандаш, которым можно начертить кусочно-линейный график. Далее сохраним стимул и установим профиль моделирования Transient со временем моделирования до 10 мс, шагом 100мкс. В файлы конфигурации добавим стимул pw1.stl как глобальный.

После моделирования получим график стимула (рис. 7.13).

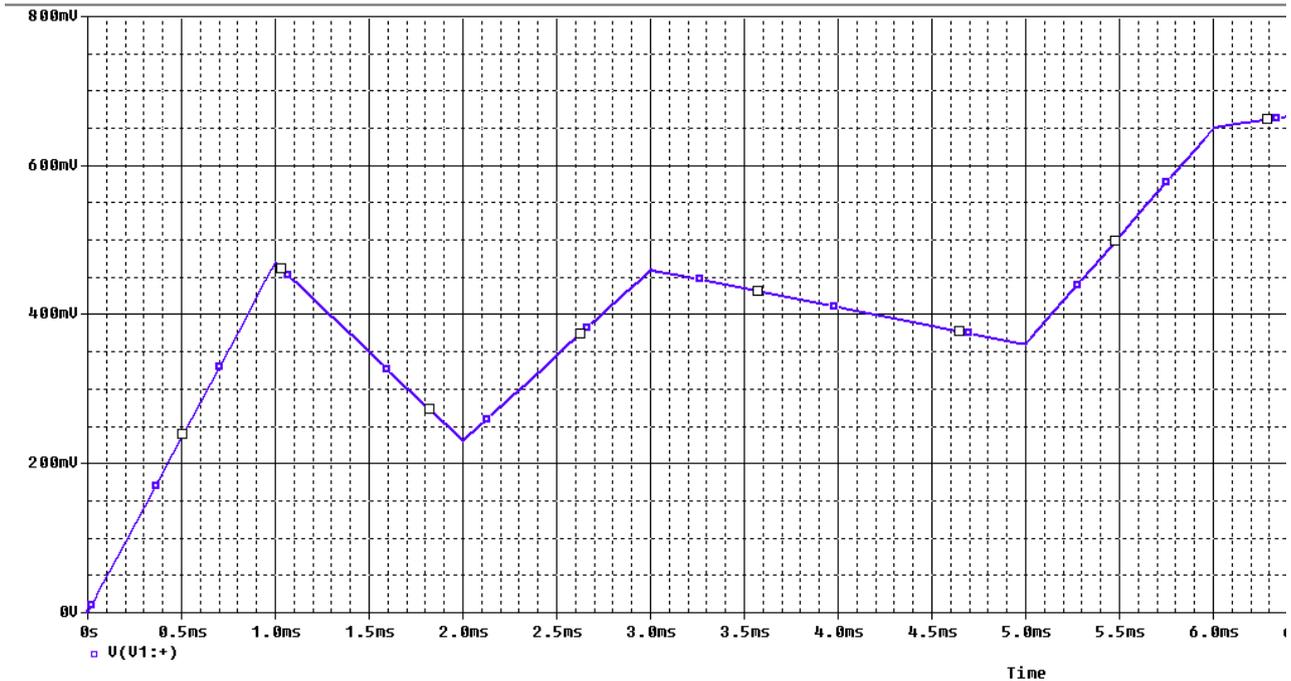


Рис. 7.13. График стимула $rw1$ после моделирования

7.3. Контрольные вопросы

1. Что понимают под названием «стимулы» и какие стимулы можно сформировать в OrCAD ?
2. Как выполняют ввод стимула в схему и как стимулы редактируют ?
3. Расскажите об экспоненциальных стимулах и их редактировании.
4. Как добавить файл стимула в профиль моделирования ?
5. Где отображаются файлы стимулов в менеджере проекта ?
6. Какими параметрами задают импульсные источники pulse ?
7. Какими параметрами задают синусоидальные сигналы ?
8. Какими параметрами задают синусоидальные сигналы с частотной модуляцией ?
9. Как создать кусочно-линейный графический сигнал произвольной формы ?

Глава 8. Анализ переходных процессов

8.1. Краткое теоретическое введение

Установившимся (стационарным) процессом называется начавшийся бесконечно давно процесс, при котором напряжения и токи в цепи остаются постоянными или изменяются по периодическому закону.

Стационарный процесс это математическая абстракция. Включения источников энергии, переключения в схемах нарушают стационарность и приводят к возникновению переходного процесса.

Переходным процессом называется неустановившийся, нестационарный процесс, возникший при переходе из одного режима работы к другому. Всякие изменения и переключения в схеме называют коммутацией. В схеме рис. 8.1 в момент $t=0$ происходит коммутация (в данном случае замыкание ключа). Режим работы цепи изменяется и возникает переходный процесс.

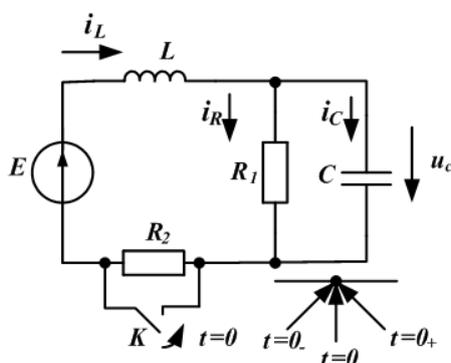


Рис. 8.1. Схема цепи с коммутирующим ключом K

Считается, что коммутация происходит мгновенно в момент времени $t=0$. Момент времени, предшествующий коммутации, обозначен $t=0_-$. Момент времени, следующий сразу после коммутации, обозначен $t=0_+$.

До коммутации в момент $t=0_-$ ток в индуктивности $i_1(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2}$. В

индуктивности накоплена магнитная энергия $W_M(0_-) = \frac{L \cdot i_1^2(0_-)}{2}$.

Энергия не может измениться мгновенно, так как мощность всегда ограничена ($P(t) = \frac{dW}{dt} \neq \infty$). Поэтому в электрических цепях с постоянной индуктивностью действует *первый закон коммутации*.

Первый закон коммутации:

Ток в индуктивности до коммутации равен току в индуктивности в начальный момент после коммутации:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Если при коммутации изменяется индуктивность, действует обобщенный первый закон коммутации для потокосцепления:

$$\Psi(0_-) = \Psi(0_+)$$

До коммутации в момент $t = 0_-$ напряжение на емкости $u_C(0_-) = \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2}$.

На емкости накоплена электрическая энергия $W_{\mathcal{E}}(0_-) = \frac{C \cdot u_C^2(0_-)}{2}$. Электрическая энергия также не может изменяться мгновенно. Поэтому в электрической цепи с постоянной емкостью действует *второй закон коммутации*.

Второй закон коммутации:

Напряжение на емкости до коммутации равно напряжению на емкости в начальный момент после коммутации:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Расчет переходных процессов основан на использовании первого и второго закона коммутации.

Если при коммутации изменяется емкость, действует обобщенный второй закон коммутации для зарядов:

$$q(0_-) = q(0_+).$$

Переходные процессы в линейных электрических цепях описываются линейными дифференциальными уравнениями. Расчет переходных процессов в линейной электрической цепи можно выполнить несколькими методами.

В расчетах переходных процессов используют несколько видов начальных условий:

Независимые начальные условия - это значения токов через индуктивности и напряжений на емкостях, неизменяющиеся при коммутации и определяющие запас энергии в цепи $(i_{L1} \dots i_{Ln}, u_{C1} \dots u_{Cn})$.

Зависимые начальные условия - это значения остальных токов и напряжений, которые могут изменяться при коммутации $(u_{L1}, i_{C1}, u_R, i_R)$.

Докоммутационные НУ – это начальные условия при $t = 0_-$.

Послекоммутационные НУ - это начальные условия при $t = 0_+$.

Нулевые начальные условия – это равные нулю независимые начальные условия.

8.1.1. Классический метод расчета переходных процессов

В классическом методе переходное напряжение или ток ищут как сумму свободной и принужденной составляющей. Принужденную составляющую находят расчетом послекоммутационной цепи в установившемся принужденном режиме, когда после коммутации прошло много времени. Свободную со-

ставляющую ищут как общее решение однородного дифференциального уравнения при нулевом внешнем воздействии в виде:

$$u_{Cсв}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} + \dots$$

где p_1, p_2, \dots - корни характеристического уравнения, A_1, A_2, \dots - неизвестные постоянные интегрирования. Число корней характеристического уравнения и число неизвестных постоянных интегрирования равно порядку цепи, который определяется числом независимых накопительных реактивных элементов.

Для линейных цепей первого порядка (рис. 8.2) характеристическое уравнение имеет один корень и свободная составляющая переходного процесса выражается одной экспоненциальной функцией:

$$u_{Cсв}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t}$$

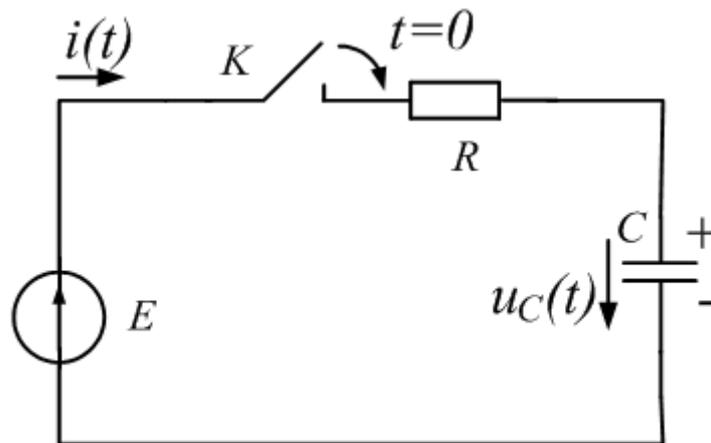


Рис. 8.2. Заряд емкости в цепи первого порядка

Постоянной времени цепи первого порядка называют $\tau = \frac{1}{|p_1|}$.

Полный переходной процесс равен сумме принужденной и свободной составляющей. Для схемы (рис. 8.2) при нулевых начальных условиях получим:

$$u_C(t) = u_{Cпр}(t) + u_{Cсв}(t) = E - E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

8.1.2. Переходные процессы в цепях второго порядка

На рис. 8.3 показана схема цепи второго порядка, содержащей два накопительных элемента: индуктивность и емкость. До коммутации к цепи подключен источник постоянного напряжения $e(t) = E = const$. Емкость заряжена до напряжения $u_C(0_-) = E$. Ток в цепи равен нулю. В момент коммутации ключ K переключается на перемычку и в RLC -цепи происходит разряд емкости. Требуется рассчитать изменение напряжения на емкости $u_C(t)$.

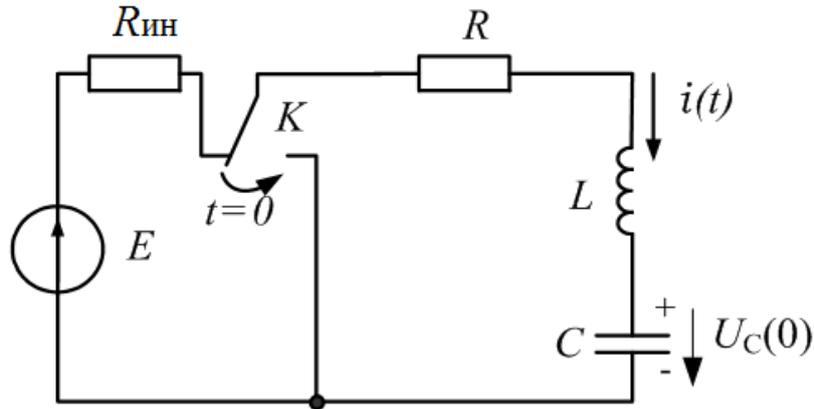


Рис. 8.3. Схема цепи второго порядка

Р е ш е н и е

1. Расчет режима до коммутации:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+) = E;$$

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0.$$

2. Расчет принужденного режима.

В схеме после коммутации отсутствуют источники энергии. Вся накопленная в емкости до коммутации энергия выделится в резисторе. Поэтому:

$$u_{Cnp}(t) = 0, \quad i_{Lnp}(t) = 0.$$

3. Дифференциальное уравнение в послекоммутационной схеме ($t \geq 0$).

По второму закону Кирхгофа:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_C = 0.$$

Подставим выражение для тока:

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

Получим дифференциальное уравнение для напряжения на емкости:

$$RC \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = 0,$$

или:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0.$$

4. Характеристическое уравнение:

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0$$

Обозначим $\delta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - частота незатухающих колебаний.

Получим:

$$p^2 + 2\delta p + \omega_0 = 0$$

Корни характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

Возможны 3 случая переходного процесса в цепи второго порядка:

1-й случай – *апериодический переходной процесс*.

В этом случае корни p_1 и p_2 – вещественные, отрицательные и разные.

Для этого должно быть: $\delta^2 - \omega_0^2 > 0$, $\delta > \omega_0$, $\frac{R}{2L} > \omega_0$,

$$R > 2\omega_0 L = 2\rho = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

В RLC -цепи величину $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ называют характеристическим сопротивлением.

В этом случае напряжение на емкости ищем в следующем виде:

$$u_{C_{св}}(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}$$

Переходной процесс описывается двумя экспоненциальными функциями с действительными отрицательными и разными показателями.

Такой *переходной процесс не совершает периодических колебаний и называется апериодическим*.

2-й случай – *критический переходной процесс*.

В этом случае корни $p_1 = p_2 = -\delta$ - вещественные, отрицательные и равные.

$$\text{При этом: } \delta = \frac{R}{2L} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\rho$$

Решение дифференциального уравнения ищем в виде:

$$u_{C_{св}}(t) = (B_1 + B_2 t) e^{-\delta t}$$

С учетом начальных условий получим полное решение:

$$u_{C_{св}}(t) = E(1 + \delta t) e^{-\delta t} = u_C(t)$$

3-й случай – колебательный переходной процесс

Колебательный переходной процесс возникает в RLC - цепи с малыми потерями. Для этого должны выполняться условия:

$$\delta < \omega_0; \frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}}; R < 2\rho$$

В формуле для корней: $p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ подкоренное выражение $\delta^2 - \omega_0^2 < 0$ будет отрицательным. Мы получим два комплексно-сопряженных корня:

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = -\delta \pm j\omega_c,$$

где $\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - угловая частота свободных колебаний.

Решение для свободного процесса можно найти двумя способами:

1-й способ.

Ищем решение в виде:

$$u_{C_{св}}(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} = B_1 e^{(-\delta + j\omega_c)t} + B_2 e^{(-\delta - j\omega_c)t}$$

С учетом начальных условий проводим расчет B_1, B_2 с комплексными числами и находим решение $u_{C_{св}}(t)$.

2-й способ.

Ищем решение в виде:

$$u_{C_{св}}(t) = B e^{-\delta t} \sin(\omega_c t + \psi)$$

Здесь $B; \psi$ – неизвестные постоянные интегрирования, которые требуется найти.

В итоге полный колебательный переходной процесс получили в виде:

$$u_C(t) = E \frac{\omega_0}{\omega_c} e^{-\delta t} \sin(\omega_c t + \psi)$$

где: $\psi = \arctg \frac{\omega_c}{\delta}, .$

$\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega_c^2}$ - резонансная частота незатухающих колебаний;

$\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - частота свободных колебаний.

8.2. Моделирование переходных процессов

Численный расчет переходных процессов в OrCAD происходит следующим образом. Переходный анализ вычисляет реакцию цепи в течение определённого периода времени, заданного пользователем. Точность анализа переходных процессов зависит от размера временных шагов, которые вместе составляют полное время моделирования и известно как Run to time или Stop time. Однако, сначала выполняется анализ режима постоянного тока для установления начальных условий по постоянному току для цепи в момент времени $t=0$ сек. Затем время увеличивается на заранее определённый шаг по времени, при котором узловые напряжения и токи рассчитываются на основе начальных вычисленных значений в момент $t=0$ с.

Для каждого временного шага узловые напряжения и токи вычисляются и сравниваются с предыдущим по времени шагом решения на постоянном токе. Только тогда, когда разница между двумя решениями постоянного тока находится в указанном допуске (точности), анализ будет переходить к следующему внутреннему шагу по времени. Шаг по времени динамически корректируется до тех пор, пока не найдено решение в пределах допуска. Например, для медленно меняющихся сигналов, шаг по времени будет увеличиваться без значительного снижения точности расчёта, в то время как для быстрого изменения сигналов, как и в случае импульсного сигнала с быстрым ростом переднего фронта, шаг по времени будет уменьшаться, чтобы обеспечить требуемую точность. Значение максимального внутреннего шага по времени может быть задано пользователем.

Если решение не найдено, то анализ не сходится к решению и это будет сообщено программой.

Если вы добавляете начальное условие к цепи, переходный анализ будет использовать начальное условие в качестве отправной точки режима постоянного тока.

8.3. Профиль моделирования переходных процессов

1. Создадим новый проект PR-15 для моделирования цепи второго порядка по схеме рис. 8.3. Ключ следует выбрать из PSpice Component, перемещаясь по пути, показанному на рис. 8.4. В свойствах ключа установим время засыкания TCLOSE=1m, переходное время (время переключения) TTRAN = 1u, сопротивление замкнутого RCLOSED =0.01, сопротивление разомкнутого ключа ROPEN=1Meg.

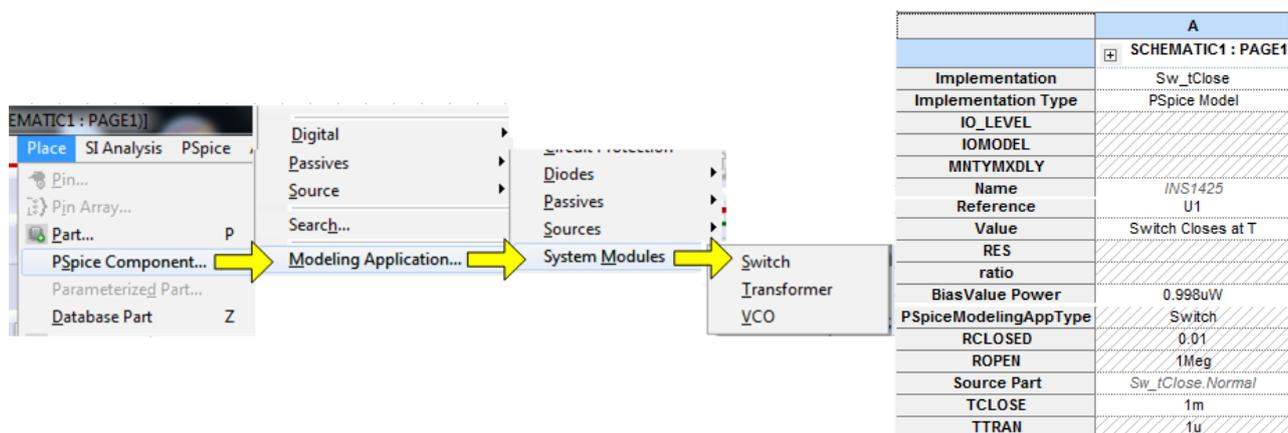


Рис. 8.4. Установка параметров ключа

На рис. 8.5 показана схема модели.

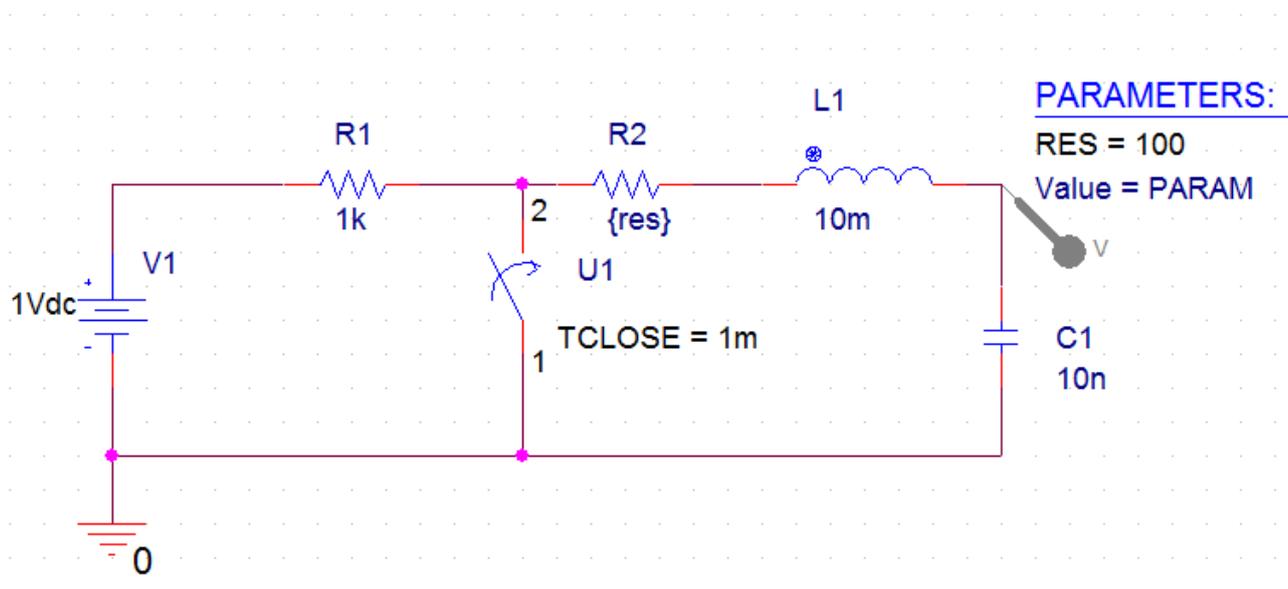


Рис. 8.5. Модель цепи второго порядка

В этой схеме в момент $t = 1$ мс замыкается ключ U1 и происходит разряд емкости в RLC – цепи. Характеристическое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10^{-2}}{10^{-8}}} = 1 \text{ кОм}. \text{ Сделаем резистор R2 переменным параметром } \{RES\}.$$

В профиле моделирования установим тип анализа Transient, время моделирования 3 мс с шагом 10 мкс (рис. 8.6).

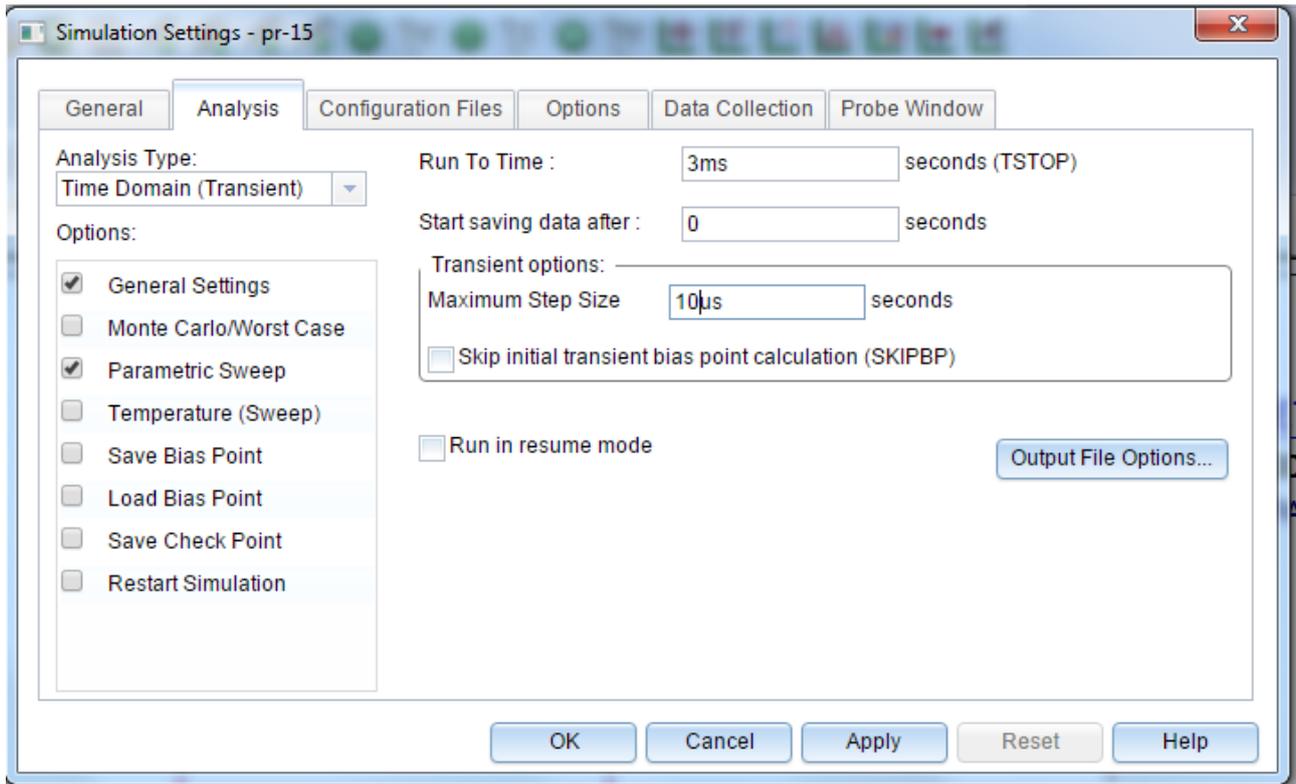


Рис. 8.6. Установка профиля моделирования Transient

Start saving data after: - определяет время, по истечении которого собираются данные для построения графика в Probe для того, чтобы уменьшить размер файла данных.

Skip the initial transient bias point calculation: - будет отключить расчет начальной точки смещения для анализа переходных процессов.

Затем в опциях установим параметрическую развертку для глобального параметра RES и зададим для него значения 1кОм, 2кОм и 5кОм (рис. 8.7)

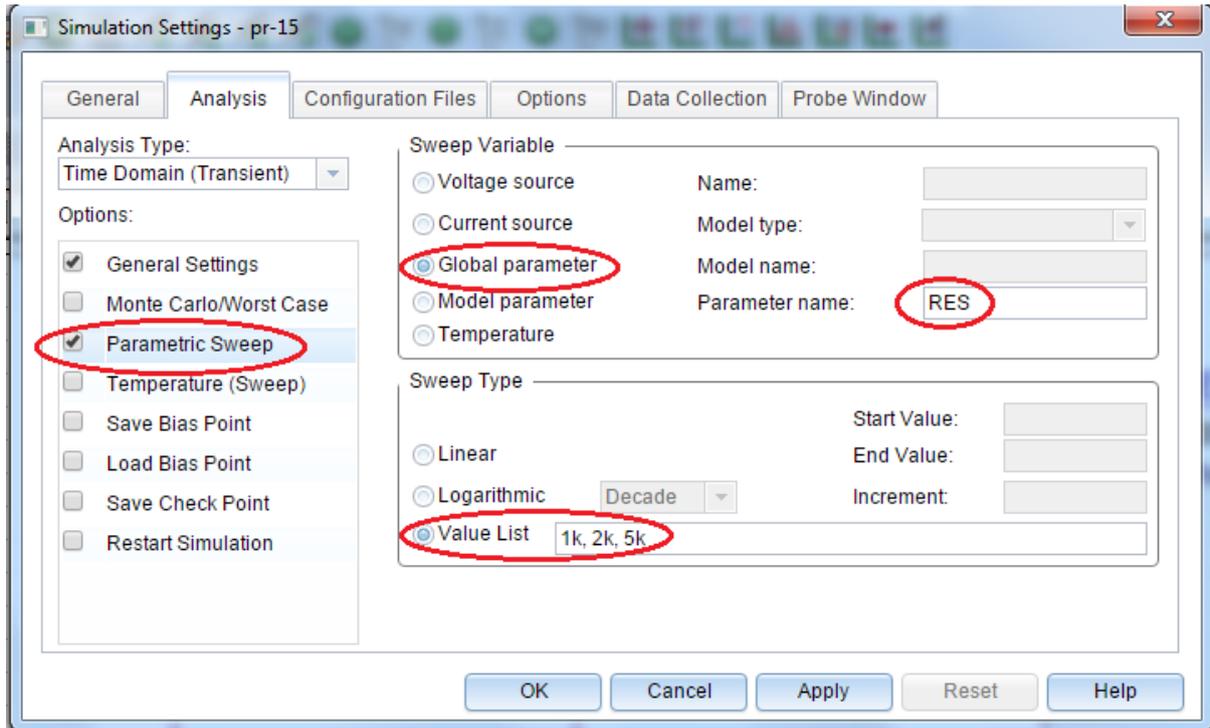


Рис. 8.7. Установка параметрической развертки для резистора

Графики аperiodического, критического и колебательного переходных процессов, полученные моделированием, показаны на рис. 8.8.

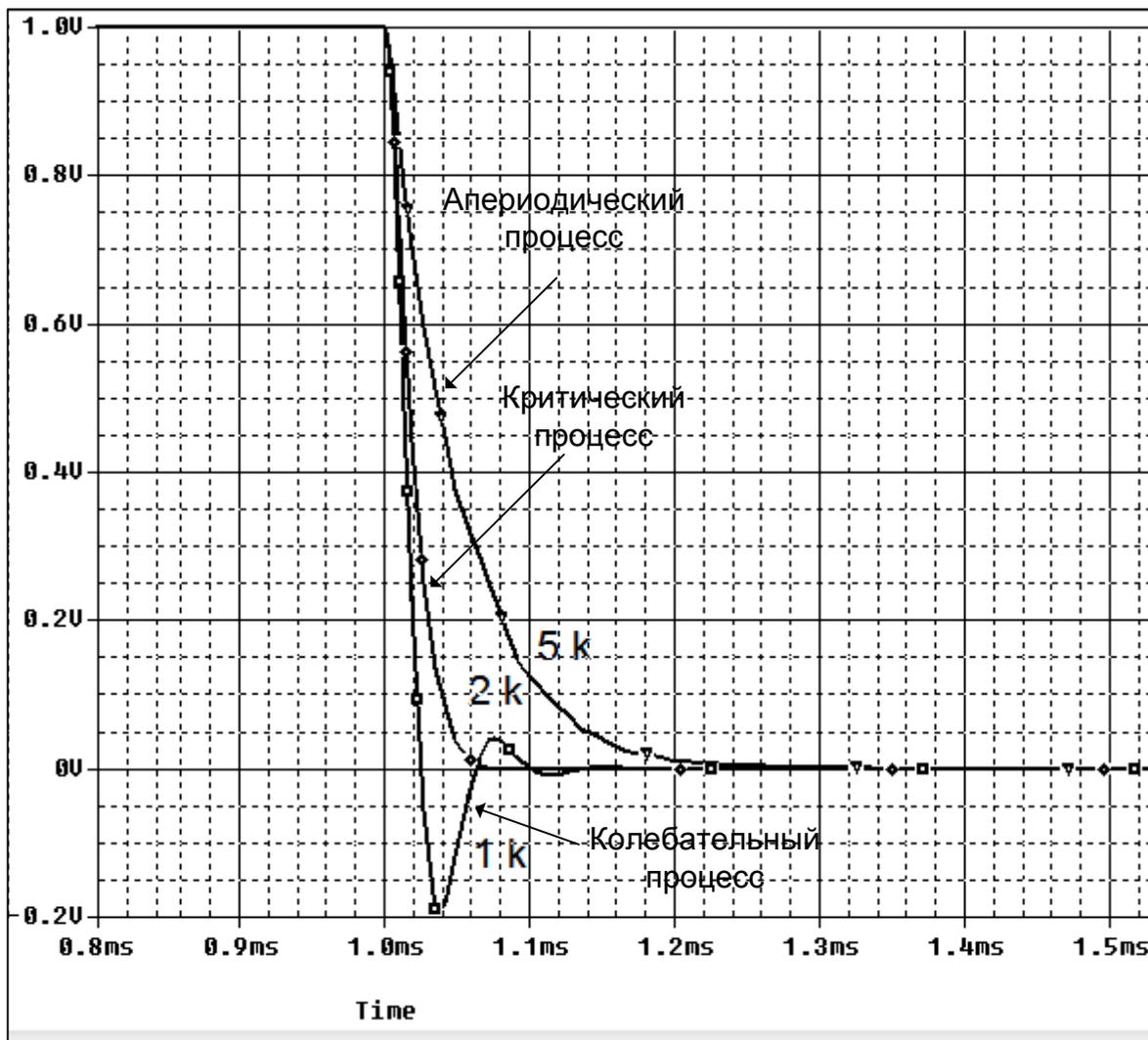


Рис. 8.8. Графики переходных процессов в RLC - цепи

8.4. Планирование

Планирование позволяет динамически изменять настройки моделирования для анализа переходного процесса. Например, вы можете использовать меньший размер шага в течение периодов, которые требуют большей точности, и снизить точность для периодов с меньшей активностью. Планирование может быть также применено к параметрам настройки моделирования среды исполнения RELTOL, ABSTOL, VNTOL, GMIN и ITL, которые могут быть найдены в PSpice> Simulation Profile> Options.

Вы можете заменить значение параметров командой планирования, которая определяется по формуле:

```
{SCHEDULE(t1,v1,t2,v2...tn,vn)}
```

Заметьте, что t1 всегда начинается с нуля.

Например, моделирование может быть более быстрым, если уменьшить относительную точность моделирования RELTOL от 0,001% до 0,1% в периоды

меньшей активности, указывая изменение в точности каждую миллисекунду. Запишем формат для предыдущего примера так:

```
{schedule(0,0.1, 1m, 0.0001, 2m,0.01, 3m,0.1)}.
```

Результаты моделирования на интервале 1 мс – 2 мс, будут иметь большую точность, а время моделирования будет сэкономлено на неактивных участках (рис. 8.9).

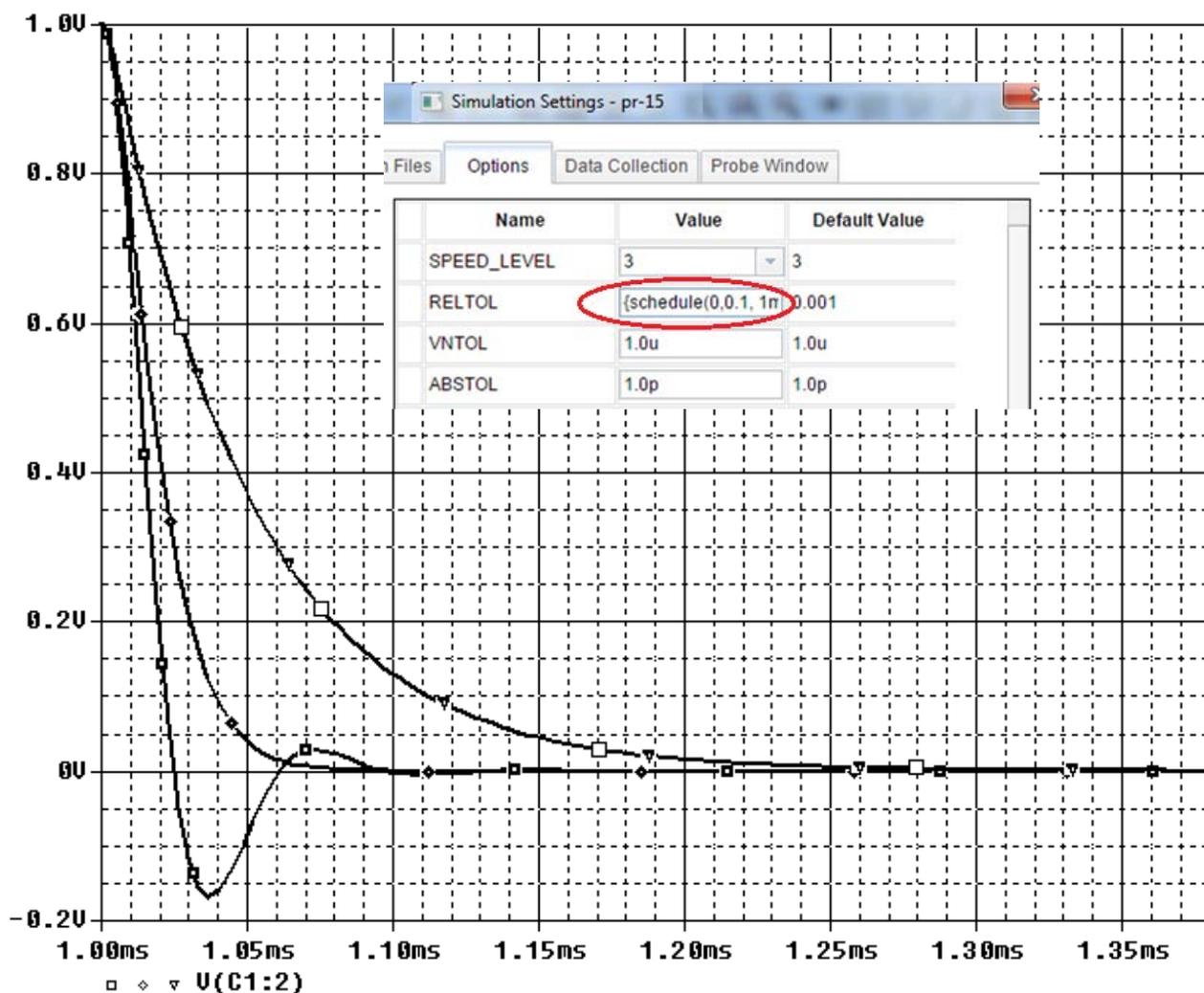


Рис. 8.9. Моделирование с планированием параметров

8.5. Контрольные точки

Контрольные точки были введены в версии 16.2, чтобы позволить Вам эффективно пометить и сохранить состояние переходного моделирования в контрольной точке и перезапустить моделирование переходного процесса из определённых контрольных точек. Это позволяет запускать симуляции на выбранных периодах времени. Это полезно, если у вас есть проблемы сходимости, и при этом вы можете запустить моделирование с определённой контрольной точки, отмеченной во времени до появления ошибки моделирования, вместо того, чтобы запустить все моделирования с самого начала.

Контрольные точки доступны только для моделирования переходного процесса и выбираются в профиле моделирования в Analysis> Options>Save Check Points и Restart Simulation (рис. 8.10).

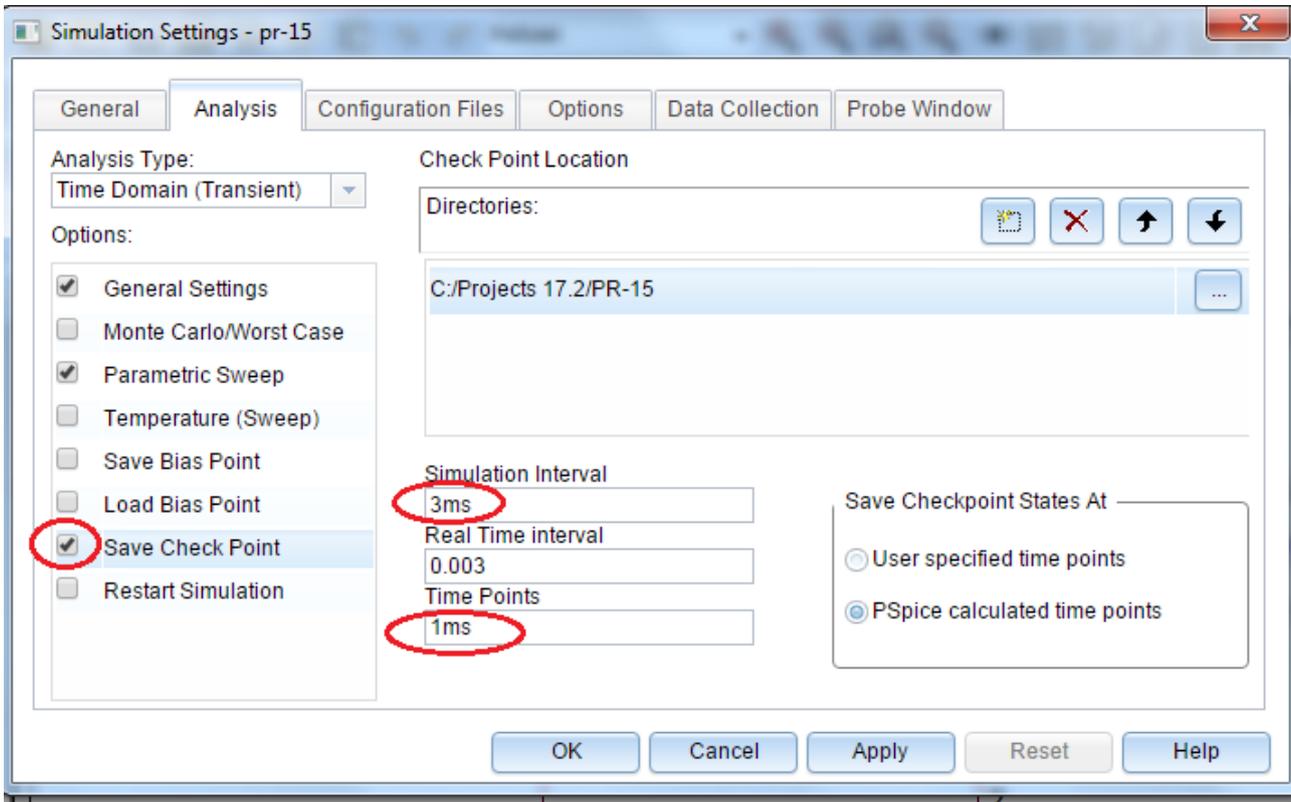


Рис. 8.10. Сохранение контрольных точек

Контрольные точки определяются заданием интервала времени модулирования. Интервал времени моделирования измеряется в секундах и реальный интервал времени измеряется в минутах (по умолчанию) или часах. Временные точки являются конкретными моментами, когда были созданы контрольные точки. Сохраняются контрольные точки в папке проекта.

Перед тем, как перезапустить моделирование из сохранённой контрольной точки (рис. 8.11), вы можете изменить значение компонента, значения параметров, настройку вариантов моделирования, перезагрузку контрольных точек и параметры сохранения данных.

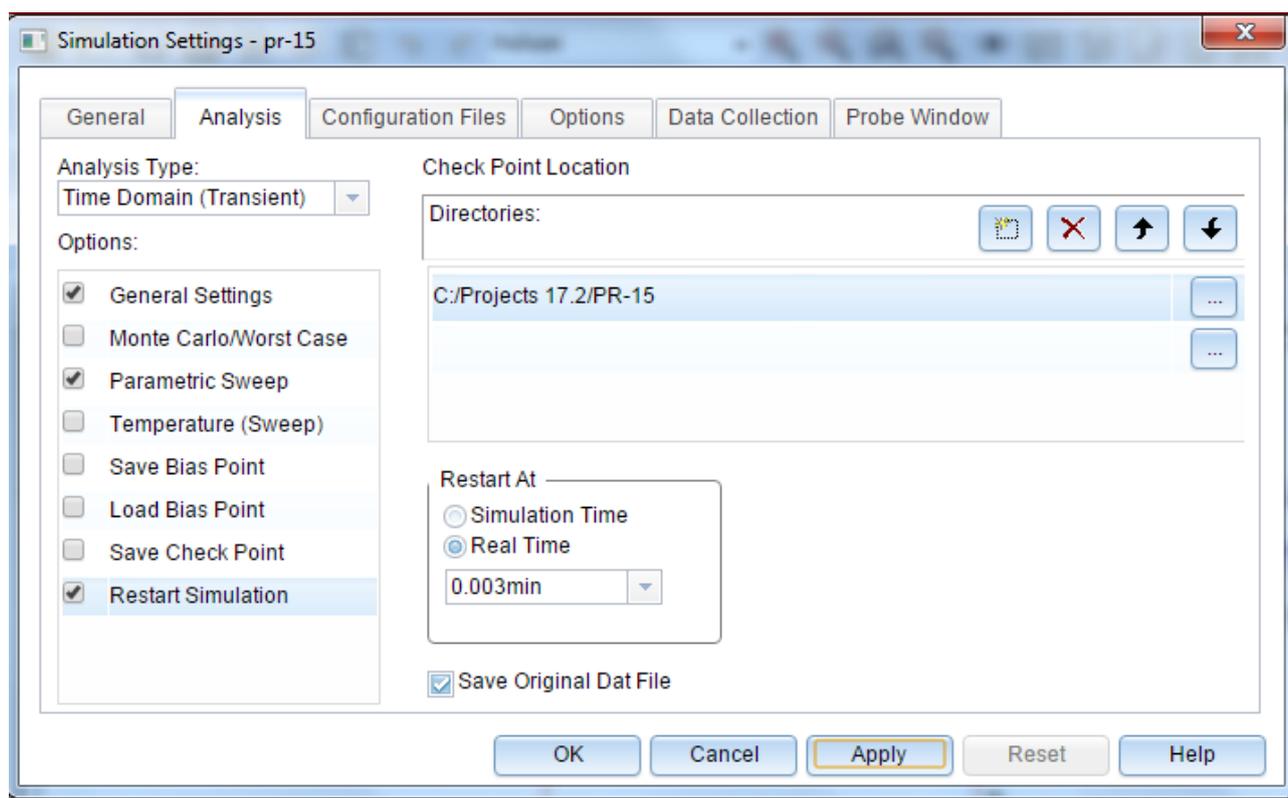


Рис. 8.11. Перезапуск моделирования из контрольной точки

Упражнение 8.1.

Это упражнение продемонстрирует эффект, как максимальное время шага влияет на разрешение моделирования и покажет использование команды планирования.

В предыдущем проекте PR-16 создадим новую страницу page 2 и соберем схему (рис. 8.12) с синусоидальным источником напряжения из библиотеки SOURCE.

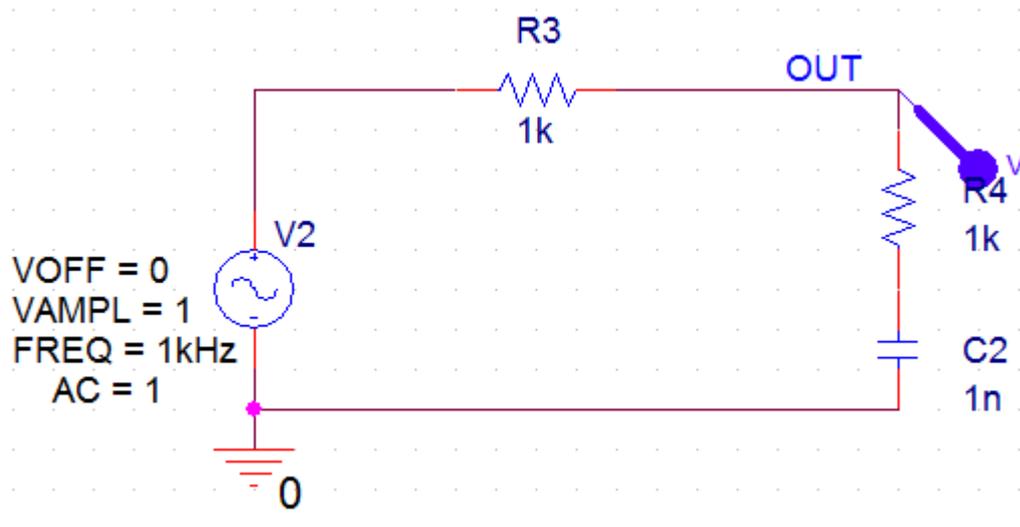


Рис. 8.12. Схема с синусоидальным источником напряжения

1. Установим значения параметров источника, используя Edit Properties.
2. Создаём профиль моделирования PR-16-sin с типом анализа Transient и временем моделирования 10 мс. Устанавливаем маркёр напряжения, запускаем моделирование. Увидим результирующий сигнал (рис. 8.13.а) с низким разрешением.

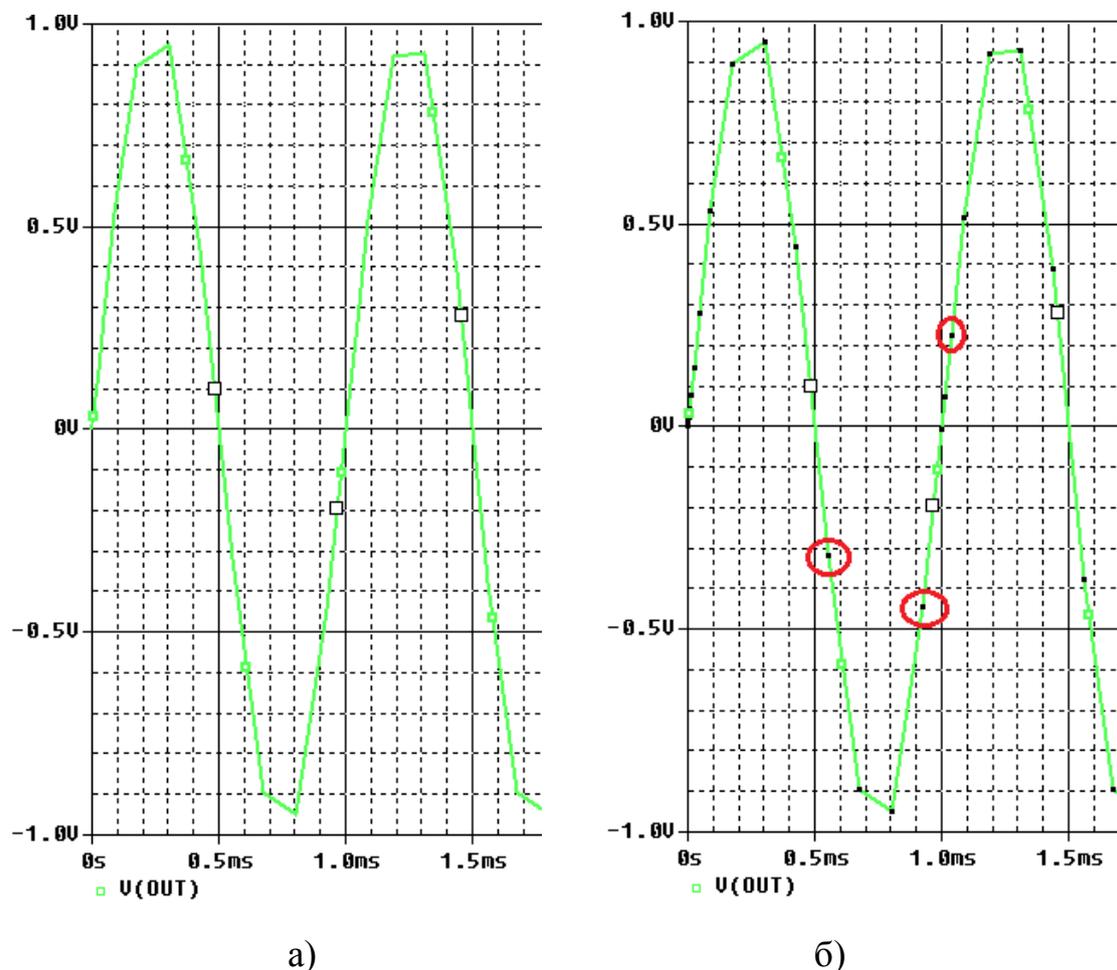


Рис. 8.13. Сигнал с низким разрешением

3. В Probe выбираем Tools>Options и отмечаем Mark Data Points или пользуемся иконкой . На графике появляется метки контрольных точек (рис. 8.13.б).

4. В профиле моделирования, настроим команду планирования для уменьшения времени шага в заданные моменты времени. Вы можете ввести команду планирования в окно Maximum step size непосредственно. Но из-за малого поля этого окна, рекомендуется сначала ввести команду планирования в текстовый редактор, например, Блокнот, затем скопировать и вставить в окно следующую команду (без пробелов в строке):

```
{schedule(0,0,2m,0.05m,4m,0.01m,6m,0.005m,8m,0.001m)}.
```

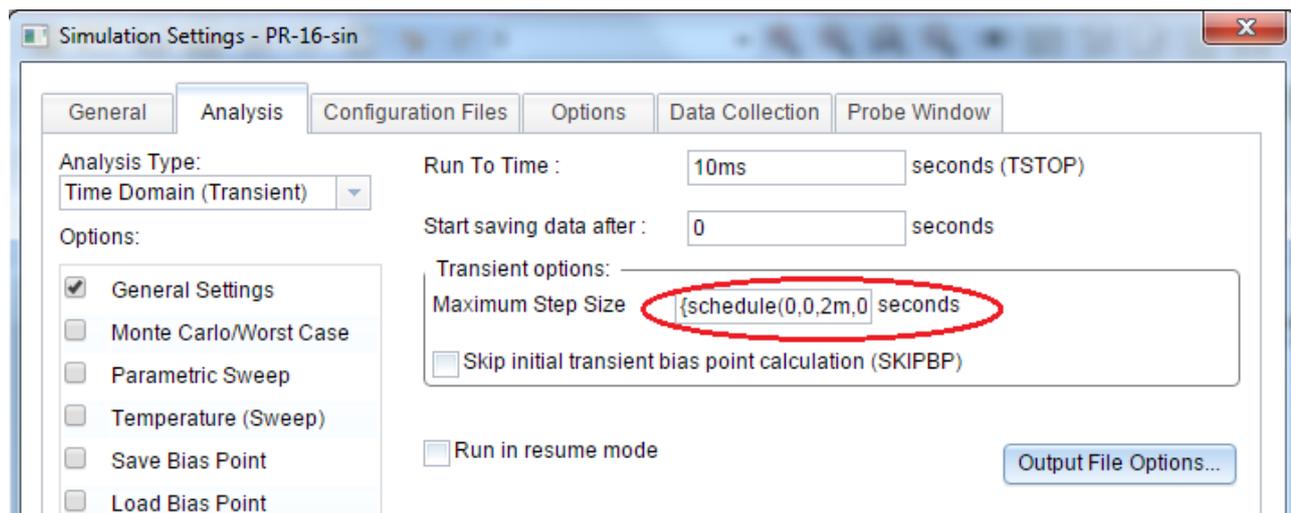


Рис. 8.14. Установка планирования шага

5. Выполняем Run и видим уменьшение размера максимального шага моделирования (рис. 8.15)

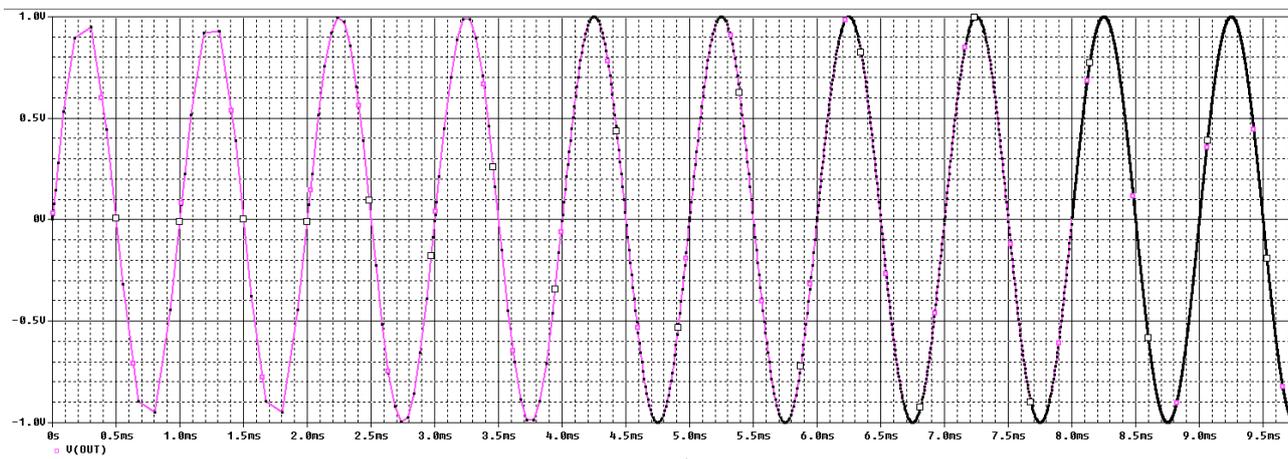


Рис. 8.15. Моделирование с уменьшением шага

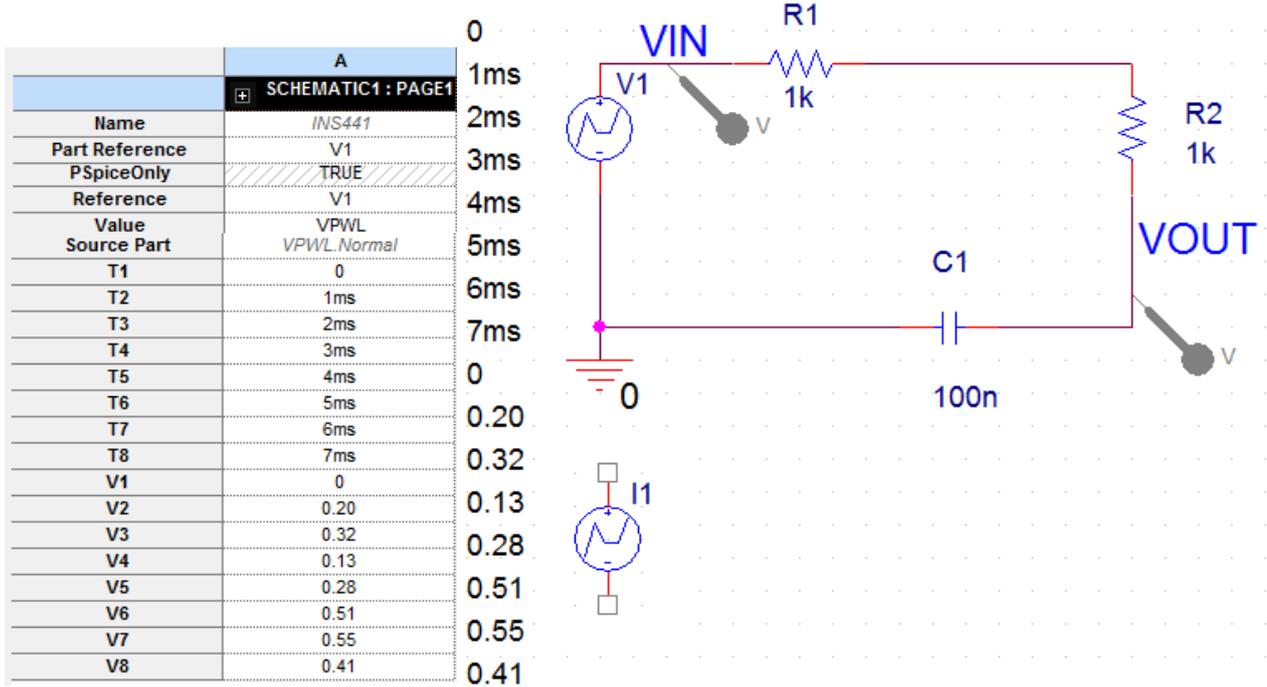
8.6. Формирования временных зависимостей стимула напряжения с использованием текстовых файлов

8.6.1. Кусочно-линейные стимулы с однократным повторением

Волновые формы входного напряжения задают с помощью пары координат время - напряжение, которые могут быть введены в редакторе свойств или считываются из внешнего текстового файла.

Рис. 8.16 показывает VPWL источники напряжения и тока IPWL и соответствующие зависимости времени и напряжения, которые можно записать в редакторе свойств. По умолчанию восемь пар значений время - напряжение отображаются в редакторе свойств для VPWL источников, но, как показано на рис. 8.16, может быть добавлено больше пар значений. Более эффективно и проще определить большое количество пар время - напряжение в текстовом файле.

На рис. 8.17 показаны результаты моделирования.



8.16. Ввод численных значений в стимул напряжения VPWL

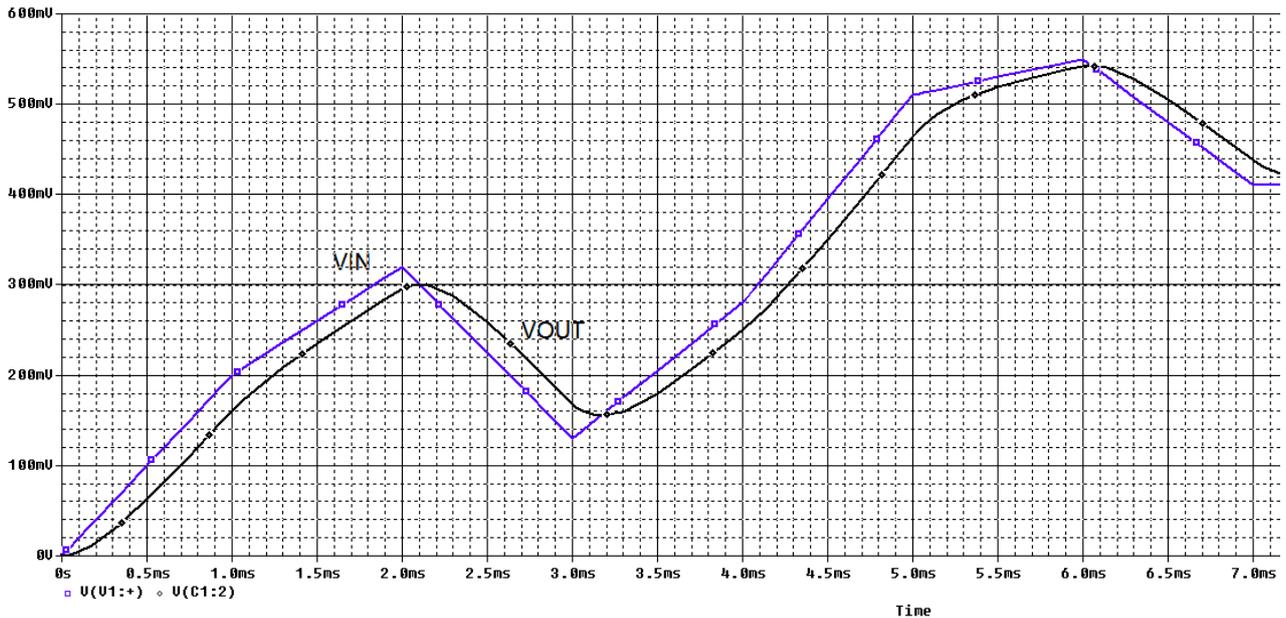


Рис. 8.17. Результаты моделирования со стимулом VPWL

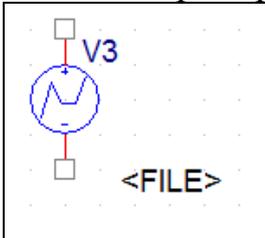
8.6.2. Текстовые стимулы с повторением

В библиотеке SOURCE существуют другие VPWL и IPWL компоненты, которые позволяют вам сделать VPWL периодическим для ряда циклов или повторять всегда неограниченно долго. Эти компоненты определяются как:

```
VPWL_F_RE_FOREVER
VPWL_F_RE_N_TIMES
VPWL_RE_FOREVER
```

VPWL_RE_N_TIMES
 IPWL_F_RE_FOREVER
 IPWL_F_RE_N_TIMES
 IPWL_RE_FOREVER
 IPWL_RE_N_TIMES

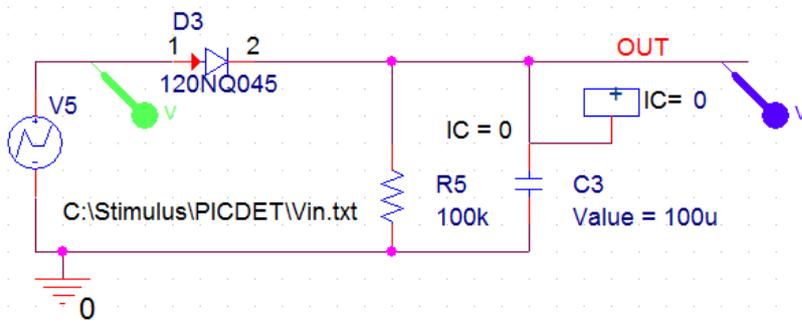
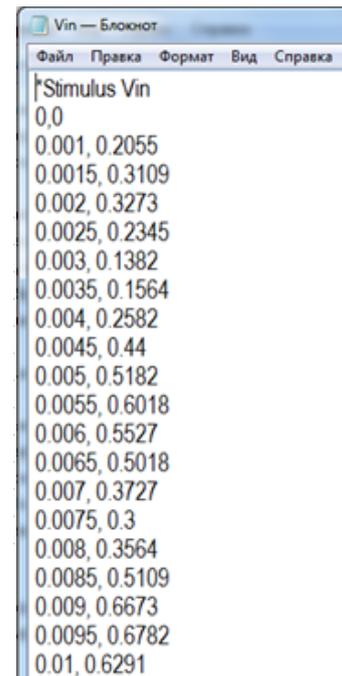
Например:

	<p>VPWL_F_RE_FOREVER - кусочно-линейный, повторяющийся бесконечно</p> <p>VPWL_F_RE_N_TIMES кусочно-линейный, повторяющийся n раз</p>
---	--

Форма сигнала задана файлом, который должен быть указан на схеме и сохранен в известном месте.

1. В проекте PR-16 на новой странице создадим схему пикового детектора (рис. 8.20). Чтобы установить начальное условие (IC) на конденсаторе C3, подключаем компонент IC=0 из библиотеки SPECIAL. Это гарантирует, что в момент $t=0$, напряжение на конденсаторе равно 0 В (IC =0). Эту библиотеку также добавляем в проект.

В качестве альтернативы, вы можете дважды щёлкнуть на конденсаторе C3, и в Редакторе свойств ввести значение 0 для значения свойства IC. Это гарантирует, что в момент времени $t=0$, то напряжение на конденсаторе равно 0В. Если вы измените конденсатор, то вы должны помнить, что надо снова установить начальное состояние, так чтобы компонент IC всегда был виден на схеме.

Time (s)	Voltage (V)
0,0	0,0
0,001	0,2055
0,0015	0,3109
0,002	0,3273
0,0025	0,2345
0,003	0,1382
0,0035	0,1564
0,004	0,2582
0,0045	0,44
0,005	0,5182
0,0055	0,6018
0,006	0,5527
0,0065	0,5018
0,007	0,3727
0,0075	0,3
0,008	0,3564
0,0085	0,5109
0,009	0,6673
0,0095	0,6782
0,01	0,6291

Рис. 8.20. Модель пикового детектора

Рис. 8.21. Файл стимула

2. В Блокноте набираем данные о форме сигнала и комментарий Stimulus Vin со знаком * (Рис. 8.21). Сохраняем файл в C:\Stimulus\PICDET\Vin.txt и вводим этот путь в схему модели источника напряжения стимула.

3. Устанавливаем маркеры, создаем новый профиль моделирования PICDET в режиме Transient на время 50 мс с шагом 100 мкс.

Проводим моделирование и получаем графики входного и выходного напряжения (рис. 8.22)

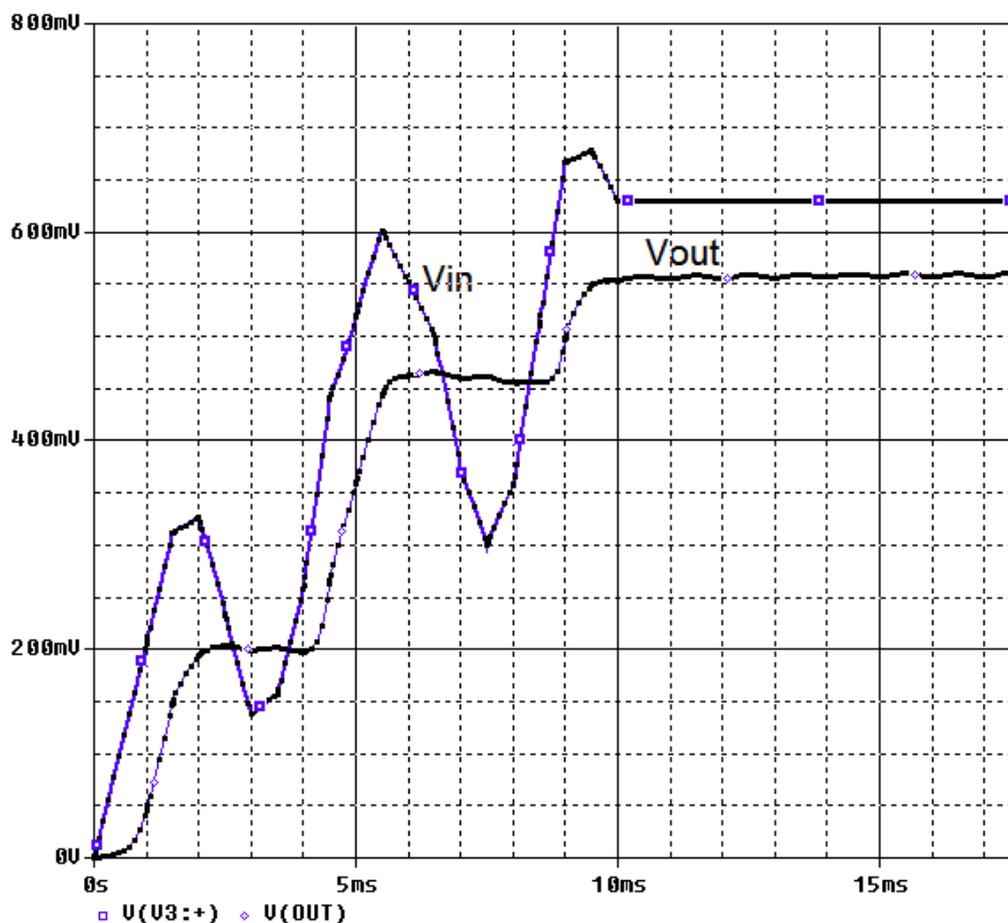


Рис. 8.22. Графики входного и выходного напряжения

4. Удалите источник VPWL_FILE и замените его на VPWL_F_RE_FOREVER из исходной библиотеки. Двойным щелчком по <FILE> введите адрес файла стимула C:\Stimulus\PICDET\Vin.txt.

6. Выполните моделирование с тем же профилем. Вы должны увидеть результат, показанный на рис. 8.23, где Vin теперь периодическая функция (повторяется вечно).

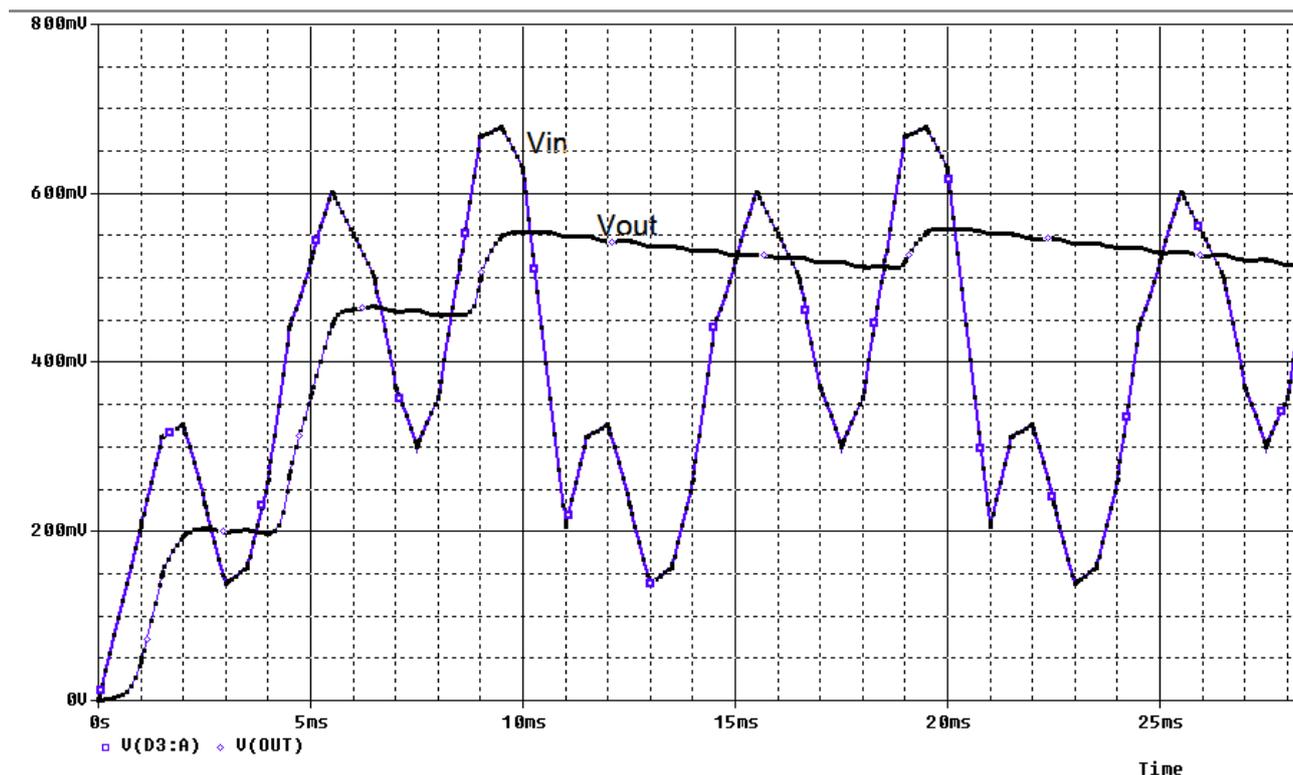


Рис. 8.23. Периодическое повторение стимула

7. Исследуем источник VPWL_F_RE_N_TIMES. Этот сигнал из библиотеки Source может повторяться N раз. В схеме указываем тот же путь к текстовому файлу. В свойствах источника устанавливаем параметр REPEAT_VALUE=3 и отображаем это на схеме. После моделирования получим графики (рис. 8.24).

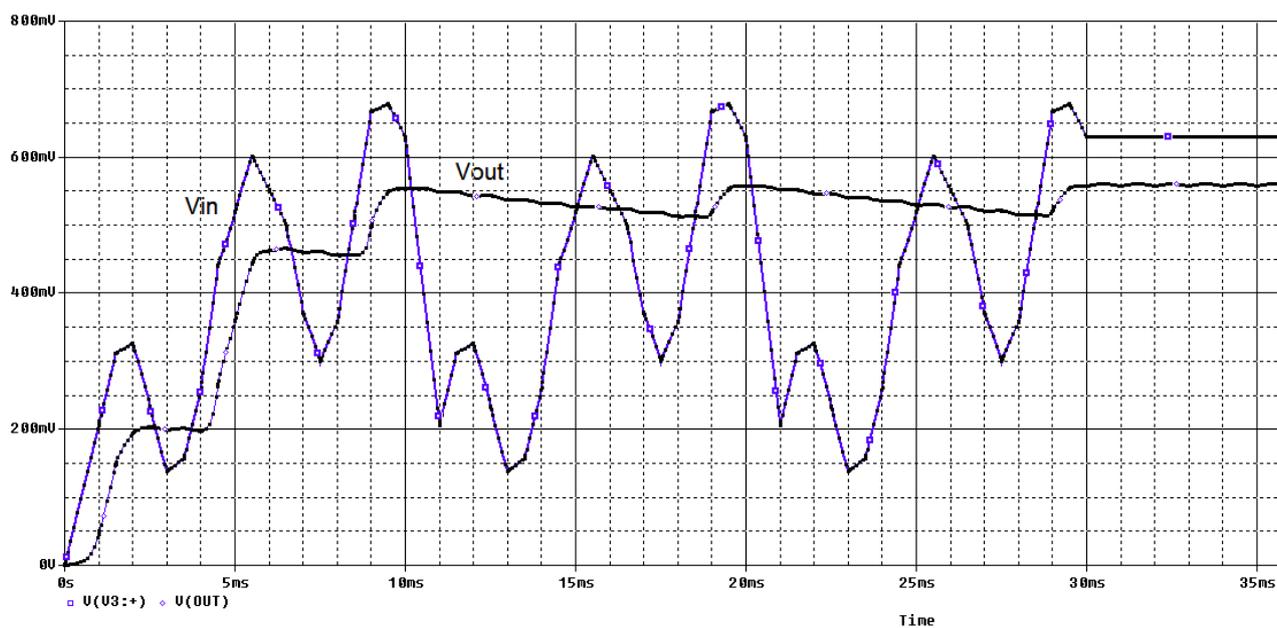


Рис. 8.24. Трехкратное повторение стимула

8.7. Контрольные вопросы

1. Расскажите о понятиях установившегося и переходного процесса.
2. Расскажите о законах коммутации и основных видах начальных условий.
3. В чем сущность классического метода расчета переходных процессов ?
4. Какие случаи переходного процесса бывают в цепи второго порядка ?
5. Как выполняют установку параметров ключа при моделировании переходных процессов ?
6. Как и для чего используют планирование при анализе переходных процессов ?
7. Для чего применяют контрольные точки в анализе переходных процессов ?
8. Как используют текстовые файлы для формирования кусочно-линейных стимулов ?
9. Назовите различные варианты стимулов с повторением и расскажите как их использовать.

Глава 9. Проблемы сходимости и сообщения об ошибках

PSpice использует итерационный метод Ньютона- Рафсона для расчета узловых напряжений и токов для нелинейных уравнений цепи. Алгоритм начинает работать с начального "угадывания" и выполняет итерационный процесс до тех пор, пока напряжения и токи сходятся к согласованному решению.

Шаг по времени динамически регулируется до получения решения в пределах допуска по точности.

Однако, если решение не может быть найдено, PSpice сообщит, что моделирование не удалось из-за проблемы сходимости. Есть также случаи, когда шаг по времени становится слишком мал для продолжения итерационного процесса.

Анализ точки смещения является отправной точкой для анализа переходных процессов и развертки постоянного тока.

Если возникнет проблема сходимости, то моделирование остановится и PSpice откроет окно PSpice Runtime Settings –Настройки времени выполнения (рис. 9.1). После этого вы можете изменить параметры моделирования и возобновить моделирование.

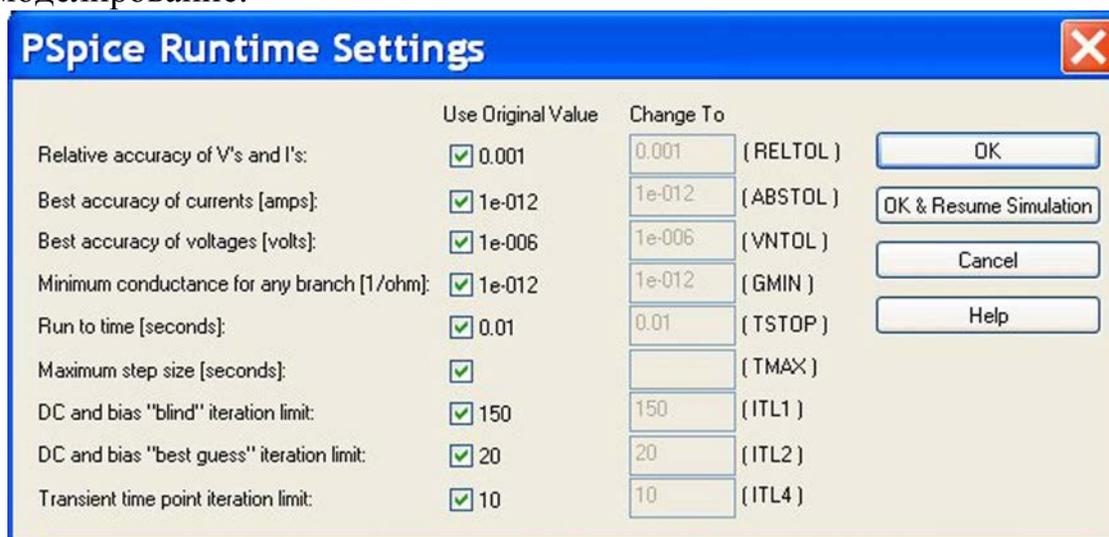


Рис. 9.1. Настройки времени выполнения

Параметры моделирования могут быть доступны также через профиль моделирования и выбора на вкладке «Options» (рис. 9.2). Напомним, что ITL – это предельное количество итераций для разных режимов моделирования.

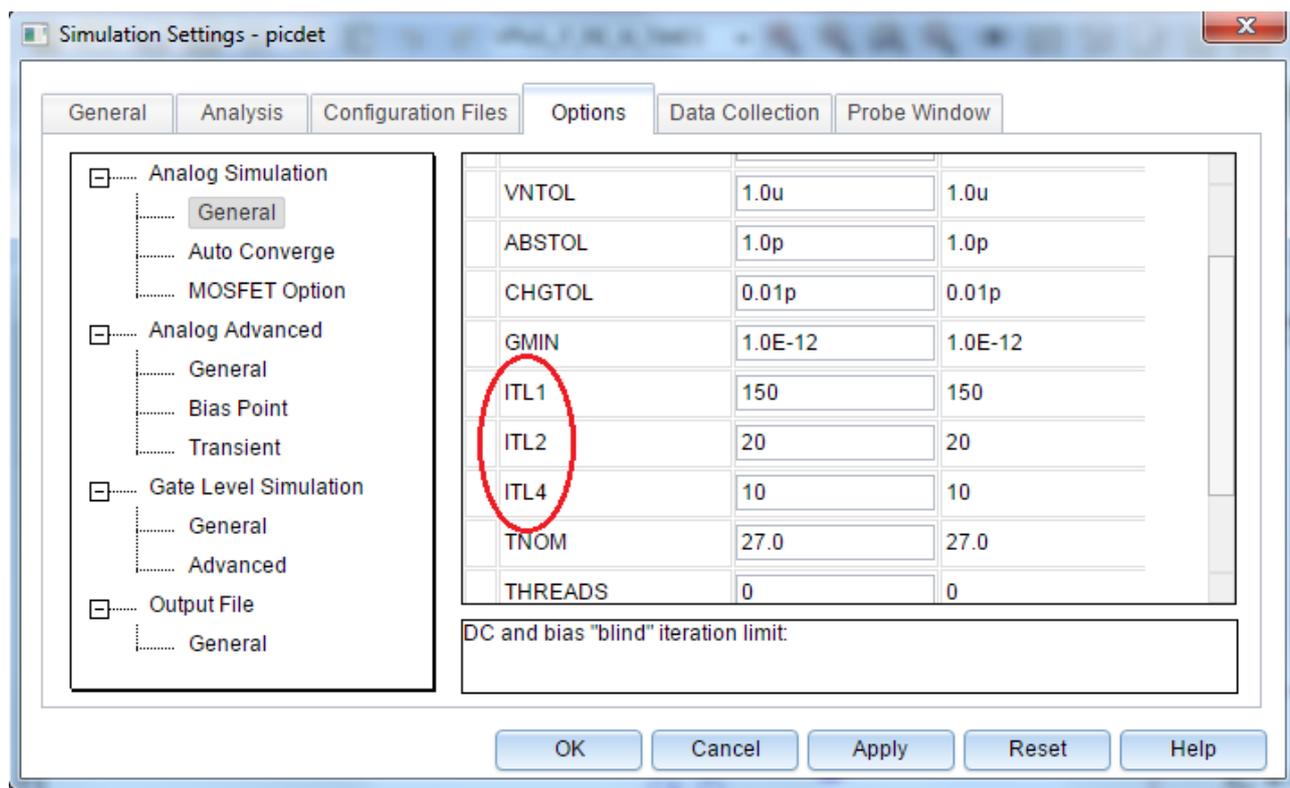


Рис. 9.2. Установка параметров моделирования в профиле

Глава 10. Анализ технических характеристик

Анализ технических характеристик или анализ производительности (Performance Analysis) использует описание измерений, чтобы сканировать семейство кривых в режиме Probe и выдать ряд значений, основанных на проведенных измерениях. Например, после нарастания напряжения источника, подключённого к цепи RC, будет получен ряд кривых зарядки конденсатора. Запуская Performance Analysis для измерения времени нарастания фронта импульсов, будет сгенерирован ряд значений времени нарастания в виде зависимости от скорости изменения источника напряжения.

Анализ производительности - это расширенная функция в PSpice, которую вы можете использовать для сравнения характеристик семейства сигналов. Анализ производительности использует принцип команд поиска для определения функций, которые обнаруживают точки на каждой кривой в семействе.

После того, как вы определите эти функции, вы можете применить их к семейству формы сигналов и получить зависимости, которые являются функцией переменной в семействе.

PSpice включает в себя более 50 описаний измерений.

10.1. Измерение времени фронта в RC - цепи

В новом проекте PR-17 создадим модель (рис. 10.1).

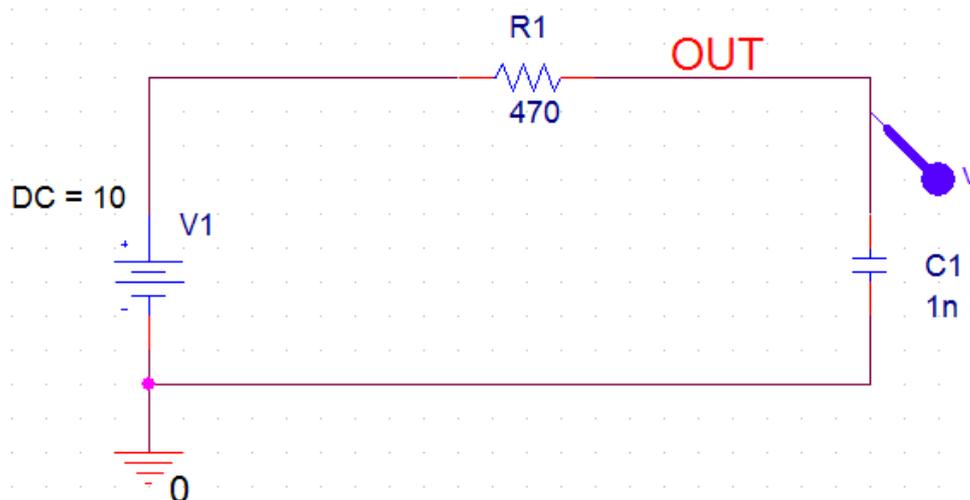


Рис. 10.1. Схема времени фронта

Установим профиль моделирования Transient от 0 до 5 мкс и нулевое начальное значение (Skip initial transient bias point calculation (SKIPBP)). Выполним RUN и получим график переходного процесса (рис. 10.2).

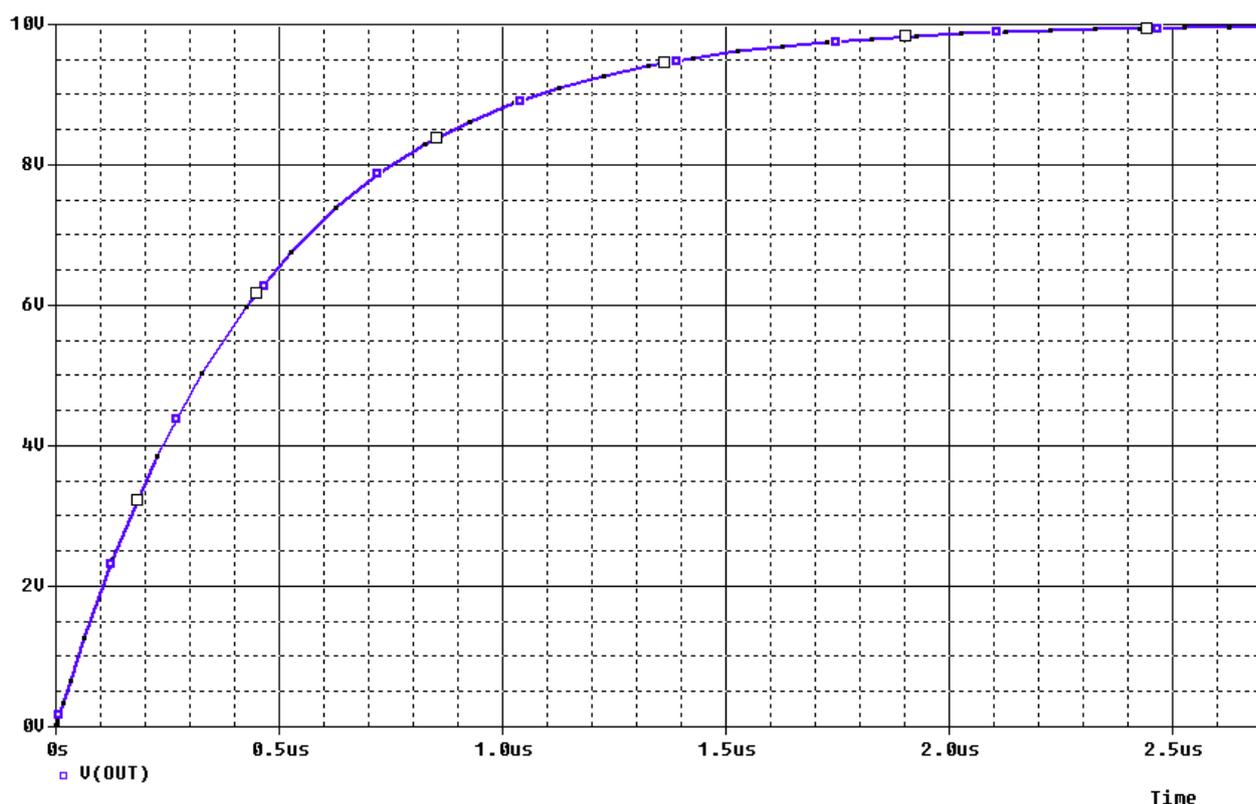


Рис. 10.2. График переходного процесса в RC – цепи

В окне Probe выбираем Trace>Measurements, в списке доступных измерений выделяем Risetime_NoOvershoot (время нарастания без превышения), нажимаем View и находим смысл этого измерения (рис. 10.3). Время нарастания по определению представляет собой разность во времени между значением напряжения или тока при 10% и 90% от максимального значения. Таким обра-

зом, требуется два измерения: одно, когда напряжение (или ток) кривой составляет 10% от максимума (значение (x1)), а другое измерение, когда кривая нарастает до 90% от максимума (значение (x2)).

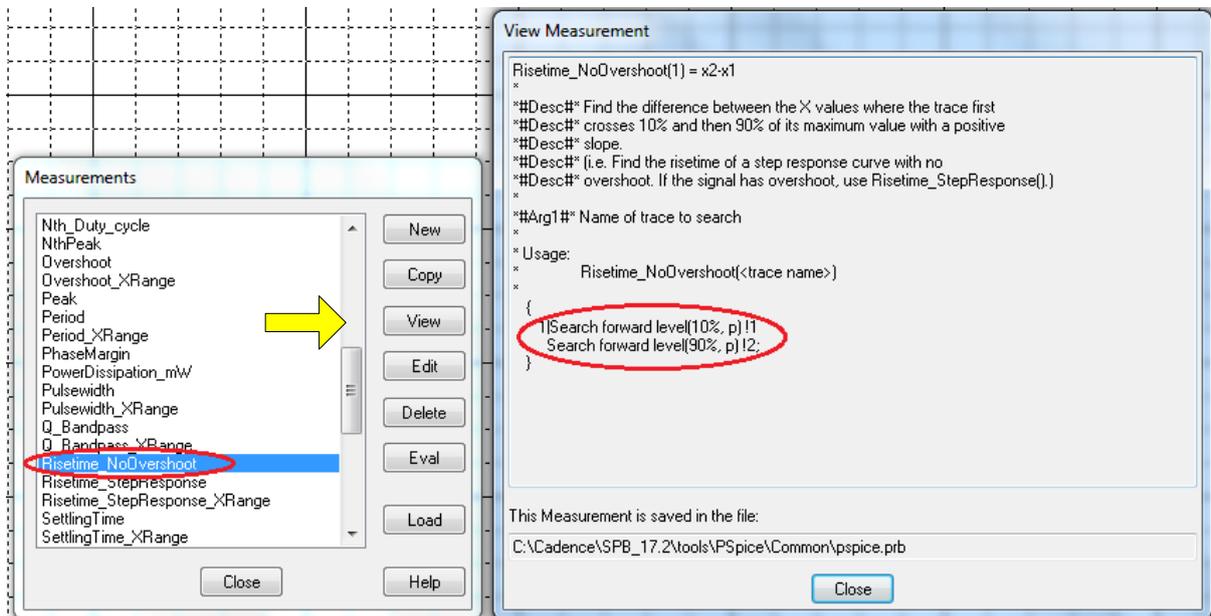
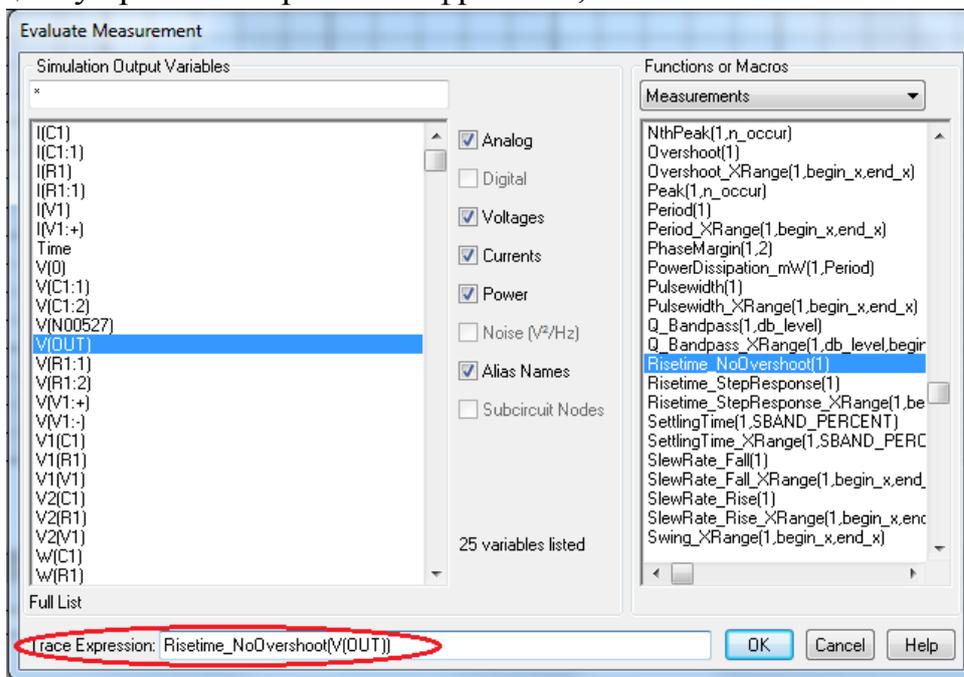


Рис. 10.3. Выбор функции измерений

Далее в окне Probe выбираем Trace > Evaluate Measurements (оценить измерения), в правом окне выбираем Risetime_NoOvershoot, в левом V[OUT] и формируем выражение в строке Trace Expression (рис. 10.4). Нажав Ok, получим оценку времени нарастания фронта 1,03128 мкс.



	Evaluate	Measurement	Value
	<input checked="" type="checkbox"/>	Risetime_NoOvershoot(V[OUT])	1.03128u

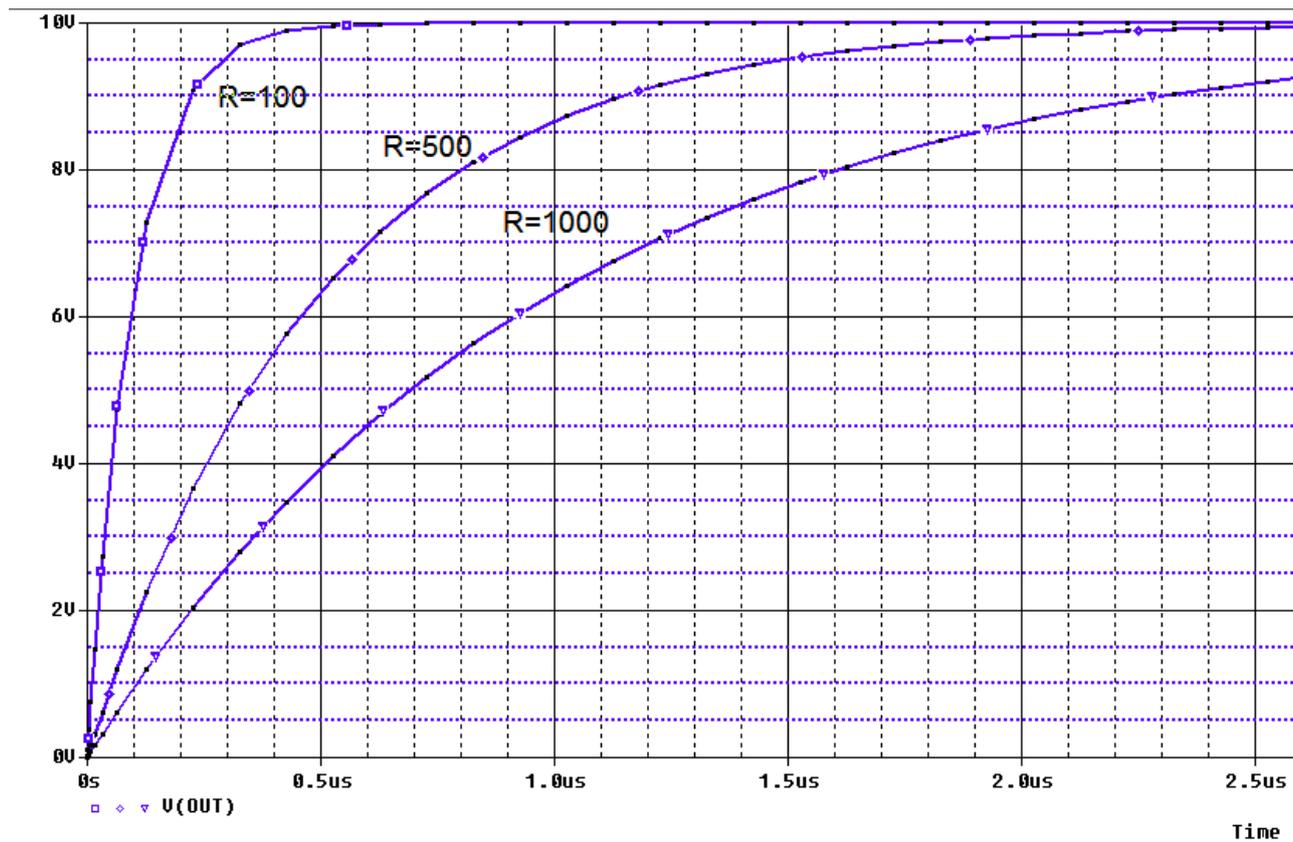
Рис. 10.4. Оценка измерения времени нарастания фронта

10.2. Зависимость времени нарастания от параметров цепи

В этом примере показано, как использовать анализ производительности для просмотра зависимости характеристик схемы от изменяемого параметра.

Сделаем резистор R изменяемым параметром {RES} со значениями 100 Ом, 500 Ом и 1 кОм. В профиле моделирования установим дополнительно параметрическую развертку по глобальному параметру RES.

После моделирования получим три графика (рис. 10.5).

Рис. 10.5. Графики нарастания при изменении R

Будем искать зависимость времени нарастания от величины R . Для этого надо выполнить следующее:

1. В окне Probe откройте Trace > Performance Analysis (рис. 10.6).

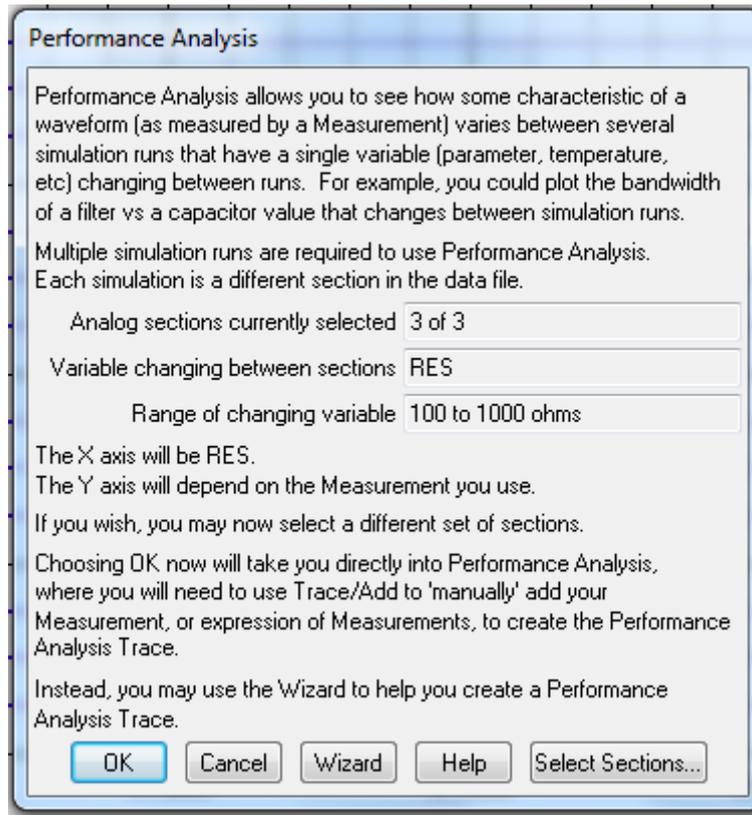


Рис. 10.6. Окно анализа производительности

Отметим, что элемент меню Performance Analysis доступен только в том случае, если есть файлы данных многовариантного анализа.

2. Нажмите кнопку Wizard (Мастер). На каждом шаге мастер предоставляет информацию и рекомендации (рис. 10.7). Выполняйте указания и нажимайте кнопку «Далее».

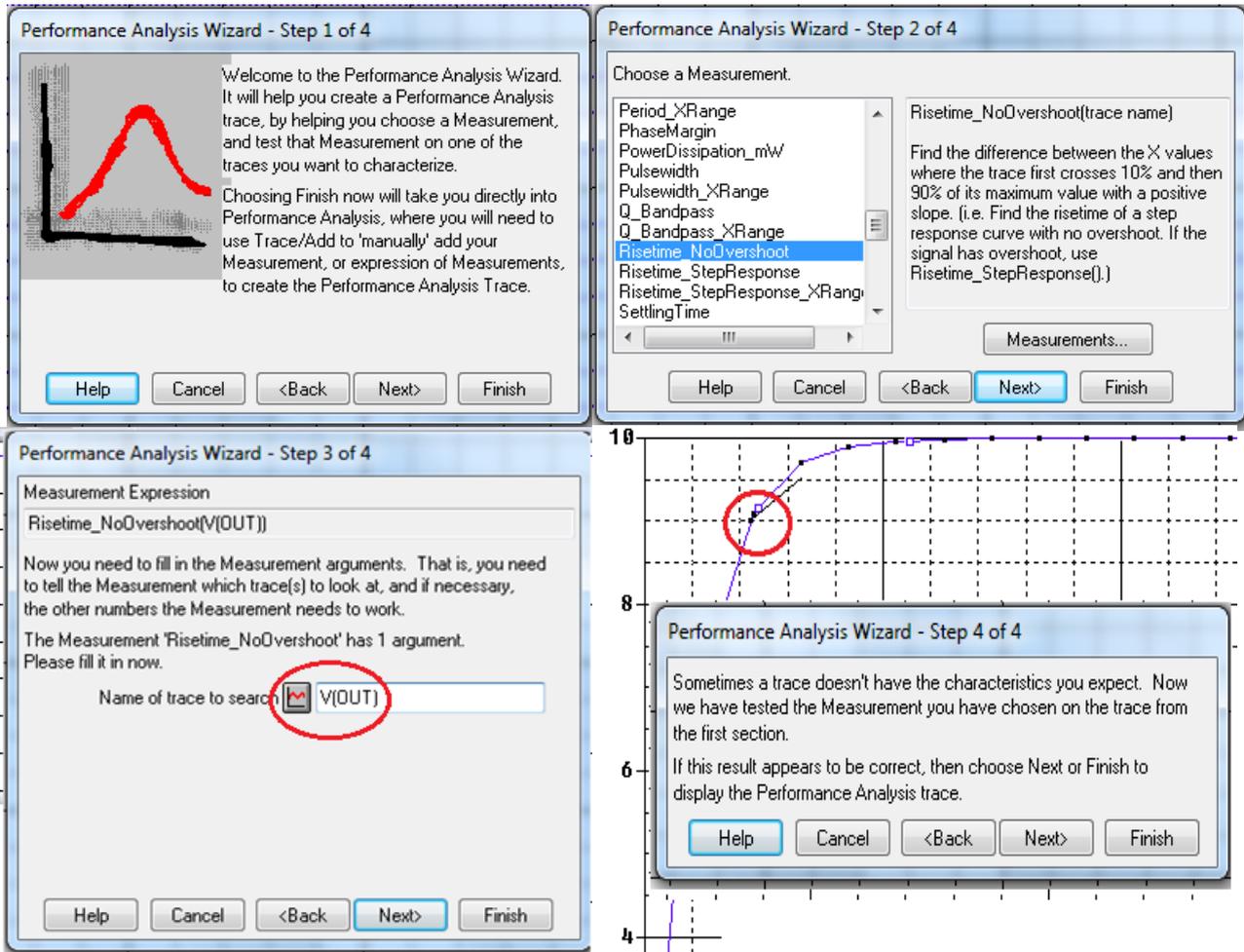


Рис. 10.7. Последовательность работы с мастером анализа производительности

3. После выполнения четвертого этапа нажмите Finish.

Вы получите график зависимости времени нарастания от параметра резистора R и графики переходных процессов для каждого значения параметра (рис. 10.8).

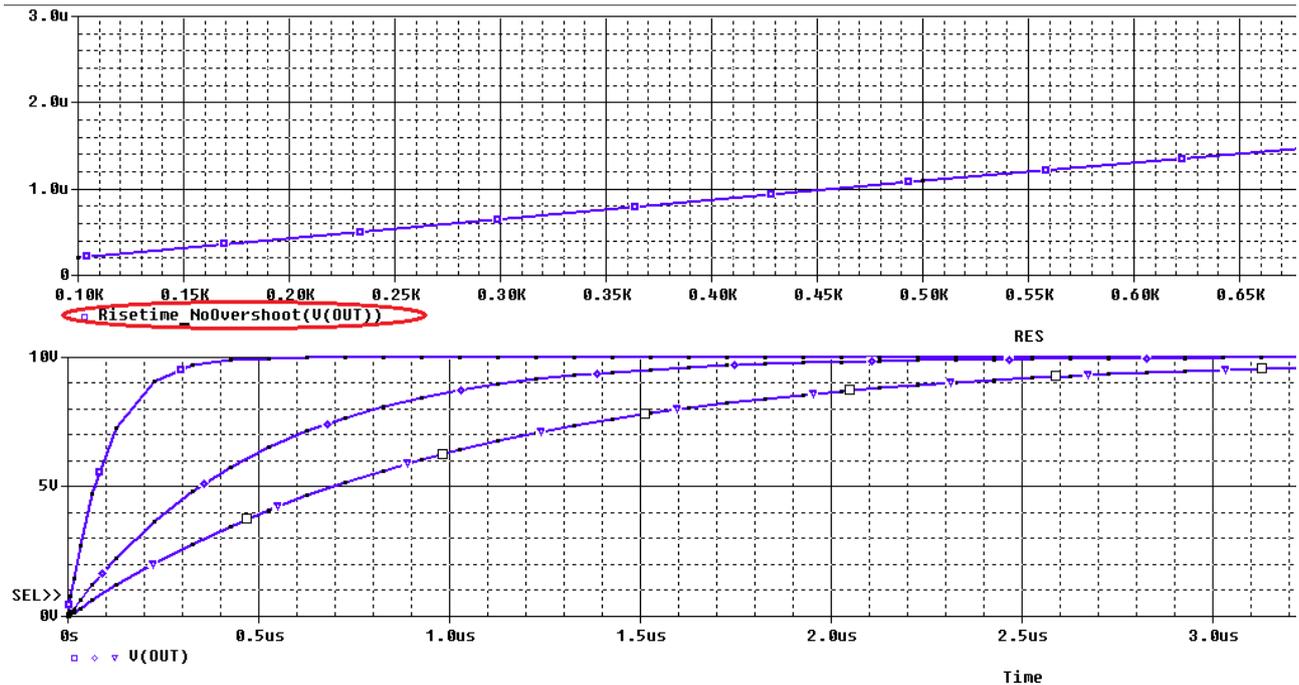


Рис. 10.8. Зависимость времени нарастания от значения резистора

PSpice включает в себя более 50 описаний функций измерений, которые перечислены в скрин-шоте (рис.10.9).

Bandwidth(1,db_level)	Min_XRange(1,begin_x,end_x)	RisetTime_NoOvershoot(1)
Bandwidth_Bandpass_3dB(1)	Nth_Duty_cycle(1,n_occur)	RisetTime_StepResponse(1)
Bandwidth_Bandpass_3dB_XRange(1,begin_x,end_x)	NthPeak(1,n_occur)	RisetTime_StepResponse_XRange(1,begin_x,end_x)
CenterFrequency(1,db_level)	Overshoot(1)	SettlingTime(1,SBAND_PERCENT)
CenterFrequency_XRange(1,db_level,begin_x,end_x)	Overshoot_XRange(1,begin_x,end_x)	SettlingTime_XRange(1,SBAND_PERCENT)
ConversionGain(1,2)	Peak(1,n_occur)	SlewRate_Fall(1)
ConversionGain_XRange(1,2,begin_x,end_x)	Period(1)	SlewRate_Fall_XRange(1,begin_x,end_x)
Cutoff_Highpass_3dB(1)	Period_XRange(1,begin_x,end_x)	SlewRate_Rise(1)
Cutoff_Highpass_3dB_XRange(1,begin_x,end_x)	PhaseMargin(1,2)	SlewRate_Rise_XRange(1,begin_x,end_x)
Cutoff_Lowpass_3dB(1)	PowerDissipation_mW(1,Period)	Swing_XRange(1,begin_x,end_x)
Cutoff_Lowpass_3dB_XRange(1,begin_x,end_x)	Pulsewidth(1)	XatMaxY(1)
DutyCycle(1)	Pulsewidth_XRange(1,begin_x,end_x)	XatMinY(1)
DutyCycle_XRange(1,begin_x,end_x)	Q_Bandpass(1,db_level)	XatNthY(1,Y_value,n_occur)
FallTime_NoOvershoot(1)	Q_Bandpass_XRange(1,db_level,begin_x,end_x)	XatNthY_NegativeSlope(1,Y_value,n_occur)
FallTime_StepResponse(1)	RisetTime_NoOvershoot(1)	XatNthY_PercentYRange(1,Y_pct,n_occur)
FallTime_StepResponse_XRange(1,begin_x,end_x)	RisetTime_StepResponse(1)	XatNthY_PositiveSlope(1,Y_value,n_occur)
GainMargin(1,2)	RisetTime_StepResponse_XRange(1,begin_x,end_x)	YatFirstX(1)
MATLABFunction1(1,<MATLAB_function>)	SettlingTime(1,SBAND_PERCENT)	YatLastX(1)
MATLABFunction2(1,2,<MATLAB_function>)	SettlingTime_XRange(1,SBAND_PERCENT)	YatX(1,X_value)
Max(1)	SlewRate_Fall(1)	YatX_PercentXRange(1,X_pct)
Max_XRange(1,begin_x,end_x)	SlewRate_Fall_XRange(1,begin_x,end_x)	ZeroCross(1)
Min(1)	SlewRate_Rise(1)	ZeroCross_XRange(1,begin_x,end_x)

Рис. 10.9. Функции измерений

10.3. Контрольные вопросы

1. В чем суть анализа технических характеристик и для чего его применяют?
2. Поясните применение анализа времени фронта при заряде емкости в RC-цепи.
3. Объясните исследование зависимости времени нарастания от значения резистора в RC-цепи.

4. Перечислите основные функции измерений для анализа технических характеристик.

Глава 11. Линии передачи

Линии передачи высокоскоростных информационных сигналов представляют собой цепи (линии) с распределенными параметрами. К ним относятся двухпроводные линии и кабели. На более высоких частотах применяют волноводы.

11.1. Определение линии с распределенными параметрами

Линией с распределёнными параметрами называется такая электрическая цепь, в которой элементарные параметры L , C , r , g и запасённая электрическая и магнитная энергия распределены вдоль всей длины цепи, а токи и напряжения в точке цепи зависят от расстояния этой точки до источника.

Первичными параметрами линии называются электрические параметры, отнесённые к единице длины, а именно: L_0 - погонная индуктивность (Гн/м); C_0 - погонная емкость (Ф/м); r_0 - погонное продольное сопротивление (Ом/м); g_0 - погонная поперечная проводимость изоляции (См/м). Линии с неизменными по длине первичными параметрами называются однородными.

11.2. Вывод телеграфных уравнений линии с потерями

Расчетная модель однородной линии показана на рис. 11.1.

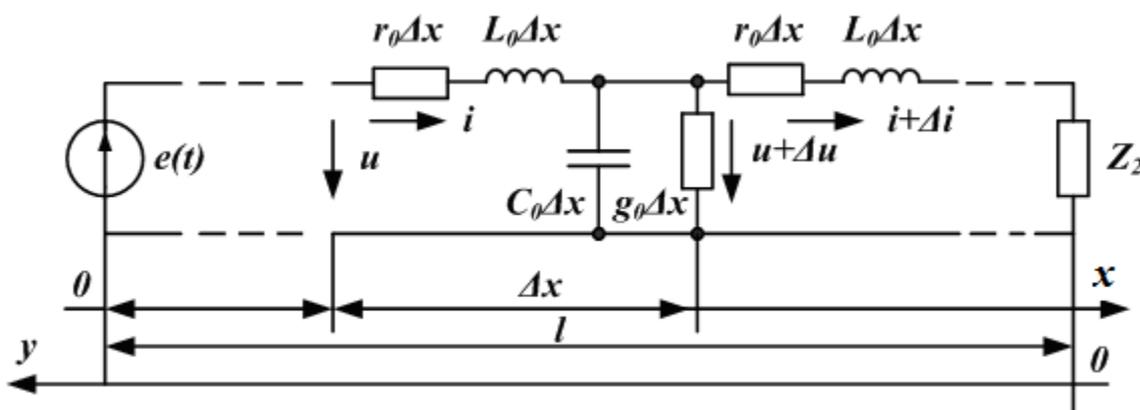


Рис. 11.1. Расчетная модель однородной линии

Малый участок линии Δx имеет продольное сопротивление $r_0 \cdot \Delta x$, индуктивность $L_0 \cdot \Delta x$, поперечную проводимость $g_0 \cdot \Delta x$, емкость $C_0 \cdot \Delta x$. На входе участка напряжение u , ток i . На выходе участка напряжение $u + \Delta u$, ток $i + \Delta i$. По расчетной схеме получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} u(x) - u(x + \Delta x) &= L_0 \Delta x \frac{\partial i}{\partial t} + r_0 \Delta x i \\ i(x) - i(x + \Delta x) &= C_0 \Delta x \frac{\partial u}{\partial t} + g_0 \Delta x u \end{aligned} \quad (11.1)$$

При уменьшении Δx получим дифференциальные уравнения линии в частных производной при отсчете от начала линии:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + r_0 i \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + g_0 u \end{aligned} \quad (11.2)$$

Эти уравнения называют *телеграфными уравнениями* линии при отсчета от начала (переменными являются координата x и время t). Таким образом, напряжение и ток в линии являются функциями двух переменных.

Если отсчет координаты вести от конца линии (переменными будут координата y и время t), получим телеграфные уравнения линии при отсчете от конца:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + r_0 i \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} + g_0 u \end{aligned} \quad (11.3)$$

11.3. Уравнения линии для гармонического сигнала. Характеристические параметры линии

Если на входе линии действует гармонический сигнал $e(t) = E_m \cdot \sin \omega t$, то из уравнений (11.2) можно получить обыкновенные однородные линейные дифференциальные уравнения для комплексных действующих значений напряжения и тока:

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{U} = 0; \quad \frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{I} = 0 \quad (11.4)$$

В уравнениях (11.4):

$\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$ - коэффициент распространения; α - коэффициент затухания; $\beta = \frac{2\pi f}{V_\Phi} = \frac{2\pi}{\lambda}$ - коэффициент фазы,

V_Φ - фазовая скорость.

Решение уравнений (11.4) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \frac{\underline{U}_1 + \underline{Z}_g \underline{I}_1}{2} e^{-\underline{\gamma}x} + \frac{\underline{U}_1 - \underline{Z}_g \underline{I}_1}{2} e^{+\underline{\gamma}x} \\ \underline{I}(x) &= \frac{\underline{U}_1 + \underline{Z}_g \underline{I}_1}{2\underline{Z}_g} e^{-\underline{\gamma}x} + \frac{\underline{U}_1 - \underline{Z}_g \underline{I}_1}{2\underline{Z}_g} e^{+\underline{\gamma}x} \end{aligned} \quad (11.5)$$

В уравнения (11.5) входит важный параметр линии – *волновое сопротивление*:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \quad (11.6)$$

Коэффициенты $\underline{\gamma}, \alpha, \beta$ и волновое сопротивление \underline{Z}_g называют **характеристическими параметрами** линии.

11.4. Падающие и отраженные волны

Первые слагаемые в уравнениях (11.5) затухают при увеличении координаты x и представляют падающие волны напряжения и тока. Вторые слагаемые представляют отраженные волны и возрастают по мере приближения к нагрузке при увеличении x .

Уравнения (11.5) можно получить в гиперболической форме:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_1 \underline{ch} \underline{\gamma}x - \underline{Z}_g \underline{I}_1 \underline{sh} \underline{\gamma}x \\ \underline{I}(x) &= \underline{I}_1 \underline{ch} \underline{\gamma}x - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_g} \underline{sh} \underline{\gamma}x \end{aligned} \quad (11.7)$$

Если отсчет вести от конца линии, когда задан режим в нагрузке $(\underline{U}_2, \underline{I}_2)$, то решение телеграфных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}(y) &= \underline{U}_2 \underline{ch} \underline{\gamma}y + \underline{Z}_g \underline{I}_2 \underline{sh} \underline{\gamma}y \\ \underline{I}(y) &= \underline{I}_2 \underline{ch} \underline{\gamma}y + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_g} \underline{sh} \underline{\gamma}y \end{aligned} \quad (11.8)$$

11.5. Входное сопротивление линии

Входное сопротивление в произвольной точке на расстояние y от конца, есть отношение напряжения в данном сечении к току в данном сечении:

$$\underline{Z}_{вх}(y) = \frac{\underline{U}(y)}{\underline{I}(y)} = \underline{Z}_g \frac{\underline{Z}_2 \underline{ch} \underline{\gamma}y + \underline{Z}_g \underline{sh} \underline{\gamma}y}{\underline{Z}_g \underline{ch} \underline{\gamma}y + \underline{Z}_2 \underline{sh} \underline{\gamma}y} \quad (11.9)$$

В согласованном режиме, когда $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_e$, входное сопротивление линии в любом сечении постоянно и равно волновому сопротивлению: $\underline{Z}_{ex}(y) = \underline{Z}_e = const$.

11.6. Уравнения линии без потерь

Если потери в линии малы ($r_0 \ll \omega L_0, g_0 \ll \omega C_0$), то считают, что $r_0 = 0, g_0 = 0$ и рассматривают *линию без потерь*.

В линии без потерь коэффициент затухания $\alpha = 0$, коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}$, коэффициент распространения $\underline{\gamma} = j\omega \sqrt{L_0 C_0} = j\beta$, фазовая скорость $V_\Phi = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, волновое сопротивление $\underline{Z}_e = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$. При этом уравнения линии без потерь имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}(y) &= \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{I}_2 \underline{Z}_e \sin \beta y \\ \underline{I}(y) &= \underline{I}_2 \cos \beta y + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_e} \sin \beta y \end{aligned} \quad (11.10)$$

Входное сопротивление линии без потерь:

$$\underline{Z}_{ex} = \underline{Z}_e \frac{\underline{Z}_2 \cos \beta y + j \underline{Z}_e \sin \beta y}{\underline{Z}_e \cos \beta y + j \underline{Z}_2 \sin \beta y} \quad (11.11)$$

Задав величину фазовой скорости V_Φ в линии (например, $V_\Phi = 3 \cdot 10^8$ м/сек для воздушной линии) и волновое сопротивление $Z_w = 1200$ Ом, можно рассчитать первичные параметры линии без потерь L_0, C_0 и длину отрезка имитированной линии l .

11.7. Режимы работы линии без потерь

Распределение напряжения по длине линии обусловлено наложением и интерференцией падающей и отраженной волны. В зависимости от характера нагрузки (импеданса) различают:

- режимы стоячих волн при нагрузке вида: холостой ход, короткое замыкание, индуктивность, емкость;
- режим бегущей волны при активной нагрузке, равной волновому сопротивлению линии;
- режимы смешанных волн при активной нагрузке, не равной волновому сопротивлению линии.

11.8. Исследование линий передачи в OrCAD-17.2

Целостность сигнала в высокоскоростных линиях передачи связана с частотой сигнала и дисперсионными потерями линий передачи. Потери мощности

сигнала объясняются увеличением сопротивления проводников (скин эффект) и увеличением диэлектрической проводимости (диэлектрические потери) с увеличением частоты. Дисперсия - это искажение формы волны сигнала в результате задержек, вызванных распределенной частотно-зависимой индуктивностью и емкостью линии передачи. Любые отраженные сигналы из-за несоответствие импеданса будут также проявляться в потерях и дисперсии, и в результате будут ухудшать производительность линии передачи. Идеальные линии и линии передачи с потерями моделируются в PSpice с использованием распределенных Tline моделей и моделей сегментированных линий TLUMP.11

11.8.1. Идеальная линия передачи без потерь

Параметрами, необходимыми для идеальной линии передачи, являются характеристикой импеданс (Z_0) (волнового сопротивления) и либо задержка линии передачи (TD), либо нормированная длина линии (NL), которая представляет собой число длин волн вдоль линии при заданной частоте. Вы не можете вводить TD и NL вместе. Если вы не указали частоту для NL, тогда частота по умолчанию соответствует для $NL = 0,25$, что представляет собой четверть волны.

Временная задержка, TD, вдоль линии передачи определяется следующим образом:

$$TD = \frac{LEN}{v_p},$$

где TD - задержка передачи (с), LEN - длина линии передачи в (м), v_p - скорость распространения волны (м/с). Для линий передачи скорость распространения выражается в процентах от скорости света, так что:

$v_p = c \times VF$, где VF - это фактор скорости, который имеет значения от 0 до 1, а c - скорость света, равная 3×10^8 м/с.

Нормализованная длина линии $NL = \frac{LEN}{\lambda}$.

Из выражения $v_p = f \lambda$ длину волны получим так: $\lambda = \frac{v_p}{f}$.

Это выражение затем перепишем так: $NL = LEN \frac{f}{v_p}$, где f - частота

(Гц), λ - длина волны (м).

PSpice использует устройство T из аналоговой библиотеки для моделирования идеальной передачи линия. На рис. 11.2а показан компонент Capture для устройства T линии без потерь и связанные с этим компонентом свойства в редакторе свойств.

Итак, для идеальной линии передачи, если вы не знаете время задержки (TD), тогда вы можете ввести значения для NL и f и, как указано выше, если вы не введете частоту, то используется значение по умолчанию 0,25, которое представляет собой четверть волны.

К линии передачи могут быть применены исходные условия для напряжения и тока.

11.8.2. Линии с потерями

Линии передачи могут считаться состоящими из нескольких одинаковых участков с известными условно сосредоточенными параметрами сегментов линии, как показано на рисунке 11.1. При этом $R = r_0 \cdot \Delta x$ представляет собой продольное линейное сопротивление, $L = L_0 \cdot \Delta x$ - индуктивность линии, $C = C_0 \cdot \Delta x$ - диэлектрическая емкость и $G = g_0 \cdot \Delta x$ - поперечная диэлектрическая проводимость. Для длинных линий электропередачи одним решением будет использование несколько сосредоточенных сегментов RLCG, соединенных вместе.

На рис. 11.2.б показан компонент Capture для устройства линии с потерями и связанные с этим компонентом свойства в редакторе свойств.

PSpice обеспечивает до 128 сегментов линии в библиотеке TLine. Однако, объединение больших сегментов линии может привести к длительному времени моделирования.

Простые модели линий передачи RC также доступны в библиотеке TLine, так как имеется более 40 моделей коаксиальных кабелей и моделей с витой проволокой.

Альтернативный подход для линий передачи с потерями заключается в использовании распределенной модели, которая опирается на метод свертки с импульсной характеристикой для определения отклика в линии передачи. На рис. 11.3 показано устройство TLOSSY PSpice и связанные с ним свойства в редакторе свойств.

Длина линии передачи представлена свойством LEN, а свойства R, L, C и G указаны для единичной длины.

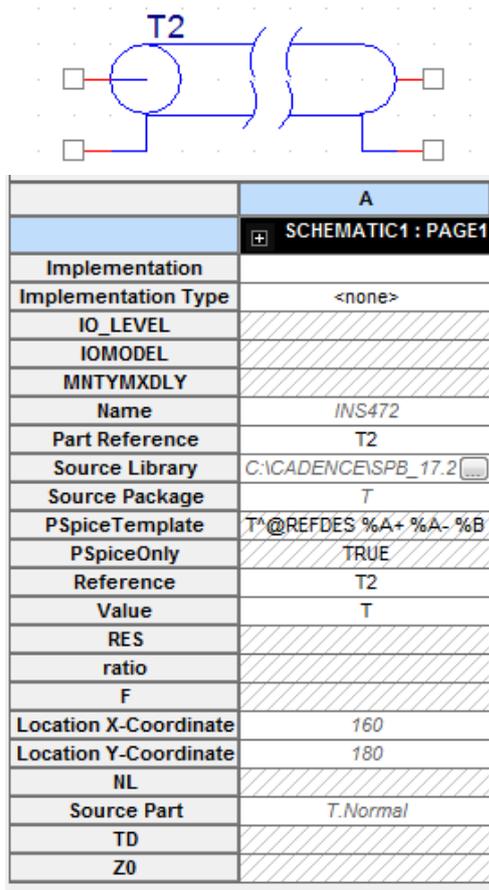


Рис. 11.2.а

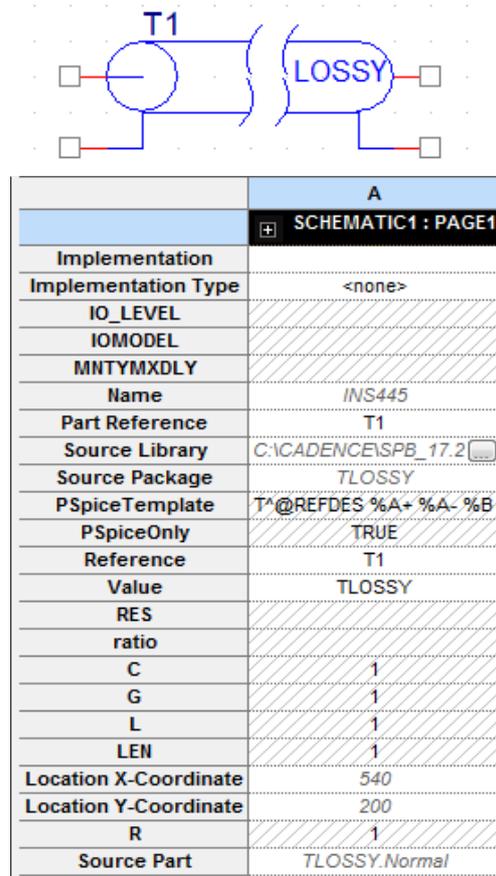


Рис.11.2.б

Примечание.

Максимальный внутренний временной шаг, созданный для моделей распределенных линий передачи, ограничен одной половиной задержки линии передачи TD. Поэтому для короткой линии передачи, время моделирования может быть значительно больше для распределенных моделей линий по сравнению с использованием для короткой линии передачи модели с сосредоточенными параметрами.

11.9. Примеры моделирования линии без потерь

11.9.1. Согласованная линия без потерь

В новом проекте PR-19 соберем схему (рис. 11.3). Линию передачи T1 выбираем из аналоговой библиотеки, а импульсный источник напряжения из библиотеки Source. Когда вы размещаете нагрузочный резистор RL на схеме, по умолчанию, контакт 1 включен в левой части резистора. Надо повернуть резистор RL три раза, чтобы в вертикальном положении контакт 1 находился сверху и был подключен к T1. По соглашению ток, текущий в контакт 1, определяется как положительный, так что измеренный отрицательный ток на выводе 1 представляет собой ток, вытекающий из контакта 1.

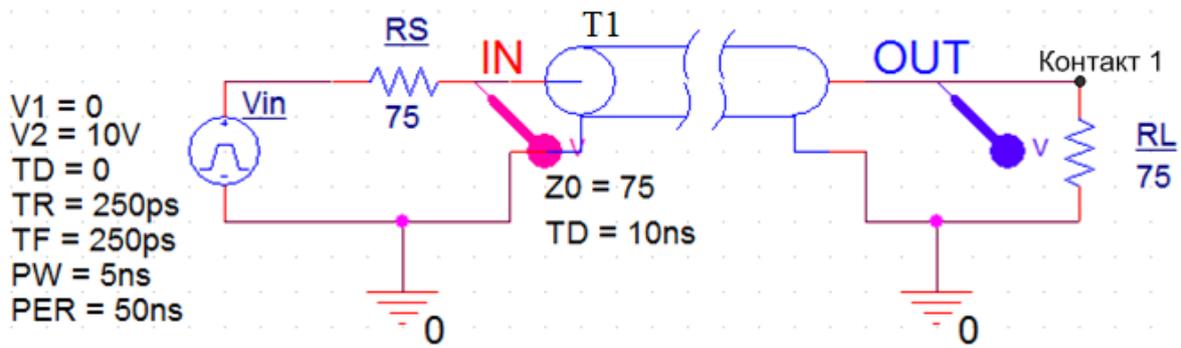


Рис. 11.3. Схема модели согласованной линии передачи

Для линии передачи установим типовые значения волнового сопротивления $Z_0=75$ Ом и задержки $TD=10$ нс.

Для работы линии в согласованном режиме сопротивление источника сигнала R_S и сопротивление нагрузки R_L должны равняться волновому сопротивлению линии 75 Ом.

Установки импульсного источника сигнала показаны на рис. 11.3.

Выполним моделирование с профилем Transient и установим Run To Time = 50 ns, Maximum Step Size = 50 ps.

Результаты моделирования формы сигналов показаны на рис. 11.4.

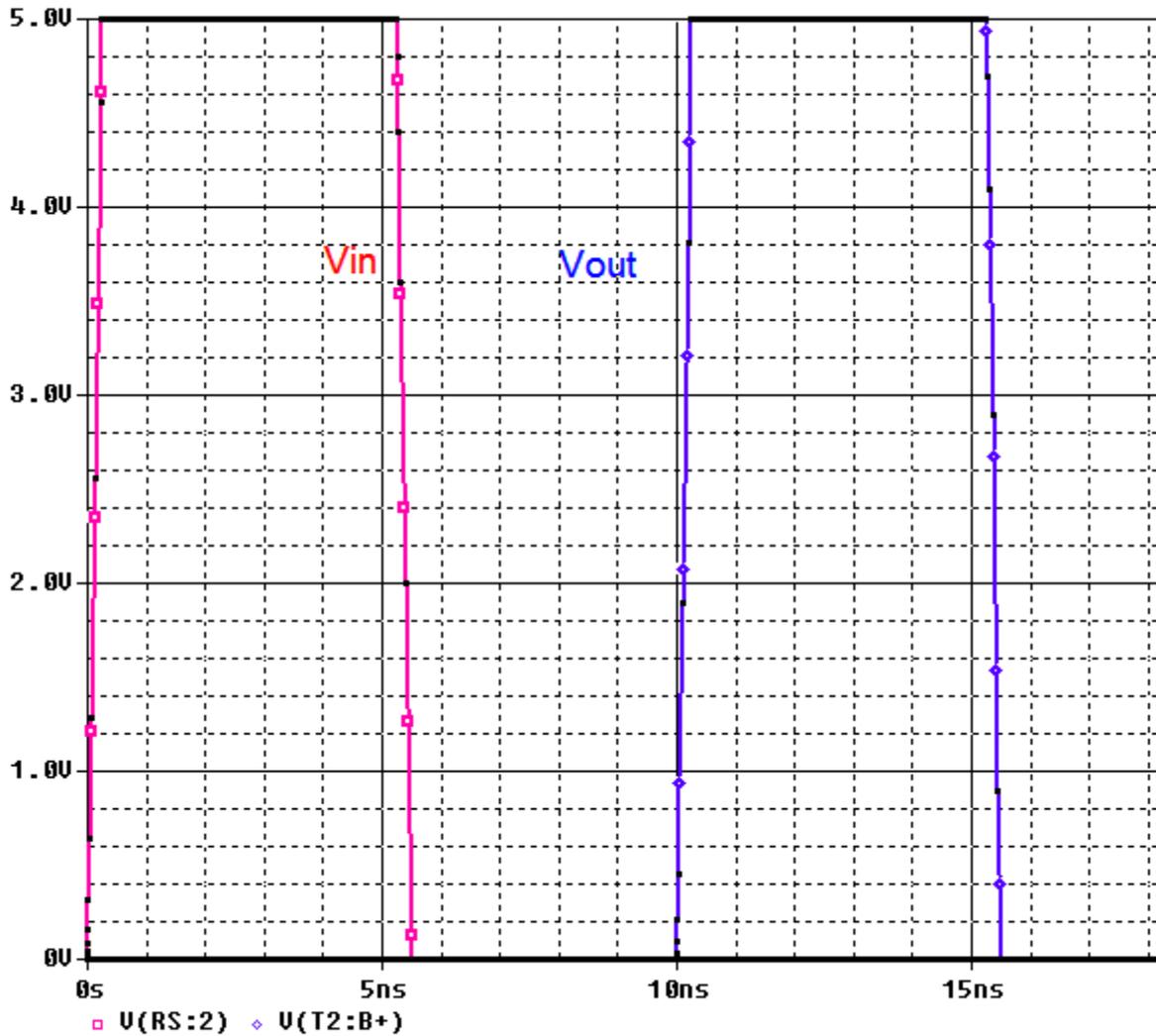


Рис. 11.4. Форма сигналов в согласованной линии без потерь

Как и следует из теории, выходной сигнал не искажается, полностью соответствует входному, но задержан на время задержки линии 10 нс.

11.9.2. Короткозамкнутая линия без потерь

Для моделирования короткозамкнутой линии установим в схеме рис. 11.3 нагрузку $R_L=75$ мОм. Моделирование показывает, что на выходе импульс напряжения отсутствует, а на входе с задержкой 20 нс появляется отраженный импульс (рис. 11.5).

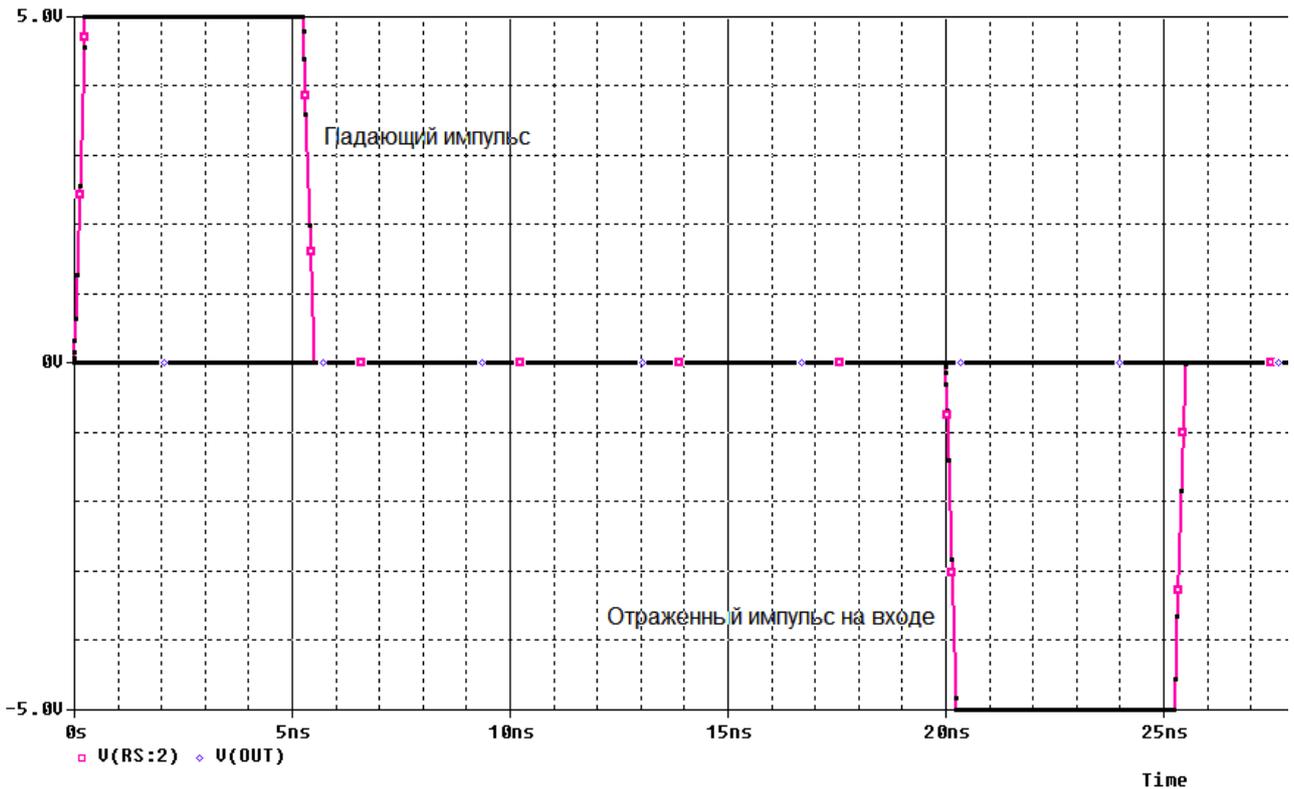


Рис. 11.5. Режим короткого замыкания на выходе

11.9.3. Разомкнутая линия без потерь

Для моделирования разомкнутой линии установим нагрузку $R_L=75$ ГОм. В этом случае на выходе наблюдаем удвоенный импульс напряжения, а на входе появляется отраженный импульс с задержкой 20 нс

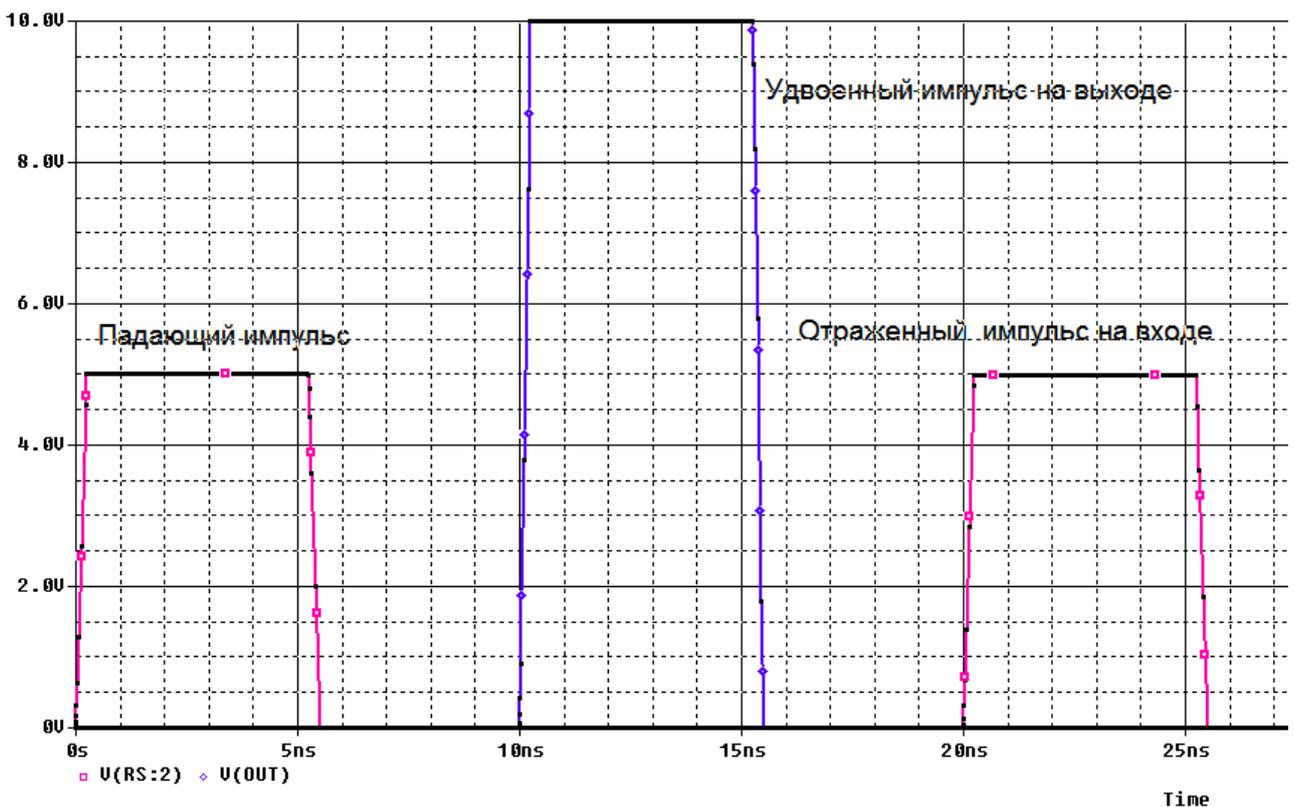


Рис. 11.6. Режим разомкнутой линии

Короткозамкнутая и разомкнутая линия работают в режиме стоячей волны: энергия не передается в нагрузку так как в первом случае напряжение на нагрузке равно нулю, а во втором случае ток в нагрузке равен нулю.

11.9.4. Режим смешанных волн в линии без потерь

Если нагрузка активная, но не равна волновому сопротивлению линии, установится режим смешанных волн. Моделирование для $RL=150$ Ом показывает, что в нагрузке наблюдается импульс с амплитудой 7,2 В, а на вход с задержкой 20 нс поступает отраженный импульс с амплитудой 1,7 В.

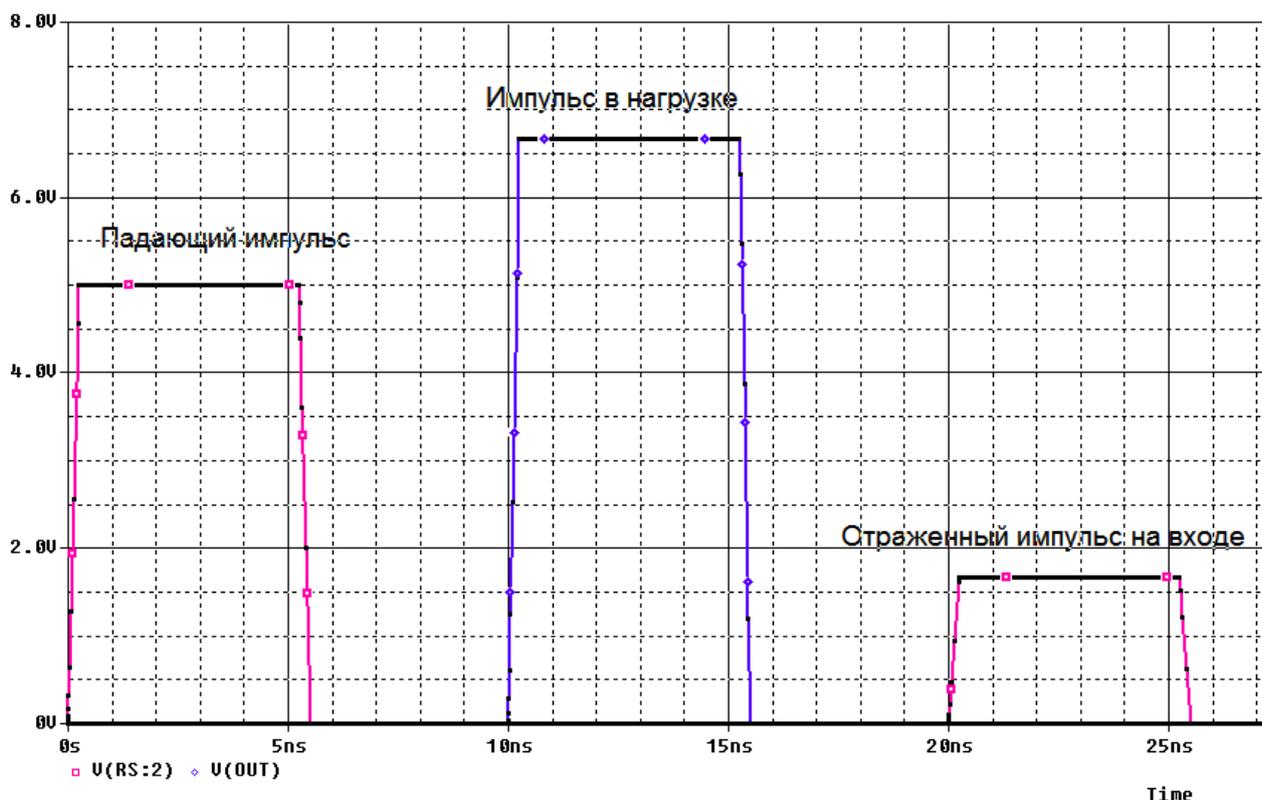


Рис. 11.7. Режим смешанных волн

11.10. Исследование формы волны в линии без потерь

Распределение напряжения волны вдоль линии зависит от характера нагрузки, частоты и свойств линии.

Чтобы исследовать это, выполним следующее:

1. В новом проекте соберем модель линии с источником переменного напряжения (рис. 11.8).

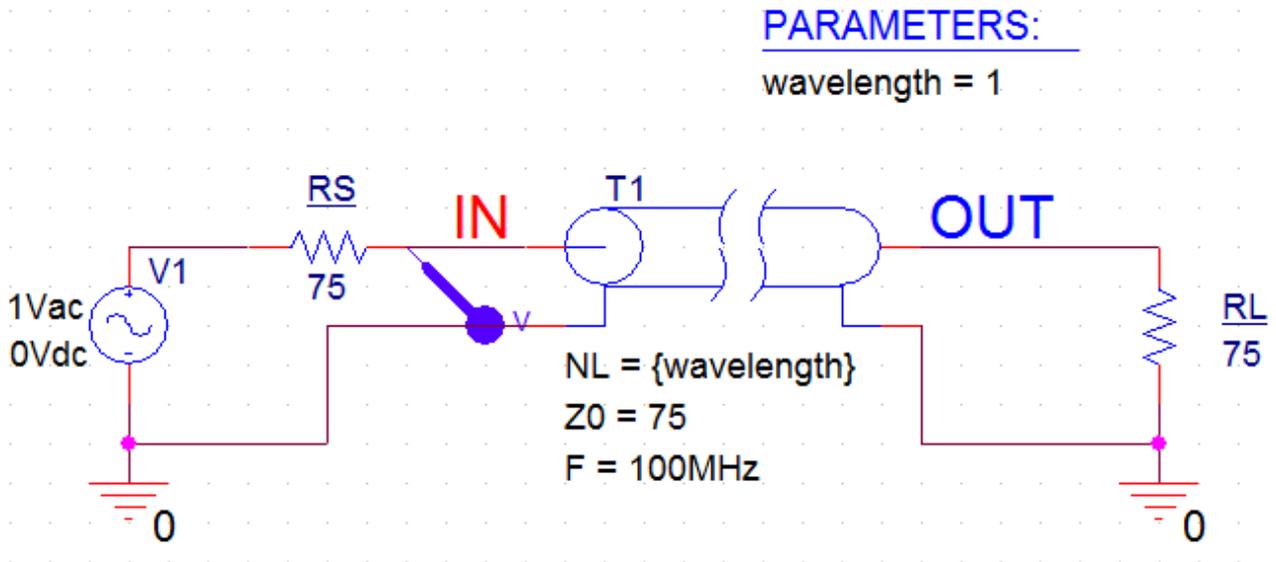


Рис. 11.8. Модель для исследования формы волны

2. Мы будем менять значение свойства линии передачи NL, поэтому необходимо параметризовать значение свойства NL в редакторе свойств.

Дважды щелкните по компоненту T1, чтобы открыть Редактор свойств. Выделите для NL поле значения свойства, которое имеет затененные линии и введите {wavelength}. Скобки {} представляют собой «контейнер» для переменного параметра. Не закрывайте редактор свойств, нажмите Display и выберите Name and Value. Тогда на схеме появится запись $NL = \{\text{wavelength}\}$.

3. Установите частоту 100 МГц и волновое сопротивление 75 Ом (рис. 11.9).

A	
SCHEMATIC1 : PAGE1	
Implementation	<none>
Implementation Type	<none>
IO_LEVEL	
IOMODEL	
MNTYMXDLY	
Name	INS445
Part Reference	T1
Source Library	C:\ICADENCE\SPB_17.2
Source Package	T
PSpiceTemplate	T*@REFDES %A+ %A- %B
PSpiceOnly	TRUE
Reference	T1
Value	T
RES	
wavelength	
F	100MHz
Location X-Coordinate	310
Location Y-Coordinate	160
NL	{wavelength}
Source Part	T.Normal
TD	
Z0	75

Display Properties

Name: NL

Value: {wavelength}

Font: Arial 7

Color: Default

Rotation: 0°

Text Justification: Default

Buttons: OK, Cancel, Help

Рис. 11.9. Установка длины линии и частоты

4. Далее необходимо определить значение по умолчанию для параметра длины волны. Добавьте компонент Param из специальной библиотеки и двойным щелчком на компоненте откройте его Редактор свойств. Выберите New Properties, введите Name как wavelength волны и свойство Value = 1 как показано на рис. 11.10. Установите отображение Name and Value для wavelength и закройте редактор свойств для компонента PARAM.

В схеме появятся дополнительные свойства (рис. 11.8).



Рис. 11.10. Установка свойств компонента PARAM

5. Далее вам нужно будет настроить развертку параметрического моделирования вместе с анализом АС. Создайте новый профиль моделирования PSpice, например, ACSIN и выберите анализ AC Sweep / Noise от 100 МГц до 200 МГц при использовании логарифмической развертки с плотностью точек 1/декада (рис. 11.11). Нажмите Apply и Ok.

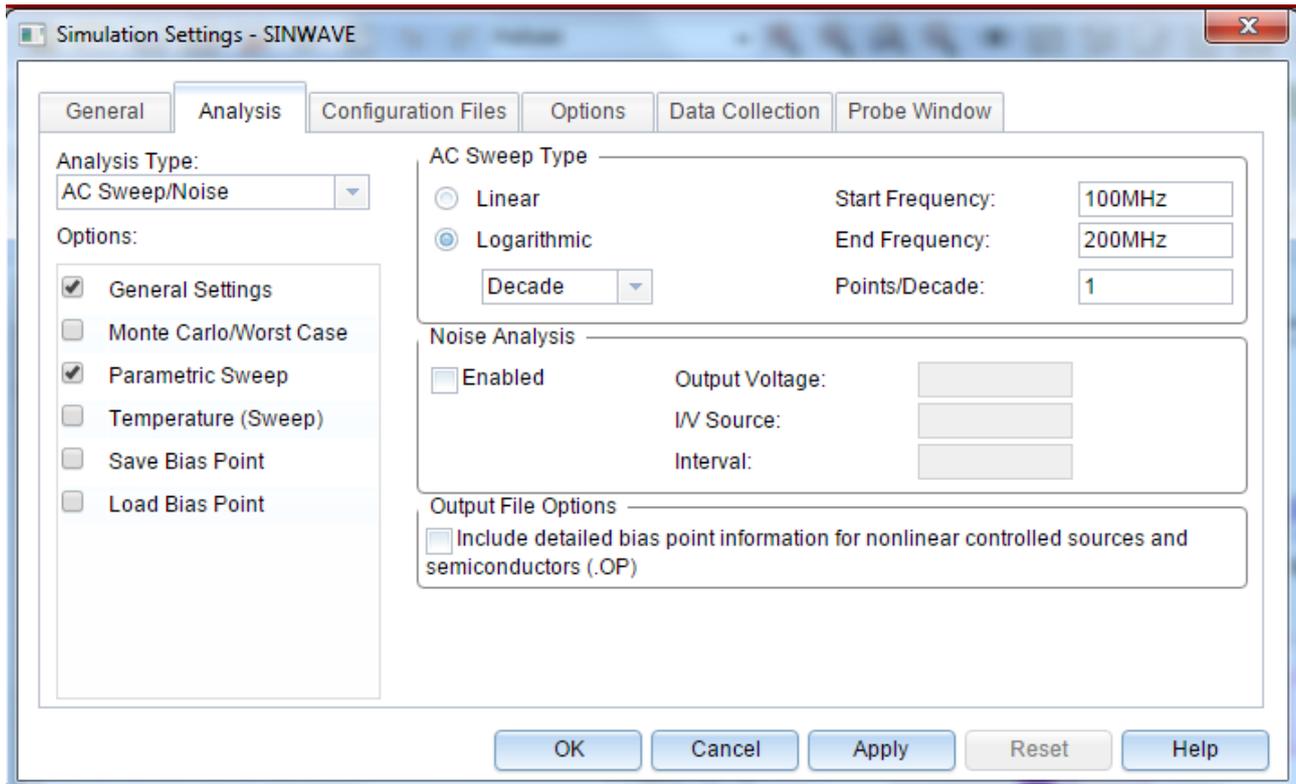


Рис. 11.11. Установка профиля моделирования с разверткой по частоте

6. Установите параметрическую развертку и настройте глобальный параметр развертки wavelength. Длины волны меняется от 0 до 1 с шагом 0.01, как показано на рисунке 11.12. Нажмите «ОК».

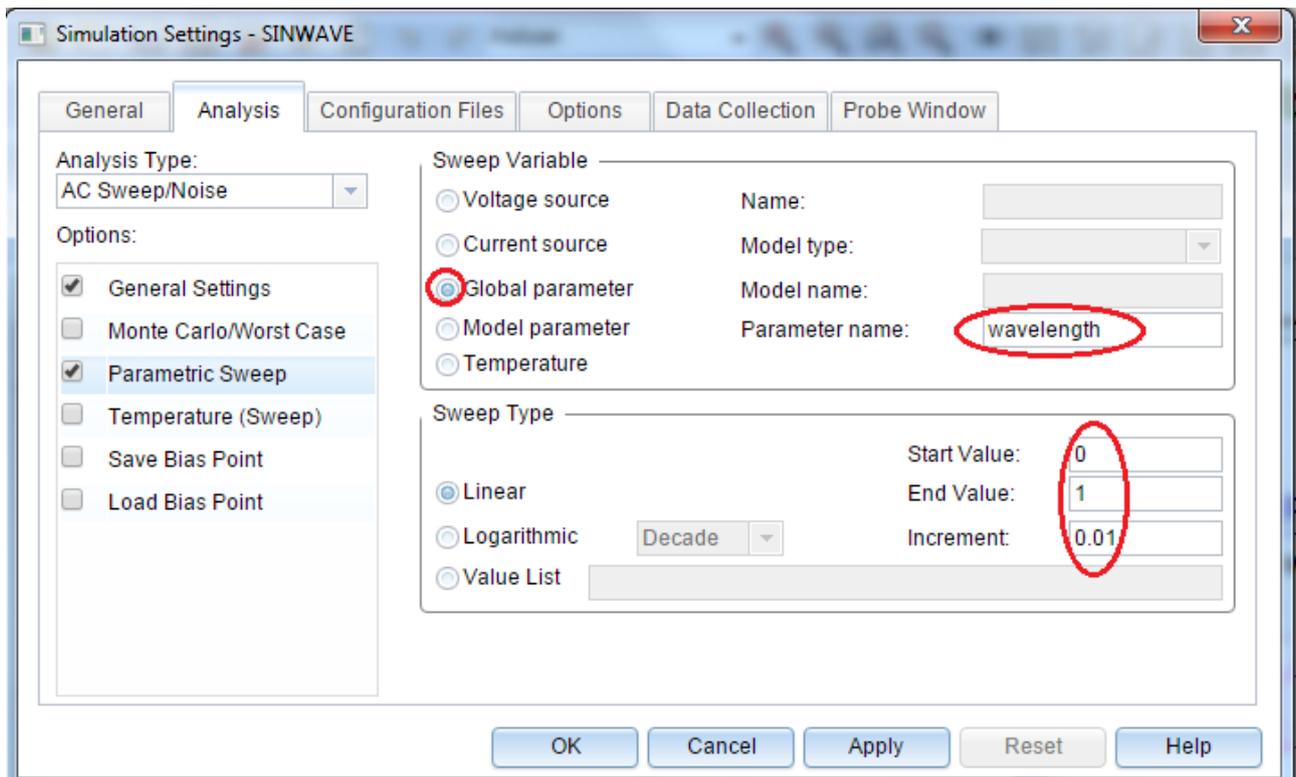


Рис. 11.12. Настройка параметрической развертки длины волны

7. Установите в схеме (рис. 11.8) $RL=75$ Ом и выполните моделирование. После окончания моделирования отобразите в окне Probe все доступные результаты.

В режиме бегущей волны напряжение вдоль линии будет постоянным (рис. 11.13).

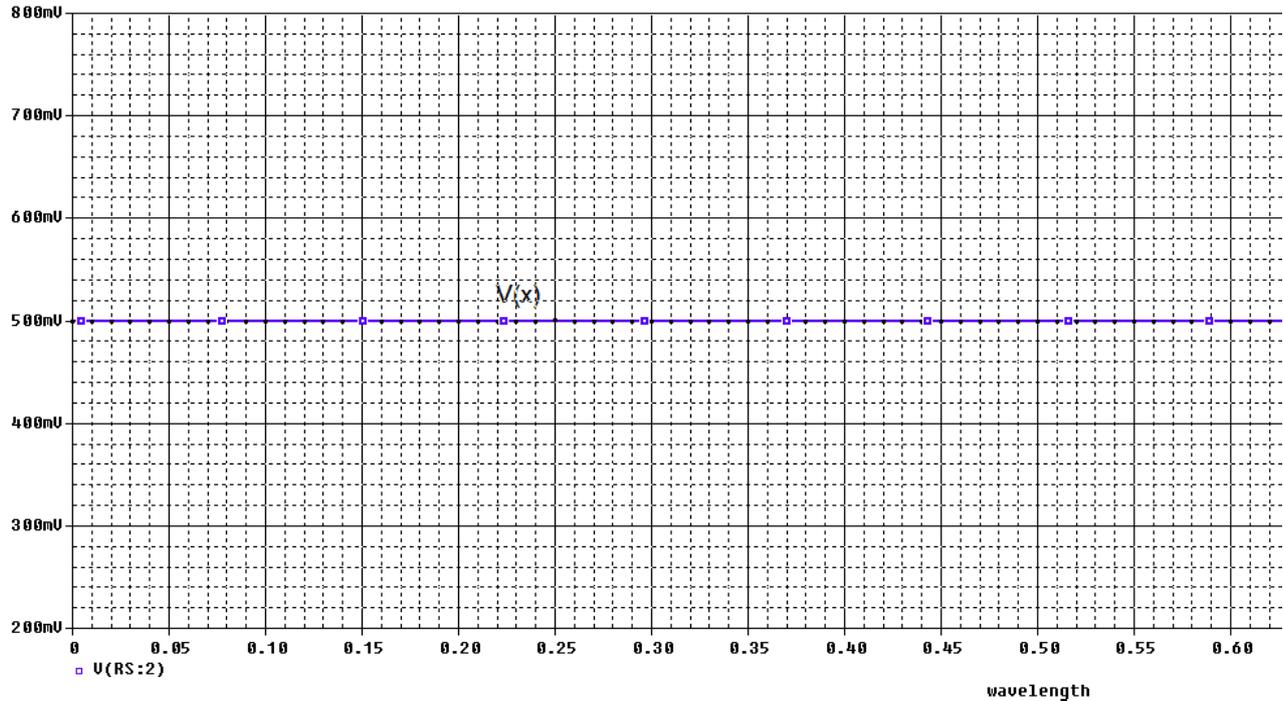


Рис.11.13. Напряжение в линии в режиме бегущей волны

8. Установите в схеме (рис. 11.8) $RL=75$ мОм (режим короткого замыкания). Выполните моделирование. В линии установится режим стоячей волны. В конце линии будет минимум напряжения (рис. 11.14).

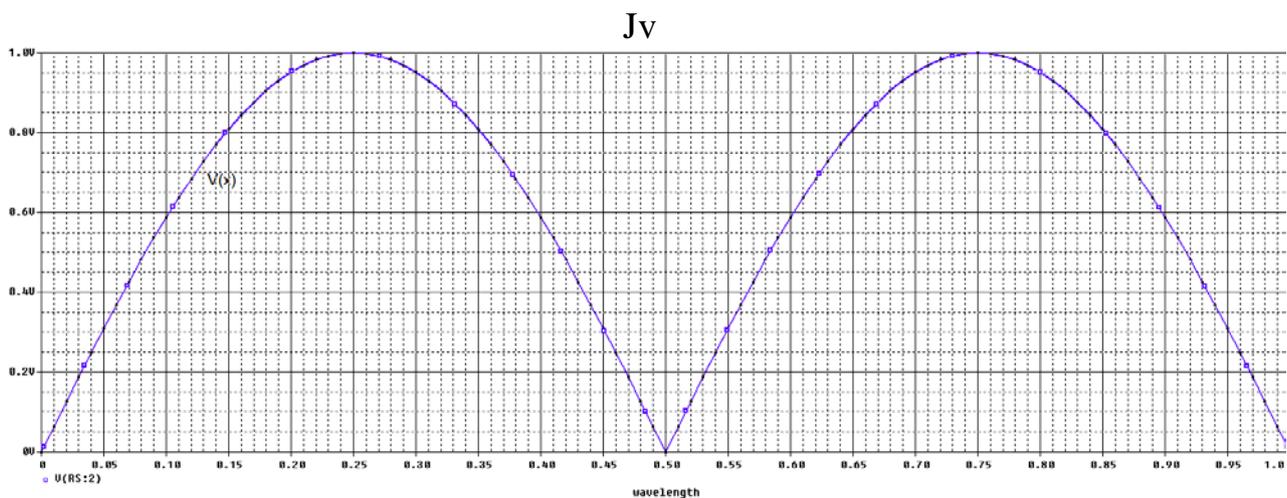


Рис. 11.14. Напряжение в линии с режиме стоячей волны

9. Установите $R_L=150 \text{ Ом}$. В линии будет режим смешанных волн. Так как нагрузка больше волнового сопротивления, в конце линии будет максимум напряжения (рис. 11.15).

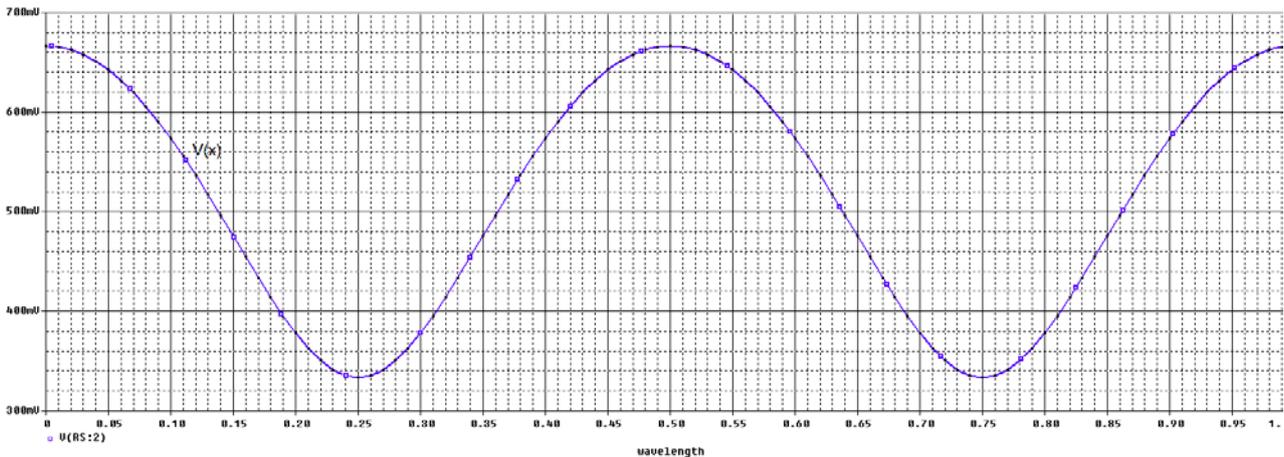


Рис. 11.15. Напряжение в линии с режиме смешанных волн

Таким образом, мы изучили моделирование линий передачи в среде OrCAD-17.2. Более детальные сведения вы получите при самостоятельном освоении программы.

11.11. Контрольные вопросы

1. Дайте определение линий с распределенными параметрами.
2. Назовите первичные параметры линий с распределенными параметрами.
3. Какие линии называют однородными ?
4. Как выглядит модель участка однородной линии ?
5. Как выглядят телеграфные уравнения линии для произвольного сигнала ?
6. Как выглядят уравнения линии с потерями для гармонического сигнала ?
7. Назовите характеристические параметры линии ?
8. Что такое падающие и отраженные волны ?
9. Как выглядят уравнения линии без потерь и входное сопротивление такой линии ?
10. Какие режимы работы бывают в линии без потерь ?
11. Какие компоненты используют в OrCAD 17.2 для моделирования линий без потерь и как устанавливают параметры этих компонентов ?
12. Какие компоненты используют в OrCAD 17.2 для моделирования линий с потерями и как устанавливают параметры этих компонентов ?
13. Поясните пример моделирования линии без потерь с различными нагрузками.
14. Поясните метод исследования формы волны в линии без потерь.