

**Амелина М.А.
Амелин С.А.**

**ПРОГРАММА
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
MICROCAP-8**

Краткий ознакомительный экскурс

2006

1. КРАТКИЙ ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ЭКСКУРС

1.1. Основные сведения для начала работы с программой MicroCap-8

Программа MicroCap-8 позволяет начать моделирование электронных устройств новичку даже без глубокого ее изучения. Интерфейс программы является стандартным для программ ОС Windows. Поэтому назначение стандартных пиктограмм (открытие документа, копирование и т.п.) пока не рассматриваем. Как обычно, все команды можно вызвать через меню, часть наиболее употребимых выведены на панели в виде ярлычков (пиктограмм). Кроме того, многие команды можно вызывать горячими клавишами.

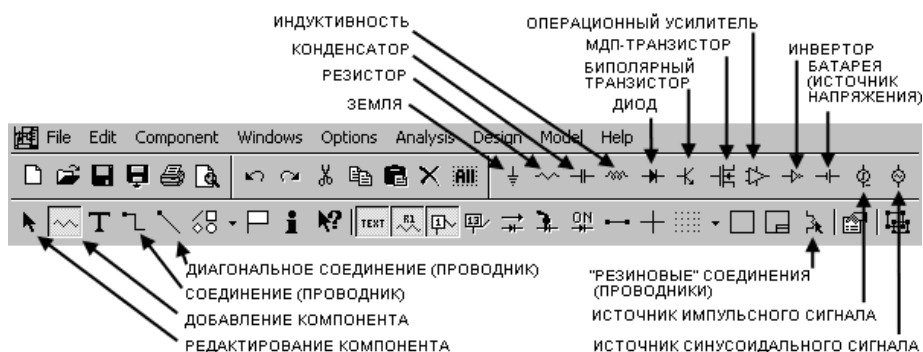


Рис. 1.1. Наиболее часто используемые элементы верхней панели.

При запуске программы открывается основное окно **Main**, в котором сразу можно приступить к построению схемы для моделирования. Предположим, мы хотим исследовать работу транзисторного каскада. Для этого надо нарисовать в окне его схему. Пусть это будет усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером. На верхней панели (рис. 1.1) нажимаем на ярлычок с обозначением биполярного транзистора. Появляется его условное графическое обозначение. Помещаем его в нужное место и нажимаем левую клавишу мыши. Появляется окно задания параметров транзистора. В правой его части – список стандартных моделей, имеющих в MicroCap-8. Но если нужного транзистора в списке нет, либо вы не знаете, какой именно транзистор хотите использовать, то можно выбрать обобщенную модель \$GENERIC_N. В дальнейшем ее можно будет заменить на любую другую. Добавляемым компонентам автоматически присваиваются позиционные обозначения (в порядке добавления). Наш транзистор получил условное графическое обозначение Q1.

Затем на верхней панели нажимаем ярлычок резистора и начинаем добавлять эти компоненты в схему. Если нажать левую клавишу мыши, и, удерживая ее, нажимать правую, то компонент будет вращаться. После отпущения левой клавиши вызывается окно задания параметров. Для резистора достаточно задать его сопротивление (100=100 Ом, 2.3K=2,3кОм). Стоит обратить внимание, что целая часть отделяется от дробной точкой, а не запятой. Остальные необязательные параметры будут рассмотрены позже в со-

ответствующем разделе книги. Если какого-то компонента нет на панели, то его нужно вызывать через пункт меню **COMPONENT**.

При построении схемы желательно включить отображение текстовых надписей, позиционных обозначений компонентов и номеров узлов (рис. 1.2). Возможно включение координатной сетки и точек подсоединения компонентов.

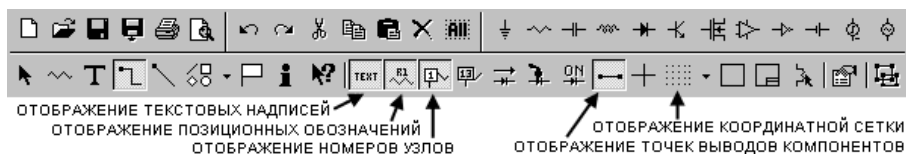


Рис. 1.2. Включение/выключение отображение элементов графической схемы моделирования

Компоненты схемы соединяются между собой проводниками. Проводники могут быть ортогональными или произвольными (диагональными). Если проводник проходит через вывод компонента (красную точку), то он считается присоединенным к компоненту (рис. 1.3).

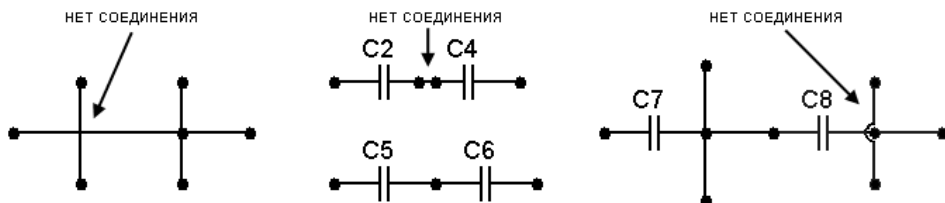


Рис. 1.3. Примеры соединения проводников и компонентов схемы

Пересекающиеся проводники могут соединяться в точке пересечения (появится красная точка соединения), а могут не соединяться. Если провести один проводник, а потом его пересечь другим — электрического соединения не будет. Для организации соединения нужно довести проводник до точки пересечения с другим, щелкнуть левой клавишей мыши, и только потом продолжить проводник дальше.

Если проводник все-таки проходит через точку вывода компонента, а соединяться с ним не должен, то необходимо использовать специальный элемент — Jumpер (перемычку) (рис. 1.3). Вызывается этот компонент, как и все, которые не вынесены на панель, через пункт меню **COMPONENT** (*Component>Analog Primitives>Connectors*).

При присоединении одного компонента к другому следует обращать внимание, что точки выводов компонентов должны совпадать. Иначе между ними не будет электрического соединения.

Проверить правильность соединения можно по номерам узлов. На всем протяжении проводника и на всех точках выводов компонентов номер узла должен стоять только в одном месте.

Следует обратить внимание, что схема для моделирования обязательно должна содержать точку присоединения к «земле» (общему проводу), относительно которого будут рассчитываться и отображаться потенциалы узлов.

При редактировании схемы иногда возникает необходимость перемещения отдельных компонентов или участков схемы. Для этого на верхней панели выбирается инструмент «редактирование компонента» (стрелочка). При редактировании нажатие левой клавишей мыши – выбор компонента, двойное нажатие – редактирование его параметров. Выбранный компонент можно перемещать, удерживая нажатой левую клавишу мыши, или вращать, нажимая правую клавишу при нажатой левой. Кроме того, при нажатой левой клавише мыши можно выделить блок с компонентами и соединениями, а потом переместить его в другое место (так же, как и отдельно выделенный компонент).

Интересные возможности предоставляет опция «резиновые» соединения. Если включить эту опцию, то при перемещении компонента за ним будут тянуться проводники с сохранением электрического соединения (рис. 1.4.).

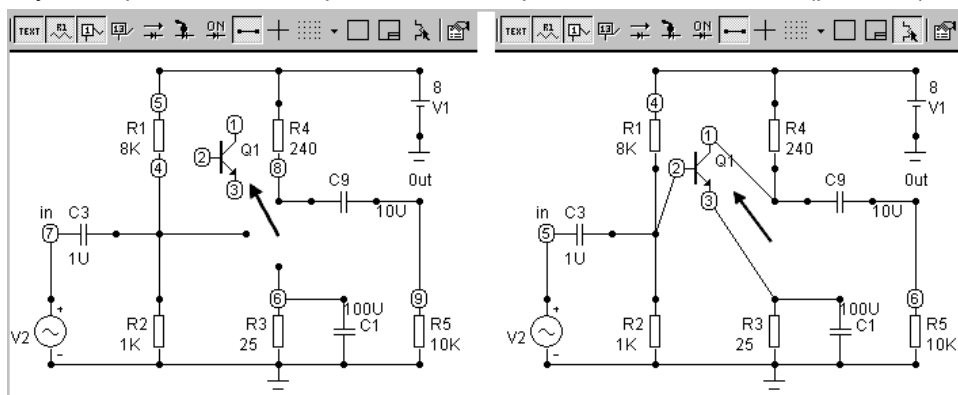


Рис. 1.4. Результаты перемещения компонента с включенной и выключенной опцией «резиновые» соединения

1.2. Анализ режимов работы транзисторного каскада

Итак, схема для моделирования построена (рис. 1.5). Сигнал на каскад подается с источника синусоидального напряжения с частотой 100 кГц, амплитудой 40мВ и внутренним сопротивлением 10 Ом. Соответственно, в окне задания параметров $F=100K$, $A=0.04$, $RS=10$. Остальные значения – нулевые. Для демонстрации возможностей MicroCap-8 при отладке схем параметры каскада с общим эмиттером преднамеренно не рассчитаны точно, а просто взяты исходя из грубых прикидочных соотношений.

Для анализа переходных процессов выбираем команду **Analysis>Transient**. Появляется окно задания параметров моделирования. В нем надо задать время расчета 100U – 100 мкс (в MicroCap «U» обозначает «микро»), максимальный шаг анализа (если 0 – то выбирается автоматически, но увеличивается погрешность расчетов и кривые могут стать ломаными). Установленный флаг *Operating Point* означает, что перед расчетом переходных процессов будет проведен расчет режима работы каскада по постоянному току. В частности, напряжения на конденсаторах примут установившиеся значения.

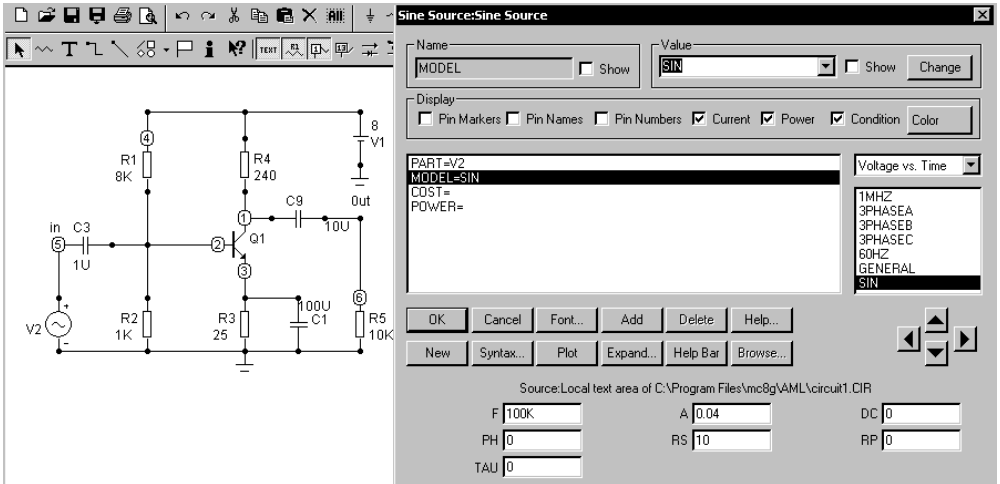


Рис. 1.5. Схема для моделирования и параметры источника сигнала.

Кроме того, надо задать параметры выводов графиков – номер графика, что выводится по осям X и Y, и масштаб. Для примера на первом графике по оси X — время, по оси Y — напряжение в узле 6 (на выходе). Напряжение в узле задается указанием V(6), масштаб по оси X выбирается автоматически, по оси Y – диапазон от -4В до 4В (рис. 1.6).

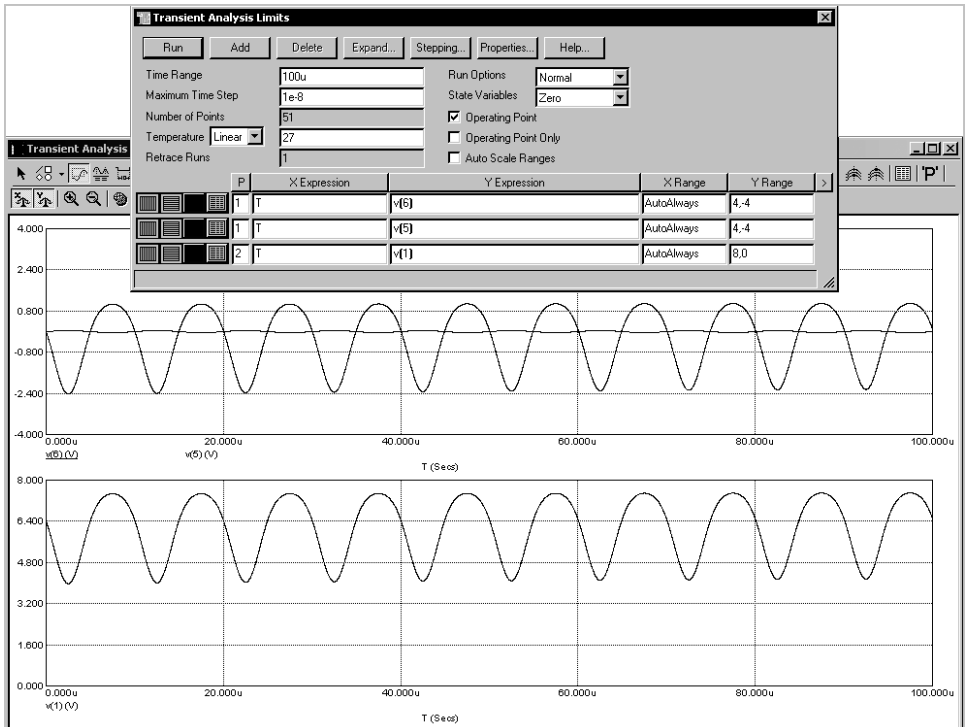


Рис. 1.6. Параметры анализа переходных процессов и полученные результаты

Если нужно вывести напряжение между узлами 1 и 3 – то задается $V(1,3)$, если ток между узлами, то $I(1,3)$. Необходимо отметить, что ток можно вывести, если между узлами включена единственная ветвь. Можно также выводить мощность, токи и напряжения полупроводниковых приборов и т.п. (более подробно – в соответствующем разделе описания). Для задания многих параметров можно щелкнуть правой клавишей мыши в поле раздела *Y-Expression* и выбрать раздел открывающегося меню. Такие же заготовки есть и для полей *X-Range* и *Y-Range*.

В качестве примера приведены графики входного и выходного напряжения, а также напряжение на коллекторе транзистора (рис. 1.6). Усилитель работает с большими искажениями, поскольку у каскада неправильно установлен режим по постоянному току. В режиме покоя напряжение на коллекторе транзистора должно приблизительно равняться половине напряжения питания. Для проверки исследуемого каскада нужно включить отображение узловых потенциалов в стационарном режиме (рис. 1.7, а). А включение соседней пиктограммы позволяет посмотреть токи через компоненты в режиме покоя (рис. 1.7, б).

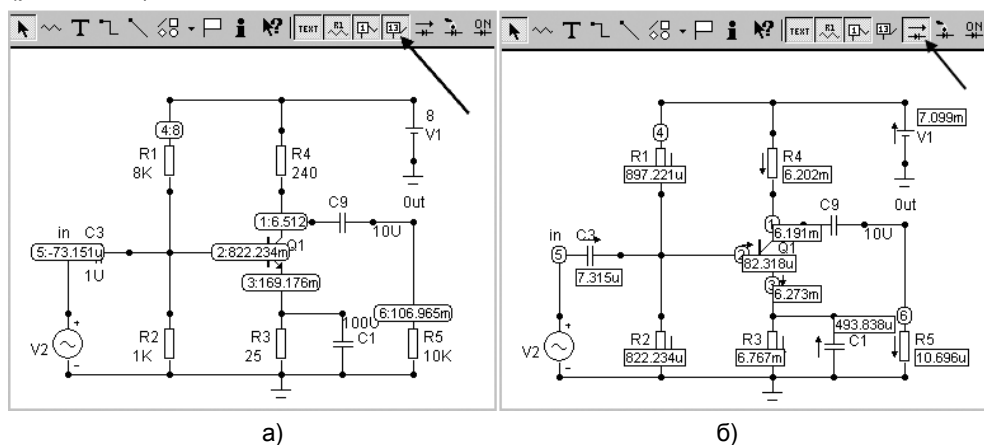


Рис. 1.7. Отображение узловых потенциалов и токов ветвей

Напряжение на коллекторе транзистора составляет 6,5В. Его нужно еще больше приоткрыть, увеличив ток покоя. Это можно сделать, меняя сопротивление $R1$, заново запуская анализ и просматривая полученные узловые потенциалы. Но MicroCap-8 предоставляет для этой цели более удобное средство – режим *Dynamic DC* (раздел меню *Analysis*). Во время этого анализа значения параметров компонентов можно менять, передвигая движки (как в переменном резисторе) и сразу видеть изменения токов и узловых потенциалов. Перед началом расчета появляется окно, в котором задается температура и минимальный шаг движков в процентах. Изменением сопротивления $R1$ установим коллекторное напряжение, равное 4В и повторим анализ переходных процессов. Синусоида стала почти симметричной, но все равно есть искажения из-за слишком большого размаха. Необходимо уменьшить коэффициент усиления каскада. Для этого снова переходим в режим *Dynamic DC*, уменьшаем сопротивление $R4$, а затем изменением $R1$ вновь устанавливаем

напряжение на коллекторе транзистора в режиме покоя. После этого усилительный каскад работает в нормальном режиме (рис. 1.8).

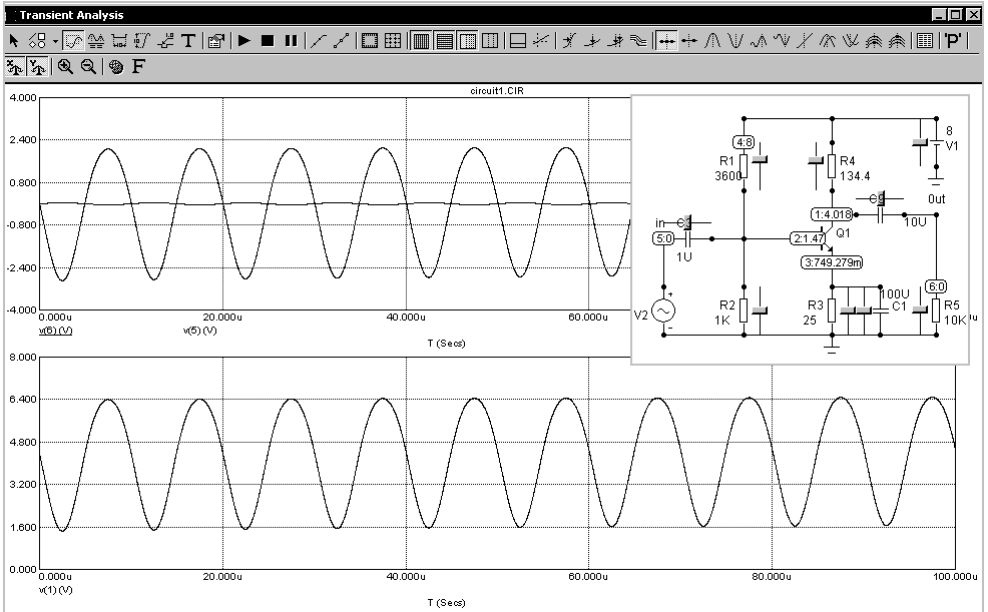


Рис. 1.8. Диаграммы в номинальном режиме и отладка каскада в Dynamic DC

Теперь можно посмотреть частотную характеристику полученного каскада. Для этого необходимо выполнить АС-анализ (рис. 1.9).

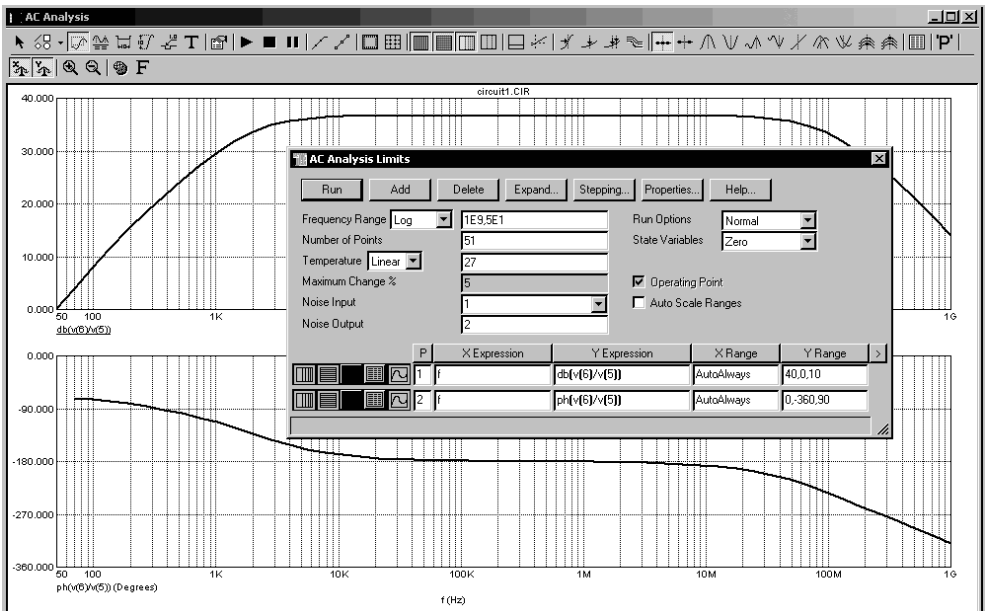


Рис. 1.9. Частотный анализ

В этом примере частота меняется от 50 Гц до 1 ГГц в логарифмическом масштабе. На первом графике по оси X – коэффициент усиления в децибелах (задается — db ($v(6)/v(5)$)) в диапазоне от 0 до 40 дБ с шагом сетки 10. На втором графике – фазочастотная характеристика в диапазоне от 0 до -360 град. с шагом сетки 90.

Примеры, рассмотренные далее в этой главе можно взять из каталога **Demo** (Book-cir.rar).

1.3. Анализ процессов в двухтактном преобразователе напряжения

Импульсные преобразователи и стабилизаторы напряжения – достаточно сложный для моделирования класс электронных устройств. Это связано с тем, что помимо коммутационных процессов в полупроводниковых приборах с малыми постоянными времени, там присутствуют колебательные и апериодические процессы в силовом контуре, с постоянными времени на несколько порядков больше. Плюс цепи обратной связи и коррекции, которые необходимо проектировать исходя из законов теории автоматического управления. В состав стабилизаторов напряжения могут входить не только аналоговые, но и цифровые узлы. В этом случае необходимо применять смешанное моделирование.

Пока мы рассмотрим упрощенный вариант – без обратной связи и без ШИМ-модулятора. В качестве задающего генератора используются два импульсных генератора, а в качестве коммутирующих элементов – упрощенные ключи, управляемые напряжением. Моделирование этого устройства позволяет продемонстрировать пример задания параметров генераторов импульсов, ключей и трансформаторов (магнитосвязанных индуктивностей), а также некоторые приемы моделирования преобразовательных устройств.

Схема моделирования и формат задания параметров ключа, управляемого напряжением, представлены на рис. 1.10. Аналоговые ключи находятся в разделе **Components** главного меню (рис. 1.11).

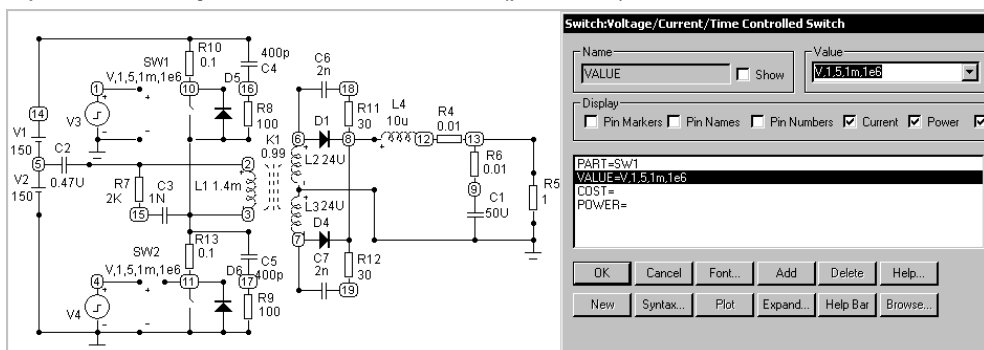


Рис. 1.10. Полумостовой преобразователь напряжения и параметры ключей

Рассматриваемая схема представляет собой упрощенный вариант силовой части источника питания компьютера. Она построена на базе полумостовой (HalfBridge) схемы. Вместо выпрямителя и входных последовательно со-

единенных конденсаторов используются два последовательно соединенных источника напряжения по 150В каждый. Это упрощение не сказывается существенно образом на работе силовой части преобразователя. При необходимости этот узел можно добавить в схему моделирования позже. Выходное напряжение преобразователя – 12В при токе 12А (моделируется только один из каналов реального источника питания).

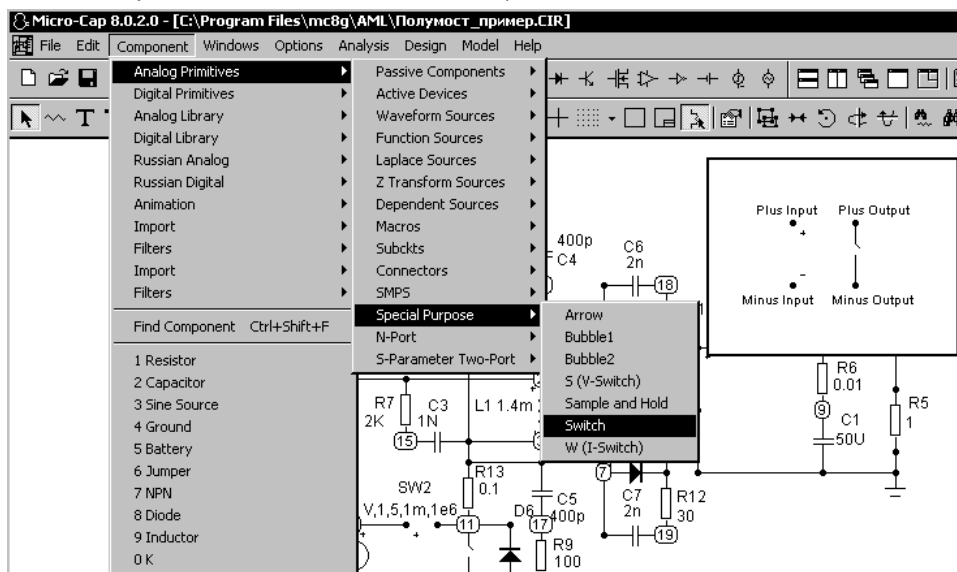


Рис. 1.11. Выбор компонента «ключ» через меню программы

Задающие генераторы формируют управляющее напряжение, поочередно открывающее силовые ключи на заданный интервал времени. Формат задания параметров импульсных генераторов представлен на рис. 1.12. На этом же рисунке представлены результаты выполнения команды *Plot* из меню окна параметров. Эта команда вызывает дополнительное окно, в котором графически отображается форма задаваемого импульса. Генераторы формируют импульсы амплитудой 3В, длительностью 5мкс с периодом следования 14мкс, сдвинутые друг относительно друга на половину периода. Длительность фронтов импульсов – 0,1мкс.

Трансформатор моделируется тремя связанными между собой индуктивностями. Эти индуктивности сначала добавляются в схему как независимые катушки с соответствующими индуктивностями. А потом вводится сердечник (*K* в списке *Passive Components*), обозначенный на схеме K1. В параметрах сердечника указывается, какие индуктивности он связывает (перечисляются через пробел L1 L1 L2) и задается коэффициент связи (в примере – 0,99), определяющий индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. В данной схеме используется линейный сердечник (рис. 1.13). Это опять-таки упрощающее допущение, не оказывающее существенного влияния на работу схемы, но существенно упрощающее расчеты. Для задания нелинейного сердечника достаточно выбрать его модель в списке, приведенном в окне параметров. А петлю гистерезиса выбранного материала можно посмотреть с помо-

щью команды Plot в это же окне. Стоит только обратить внимание, что по умолчанию в MicroCar индукция измеряется в Гауссах, а напряженность магнитного поля – в Эрстедах. Кроме того, после задания модели нелинейного сердечника величины индуктивностей интерпретируются программой как количества витков.

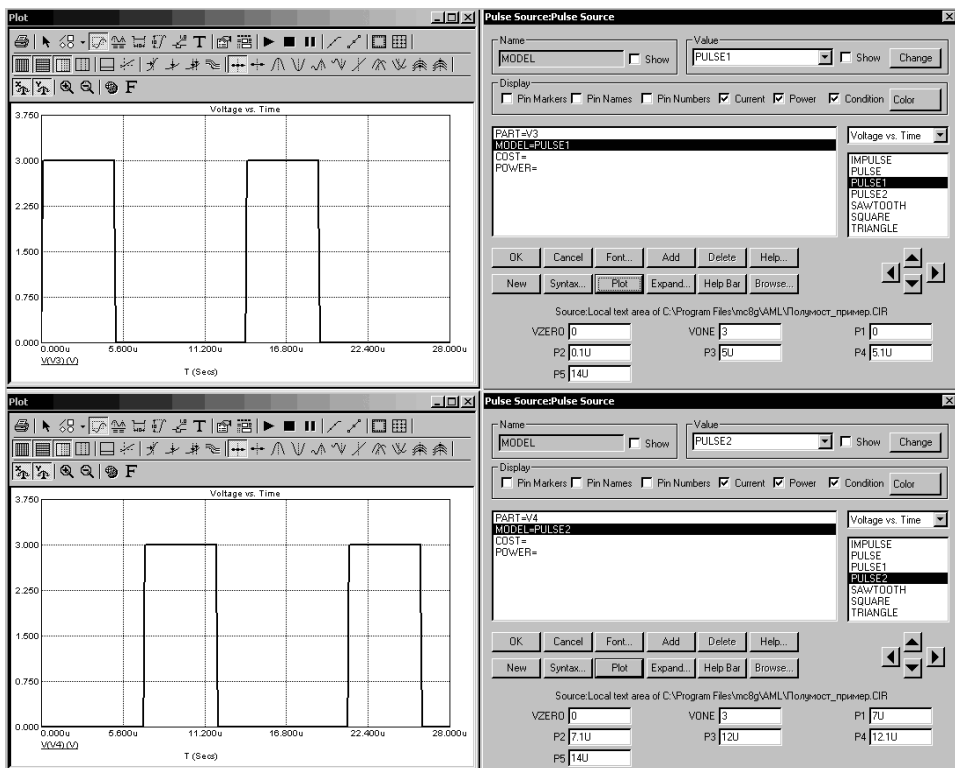


Рис. 1.12. Задание параметров импульсного генератора

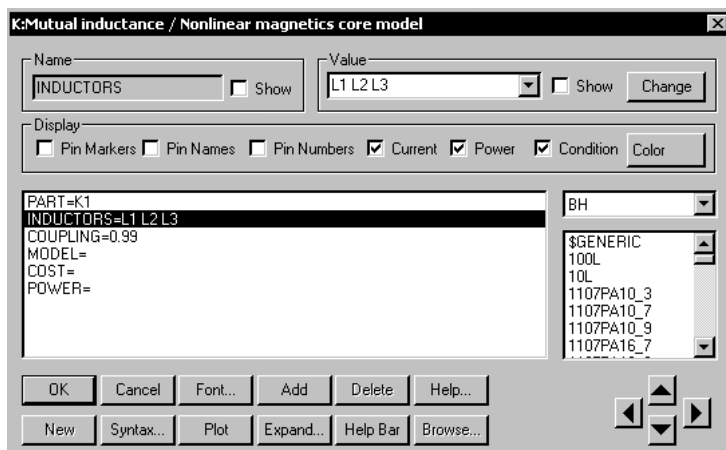


Рис. 1.13. Задание параметров линейного магнитного сердечника

При моделировании преобразовательных устройств типовой задачей анализа — выход на режим при включении. Рассмотрим напряжение на нагрузке $V(L3)$, ток дросселя выходного фильтра $I(L4)$ и ток первичной обмотки трансформатора $I(L1)$. На верхней диаграмме (рис. 1.14) — типичный колебательный процесс для выходного напряжения при наличии LC-фильтра. Токи имеют такую же огибающую.

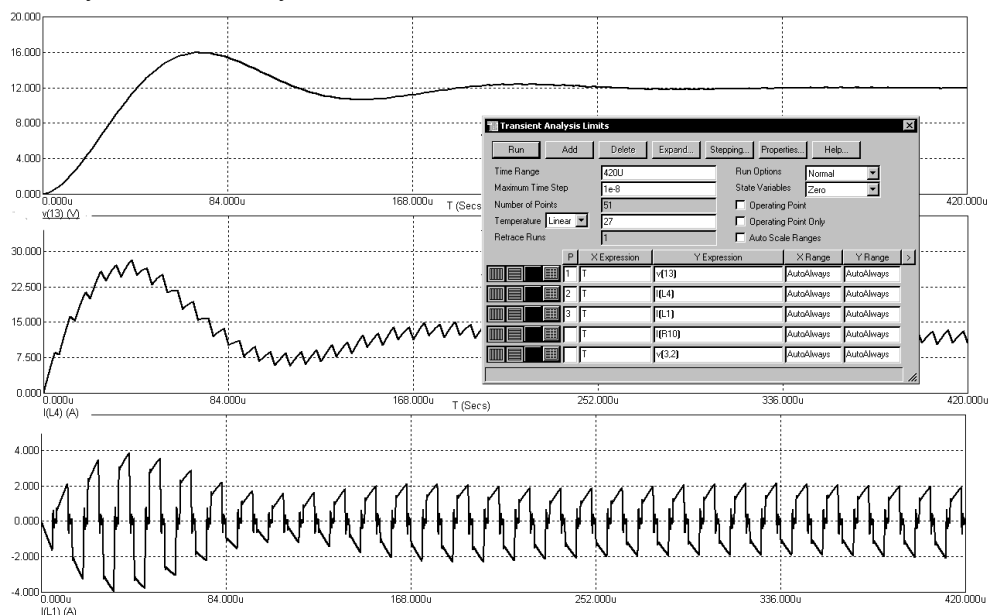


Рис. 1.14. Выход на режим при включении преобразователя

При моделировании преобразовательных устройств интерес представляют токи и напряжения ключевых компонентов в установившемся режиме. MicroCap предоставляет такую возможность, поскольку есть возможность запомнить результаты моделирования в конечной точке и использовать их в качестве начальных условий для продолжения моделирования. Т.е. можно рассчитать поведение преобразователя в течение, к примеру, 500 периодов тактовой частоты (за это время медленные колебательные процессы в силовой части завершатся), а потом посмотреть в крупном масштабе еще 2-3 периода работы для анализа поведения ключей. Сохранить результаты моделирования переходных процессов можно через меню командой *Transient>State Variables Editor>Write*. При этом будет создан файл с результатами анализа. Для того, чтобы использовать эти результаты в качестве начальных условий необходимо в окне задания параметров моделирования Limits задать в поле *State Variables* (начальные условия) не *Zero* (нулевые, установлены по умолчанию), а *Read* (взятые из файла). На рис. 1.15 приведены несколько диаграмм, построенных при ненулевых начальных условиях.

На первой диаграмме — ток и напряжение через диод $D1$. Следует обратить внимание, что масштаб по оси Y свой у каждого графика. Более подробно об этой возможности смотрите в соответствующем разделе книги. Знак «минус» при задании вывода напряжения на диоде ($-V(D1)$) «переворачива-

ет» его в один квадрант с током, что удобно для анализа коммутационных процессов.

На второй диаграмме – импульсная мощность на диоде (произведение мгновенного значения тока на мгновенное значение напряжения). Чаще всего применяется при анализе коммутационных потерь. Также может служить для проверки надежности устройства (всегда ли полупроводниковый прибор находится в области безопасной работы или нет).

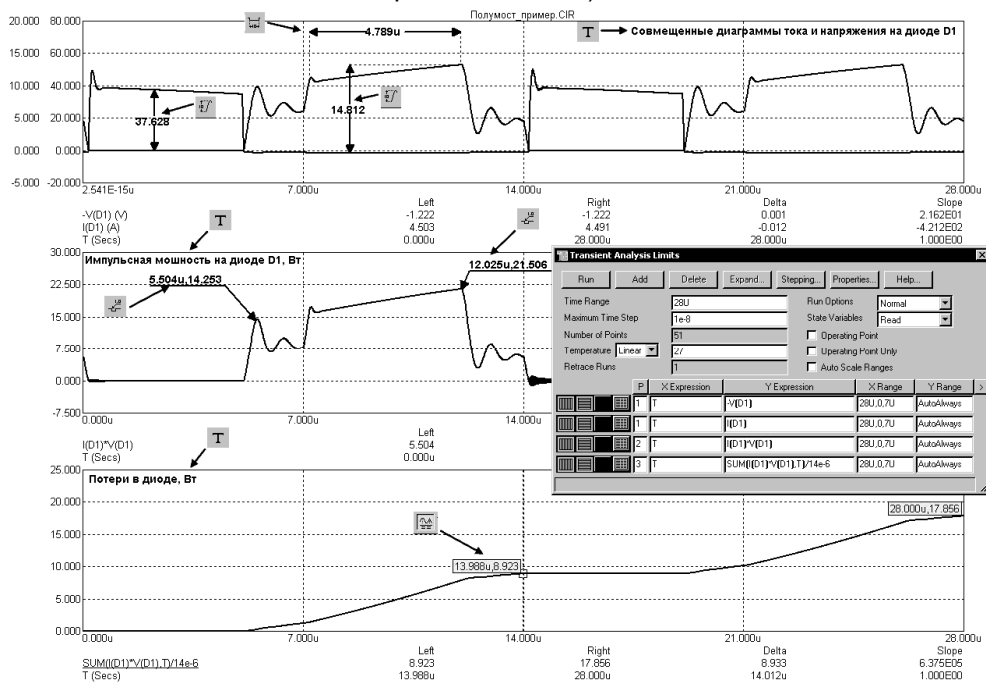


Рис. 1.15. Диаграммы процессов на диоде D1

На третьей диаграмме – проинтегрированное значение произведения тока на напряжение, отнесенное к периоду коммутации. Значение этой кривой в конце первого периода коммутации (14 мкс) соответствует мощности потерь в диоде (8,92 Вт). Более точно потери можно посчитать, взяв значение за несколько периодов и разделив на число периодов. Усредненная мощность потерь позволяет рассчитывать нагрев прибора, а также КПД устройства (если просуммировать потери во всех компонентах схемы).

Кроме того, на рис. 1.15 представлены дополнительные возможности обработки результатов расчетов, предоставляемые MicroCap-8. На полученных диаграммах можно разместить текстовые надписи, посмотреть значения в заданной точке или между двумя точками по любой из осей. Эти возможности вызываются пиктограммами, расположенными в левой части верхней панели (на рисунке эти пиктограммы размещены рядом с выполняемыми ими функциями).

1.4. Основные правила моделирования электронных устройств с использованием программ схемотехнического анализа

Характерной ошибкой при анализе электронных схем с использованием программ схемотехнического анализа (в частности MicroCap) является «лововой» подход к моделированию. При этом принципиальная схема устройства (подчас – достаточно сложного) механически переносится в редактор схем, затем лихорадочно ищутся модели компонентов или их аналоги (подобных вопросов полно в любом Internet-форуме по электронике). Но, к удивлению новичков, при попытке запустить анализ ничего похожего на ожидаемые режимы работы не получается. Или же появляется сообщение о какой-нибудь ошибке. Сразу же – разочарование. Ведь все компоненты и их номиналы скопированы с рабочей схемы (из книги, журнала и т.п.). А схема не работает. И все попытки определить причину такого поведения программы схемотехнического анализа обычно заканчиваются неудачей. После этого выносятся вердикт – программа никуда не годна. И начинается поиск новой версии или другой, более «продвинутой» программы. Хотя на самом деле причина неудач банальна – незнание принципов работы систем схемотехнического анализа, алгоритмов расчета и используемых моделей компонентов. И, как следствие, непонимание ограничений, которые необходимо учитывать при моделировании электронных устройств.

Современные версии программы MicroCap позволяют моделировать достаточно сложные схемы. Это – большой плюс для опытных пользователей, но ловушка для новичков. У них возникает желание сразу промоделировать электронное устройство именно в том виде, в каком оно изображено на принципиальной схеме. Но это обычно удается только для очень простых случаев. А в остальных – необходимо сначала немного подумать и отсеять лишнее. Ведь каждый компонент усложняет расчетную модель, увеличивает вероятность ошибки и усложняет отладку схем. Да, именно отладку. Очень многие не придают значения тому, что проводят **имитационное** моделирование. И поведение расчетной модели имитирует поведение реальной схемы во всем. В том числе – и в процессе настройки.

Странно, но почти ни у кого не вызывает удивление тот факт, что сколько-нибудь сложная аналоговая схема сразу после сборки как правило не работает и требует настройки (проверки и подгонки режимов). А что такой же подгонки и проверки требует расчетная модель – почему-то вызывает удивление.

Авторы книги используют программы семейства MicroCap достаточно давно (начиная с MicroCap-II). Естественные ограничения и несовершенство младших версий позволили за эти годы наработать ряд приемов, которые позволяли выполнять достаточно сложные расчеты даже при скудных возможностях программы (в свое время, при проведении моделирования для кандидатской диссертации вполне хватило учебной (ограниченной) версии MicroCap-IV) . Эти приемы актуальны и при использовании современных версий. Они намного упрощают освоение программ схемотехнического анализа и получения практических навыков работы с ними, а также позволяют сэкономить массу времени, которое начинающие пользователи тратят на борьбу с характерными ошибками. Кроме того, использование помимо компьютера

еще и собственной головы позволяет лучше разобраться в принципах работы моделируемых электронных устройств.

Общие правила моделирования достаточно просты. Необходимо четко осознать, что моделирование электронных устройств с использованием пакетов программ схемотехнического анализа включает в себя несколько этапов:

- определение задач моделирования;
- анализ моделируемой схемы, разложение ее на функциональные узлы и выбор упрощающих допущений;
- построение модели анализируемого устройства с учетом упрощающих допущений;
- проведение расчета по построенной модели и анализ полученных результатов;
- максимально возможное приближение модели к схеме анализируемого устройства, получение окончательных результатов и их анализ.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

Определение задачи моделирования

Моделирование электронного устройства подразумевает, что это устройство предварительно разработано и проведен расчет его компонентов инженерными средствами. Поэтому в задачи моделирования могут входить:

- Подтверждение правильности проведенных инженерных расчетов и проверка работоспособности устройства;
- Исследование чувствительности к разбросу параметров компонентов;
- Исследование нестационарных и аварийных режимов работы
- Исследование температурной неустойчивости устройства;
- Подбор корректирующих цепей.

Анализ моделируемой схемы, разложение ее на функциональные узлы и выбор упрощающих допущений

Как уже отмечалось выше, большинство электронных устройств слишком сложны для непосредственного анализа. Если в качестве модели использовать полную принципиальную схему, время расчета становится неоправданно большим, либо такой расчет не удастся провести вовсе. Однако, анализ любой схемы показывает, что она состоит из основных и вспомогательных функциональных узлов. Вспомогательные узлы обеспечивают заданные режимы работы основных узлов и моделирование их работы нецелесообразно (по крайней мере – на первом этапе). К ним относятся цепи питания, источники тока и напряжения смещения, задающие генераторы и т.п. Как правило, все эти узлы целиком целесообразно заменить стандартными моделями MicroCap.

Наиболее характерные примеры упрощенных моделей:

- Источник питания – *battery*
- Источник напряжения смещения (стабилитрон, прямосмещенный диод) – *battery*
- Источник тока – *Isource*
- Задающий генератор (прямоугольник, пила) — *pulse source*
- Сеть промышленной частоты (220В, 50Гц) — *sine source*

- Понижающий сетевой трансформатор — *sine source*
- Варикап – *capacitor*
- Компаратор, транзисторный ключ – *switch*
- Операционный усилитель с ограничением — *function sources*

Построение модели анализируемого устройства с учетом упрощающих допущений

Используя рассмотренные выше допущения, строится упрощенная модель анализируемого устройства. Распространенной ошибкой является построение сразу полной модели. Если моделируемое устройство достаточно сложное, то для построения работоспособной модели целесообразно пользоваться методом поблочной настройки, используемым для наладки реальных электронных устройств. Суть его, в применении к построению расчетной модели, состоит в том, что сначала добиваются работоспособности отдельных узлов и лишь потом объединяют их вместе. Например, при анализе усилителя мощности целесообразно сначала промоделировать входной каскад на ОУ (не забыв соответствующим образом замкнуть обратную связь), затем подсоединить выходные каскады, подобрать напряжение смещения этих каскадов и лишь затем завести общую обратную связь и добавить цепи термостабилизации, коррекции и защиты по току. Пренебрежение этим правилом иногда сильно затрудняет получение работоспособной модели.

Кроме того, не стоит забывать, что поиск моделей конкретных компонентов (например, точной модели какого-нибудь транзистора, используемого в реальной схеме) в подавляющем большинстве случаев является нецелесообразным. Задание в стандартной модели того же транзистора основных справочных параметров практически гарантированно дает вполне приемлемый результат (если, конечно, целью моделирования не является исследование поведения конкретного транзистора в данной схеме).

Вообще же для первичного анализа целесообразно применять базовые модели компонентов. Но, в то же время – необходимо знать их особенности. К примеру, отсутствие насыщения у простейшей модели операционного усилителя приведет к неработоспособности ряда схем, в которых используется именно этот режим работы компонента.

Проведение расчета по построенной модели и анализ полученных результатов

После получения упрощенной модели проводятся расчеты в соответствии с задачами моделирования. На этом этапе анализ полученных результатов проводится для того, чтобы проверить правомерность принятых упрощающих допущений и, если нужно, провести усложнение модели. На этом же этапе проводится точный подбор цепей смещения и коррекции, а также статистический анализ и определение чувствительности к параметрам компонентов.

Максимально возможное приближение модели к схеме анализируемого устройства, получение окончательных результатов и их анализ

На этом этапе проводят окончательный расчет по скорректированной модели, получают все необходимые характеристики и на основе их анализа делают окончательные выводы.