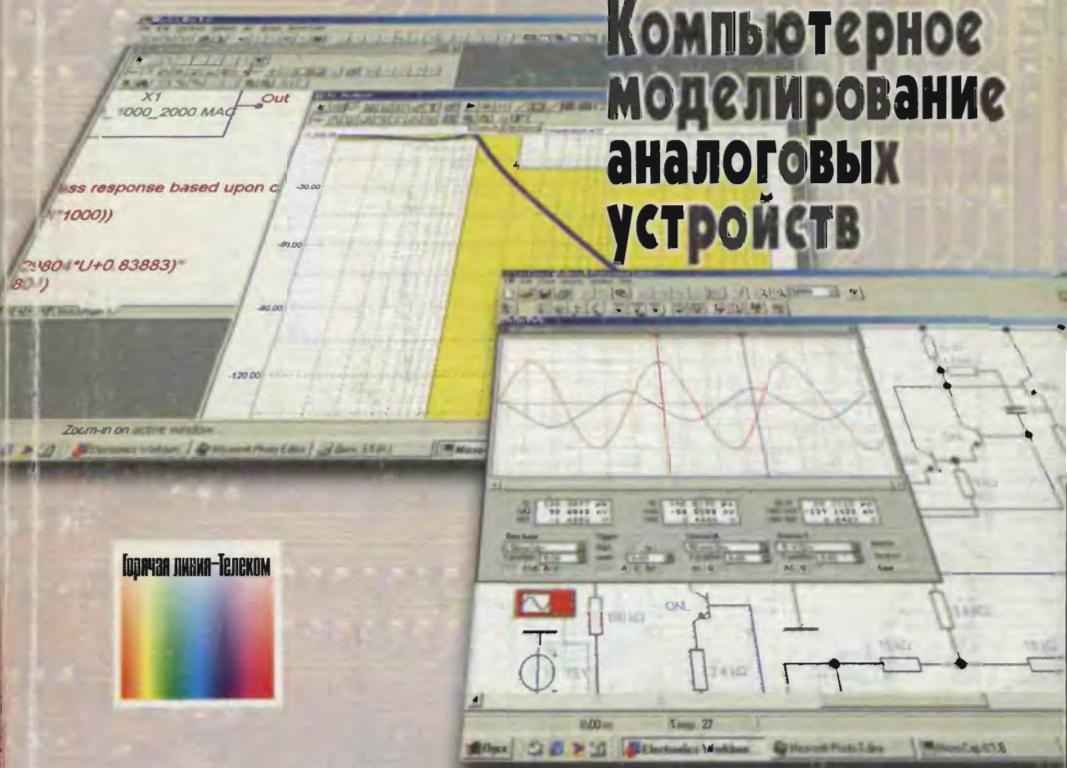


Г.А.Кардашев



ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Компьютерное
моделирование
аналоговых
устройств



Борис Линник - Телеком

Массовая
радио
библиотека



Г.А.Кардашев

ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Компьютерное
моделирование
аналоговых
устройств

Москва

Горячая линия-Телеком
2002

ББК 32.844

K21

Кардашев Г.А.

K21 Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств. – М.: Горячая линия –Телеком, 2002. – 260 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; 1251).

ISBN 5-93517-067-1.

Дается введение в схемотехническое моделирование аналоговых электронных устройств на компьютере

Моделирование выполняется без формул на языке схем и графиков с использованием наиболее простых и популярных программ Electronics Workbench и Micro-Cap. Подробно рассказывается методика компьютерного моделирования более 150 простейших схем, и приводятся соответствующие результаты в виде screen shot (экранных снимков). Изложение сопровождается необходимыми советами по применению программ

Поясняется смысл используемых терминов. Разбираются парадоксы, возникающие при моделировании реальных устройств

Рассматривается компьютерное моделирование ряда аналоговых устройств, которые могут быть изготовлены самостоятельно из электронных наборов и модулей комплектов «Мастер КИТ»

Для широкого круга читателей

ББК 32.844.19

ISBN 5-93517-067-1

© Кардашев Г А , 2002

© Оформление издательства
«Горячая линия–Телеком», 2002

Предисловие

Виртуальная реальность (VR) позволит нам «быть» там, где иначе мы никогда бы не побывали, и «делать» то, что иначе мы никогда бы не сделали.

Билл Гейтс. «Дорога в будущее»

«Компьютерная революция» придала новый импульс интересу к электронике. Сталкиваясь буквально на каждом шагу с электронными устройствами, люди, из-за силы природной любознательности, хотят познать, как это устроено и задумываются над тем, как это сделать самим. Они проводят многие часы за компьютером, который стал для них в буквальном смысле окном («Windows») в окружающий мир («WWW»). Поэтому «сам бог велел» использовать компьютер для ответа на эти вопросы.

Данная книга не является ни систематическим учебником по электронике, ни справочником по компьютерным программам. Цель книги – вовлечение радиолюбителей или людей, приобщющихся к этому хобби, в познавательно-обучающую игру по неформальному освоению современной электроники и развитию творческих начал. Предполагается, что читатели имеют начальные навыки работы на персональном компьютере в «Windows» и имеют доступ к компьютеру.

В книге рассмотрены методы компьютерного моделирования электронных аналоговых устройств и их результаты в виде screen shot (экранных снимков). Компьютерная схемотехника, как основа виртуальной электроники, в программном обеспечении является разновидностью САПР (Систем Автоматизированного ПРОектирования) электронных устройств.

«Естественный отбор» привел к выбору двух наиболее популярных, «легких» и доступных программ: Electronics Worcbench («Электронная лаборатория») и Micro-Cap (Microcomputer Circuit Analysis Program – «Программа анализа схем на микрокомпьютерах»). Далее будем называть их сокращенно программа EWB и MC соответственно, выделяя полуширинным шрифтом для более быстрой навигации в тексте. Обе программы имеют свои достоинства и недостатки и продолжают совершенствоваться. Для первого знакомства подойдет любая программа и любая версия. Обычно эти программы рассматриваются порознь, а здесь, как говорится, «два в одном». Рассматриваемые примеры, как правило, задублирова-

ны, но это не следует трактовать как сопоставительное тестирование программ, так как ни одна из них не была использована в полном объеме. При установке программ лучше выбрать Европейский стандарт DIN, к которому ближе наши ГОСТы. Можно работать и в американских обозначениях стандарта ANSI.

Изложение сопровождается советами, позволяющими избежать возможных ошибок и эффективно использовать программы. Для приобретения устойчивых навыков моделирования рекомендуется взять любой некомпьютерный учебник или задачник по физике, электронике, радиотехнике и в виртуальном виде представить работу помещенных там схем или устройств.

К сожалению, черно-белая графика книги нигде кроме обложки не позволяет в полном объеме продемонстрировать красочную цветовую палитру виртуального электронного мира. Надеюсь, все же, что читатели будут работать с книгой не «всухую», а параллельно с набором схем на компьютере. Тогда они обнаружат в программах кнопки Color (цвет) и смогут раскрасить проводники, лучи осциллографа, фон и шрифты на свой вкус. Это надо сделать обязательно, поскольку книга написана без формул языком схем и графиков, а отсутствие этой компоненты виртуального мира с необходимостью лишает его полной гармонии.

Очень желательно периодически вылезать из виртуального «зазеркалья» и окунаться в реальное «железо»: почаше чередовать «мышь» и «паяльник» в своей руке. В качестве базового варианта для самостоятельного изготовления устройств предлагается использовать известные электронные наборы и модули, называемые «Мастер КИТ». (Слово «КИТ» происходит от английского *kit* – набор или комплект деталей.) В мировой радиолюбительской практике использование подобных «КИТов», распространяемых в виде почтовых посылок является обычным делом. Как только появлялось какое-либо новое устройство, будь то лазер или персональный компьютер, так, буквально тут же, следовали предложения с соответствующими «КИТами». Теперь это стало доступно и в России. В данной книге рассматривается моделирование некоторых типовых устройств из ассортимента «Мастер КИТ», сопровождаемое ссылкой на номер комплекта в каталоге и пометой КИТ.

Итак, берем с собой эту книгу, «Компьютер» и «Паяльник». Пусть нас сопровождает «Мастер КИТ».

«Дорогу осилит идущий».

1. ВИРТУАЛЬНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

1.1. Моделирование

Окончательной моделью кошки является, конечно, другая кошка, рожденная от еще, одной кошки или синтезированная в лаборатории.

Н. Винер

С первым пробуждением сознания человек интуитивно начинает строить различные модели окружающей его действительности. Выбирая главные и наиболее характерные признаки, он отличает предметы горячие от холодных, съедобные от не съедобных и т. п. Разительный скачок делает ребенок, замечая схожесть и различия между игрушечной собачкой и реальной, рисунком домика и реальным домом. Образование придает этому процессу систематичность и научную основу.

Слово «модель» имеет франко-итальянское корни (*modèle*-*modello*) и означает образец. Это может быть макет здания, предмет изображения в искусстве (картина, скульптура).

Модельными представлениями пользовались уже античные ученые: Демокрит, Эпикур, Архимед, Лукреций и другие. Леонардо да Винчи рекомендовал такой метод моделирования: «Напиши о плавании под водой – и получишь летание птицы по воздуху». С моделированием мы встречаемся буквально «на каждом шагу» – даже в самой этой фразе! Любое сопоставление предметов и их «поведения» (аналогии, подобие) несет в себе признаки моделирования. Интересным примером могут служить поэтические метафоры, т. е. использование слов в их переносном значении, смысле. Например, «нос корабля», для которого образной моделью послужил нос человека.

Построение модели – это процесс абстрагирования (формализации). Модель – это не реальность, а плод воображения человека (на самом деле одна реальность заменяется другой). Модель выступает в роли заменителя объекта, который отражает определенную существенную совокупность знаний о нем. По сути, эти требования сродни признакам, которые древние считали мудростью: учитывать главные свойства, пренебрегать второстепенными и, наконец, уметь отделить главные свойства от второстепенных. Вся «хитрость» при построении модели состоит в том, что для получе-

ния решения конкретной задачи модель должна быть достаточно простой, и в то же время она должна отражать существо этой задачи, чтобы найденные с ее помощью результаты имели смысл. Точная модель объекта означает тождество двух объектов, т. е. утрату сущности метода моделирования.

Порой, даже очень сложные объекты и явления удается описать очень простыми и наглядными моделями. Например, небесная механика Ньютона-Кеплера основывается на модели материальной точки для описания движения гигантских планет. Распад атомного ядра Н. Бор в 30-е годы теоретически описал, всего лишь как деление одной большой «капли» на две части. В так называемой капельной модели ядра им было введено понятие поверхностного натяжения протонно-нейтронной жидкости. Это позволило рассчитать энергию реакции деления ядер урана до ее практической реализации. Несомненно, что для создания столь простых и в тоже время эффективных моделей требуются и большие знания и незаурядная научная интуиция. Интересно в связи с этим отметить, что хотя Н. Бор и был физиком-теоретиком, но две его самые первые работы, выполненные еще в начале прошлого века, были экспериментальными. В этих работах Н. Бор скрупулезно исследовал поверхностное натяжение воды...

Хорошо известно, что различные колебательные и волновые явления широко распространены и имеют между собой большие и глубоко идущие аналогии. Электромагнитные колебания и волны изучены и описаны достаточно хорошо, кроме того, многие явления собственно и имеют электромагнитную природу. Эти обстоятельства послужили основанием для создания разнообразных электромагнитных моделей.

Иногда главные особенности явлений опять-таки укладываются в рамки очень простых моделей. Скажем, закономерности поведения простейшего колебательного контура аналогичны закономерностям, которыми описывают такие явление как оптическая дисперсия, благодаря которой мы можем любоваться радугой, и даже познать распространение нервных импульсов в аксонах.

Основное противоречие при разработке моделей технических объектов заключается в том, что чем проще модель, тем быстрее и с меньшими затратами она может быть выполнена. Но чем проще модель (если это только не та гениальная простота, о которой было сказано выше), тем меньше ее соответствие, исследуемому реальному объекту, больше вероятность ошибок при ее использовании. Напротив, чем сложнее модель, тем больше времени необходимо для ее разработки, изготовления, наладки и обслуживания.

Как пошутил один ученый: «Слишком хорошая модель бесплодна, слишком отдаленная модель вводит в заблуждение».

Модели разделяются на два больших класса – мысленные (описательные) и материальные. Мысленные (идеальные, воображаемые) модели существуют лишь в сознании человека и отражают объективную реальность. Здесь моделируемый объект описывается с помощью слов, графического изображения, математических зависимостей и т. д. К таким моделям можно соответственно отнести литературу, изобразительное искусство и черчение, математическое моделирование. Истинность соответствия этих моделей объекту, как и любых других, проверяется практикой. Разумеется, сами по себе математические формулы и уравнения еще не являются моделями. Они становятся моделями только тогда, когда отражают какое-либо физическое явление. Из такой модели путем математических рассуждений можно сделать новые выводы о физических явлениях.

Материальные (вещественные) модели существуют объективно, вне сознания, так как они воплощены в дереве, металле, пластмассе, в блоках электронных вычислительных машин и т. д.

Еще несколько десятков лет тому назад моделирование различных проблем на ЭВМ стояло в одном ряду с остальными методами, теперь же оно стоит на первом месте, занимая все новые и новые области, внося новые подходы практически во все виды человеческой деятельности.

Возможности компьютерного моделирования практически неисчерпаемы. «С улучшением качества визуальных и звуковых элементов удастся точнее моделировать реальность во всех ее проявлениях» – пишет Билл Гейтс в книге «Дорога в будущее», вводя понятие виртуальной реальности.

«Виртуальная реальность» с точки зрения русского языка оксюморон, т. е. сочетание слов, взаимно исключающих друг друга по смыслу (как, например, «горячий снег»). Действительно, слово виртуальный происходит от латинского *virtualis* – возможный, воображаемый, а реальный соответственно от *realis* – вещественный, реальный. Однако компьютер, дополненный мультимедийными средствами и средствами сбора информации и т. п. периферии, превращается в «реальную виртуальность».

Применительно к разработке радиоэлектронной аппаратуры существуют и продолжают создаваться разнообразные Системы Автоматизированного Проектирования – САПР (в английском варианте: Computer Aided Design – CAD). Наиболее развитые САПР представляют собой интегрированные программные комплексы для сквозного проектирования аналоговых, цифровых и смешан-

ных аналого-цифровых устройств, синтеза устройств программируемой логики и аналоговых фильтров.

Проектирование начинается с ввода принципиальной схемы, ее моделирования и оптимизации и заканчивается созданием управляющих файлов для программаторов, разработкой печатных плат и выводом управляющих файлов для фотоплоттеров и сверлильных станков.

Отдельные элементы подобных систем могут быть с успехом использованы радиолюбителями и в целях обучения. Прежде всего, это относится к *схемотехническому моделированию*, позволяющему погрузиться в виртуальный электронный мир не менее увлекательный, чем распространенные компьютерные игры.

1.2. Цепи и схемы

Турист, приезжающий в чужую страну, не зная ее языка, получает лишь поверхностное представление об обычаях и характере ее народа. Его познания становятся более совершенными, если он имеет возможность побеседовать с окружающими его людьми. То же происходит и с теми, кто намерен совершить путешествие в область синтеза электрических цепей.

Н. Балабанян. Синтез электрических цепей

Основой макроскопических (не затрагивающих внутреннее микроскопическое строение вещества) моделей электроники служит электродинамика Максвелла. На этом уровне моделирования процессы, происходящие в электронных устройствах, связаны с распространением в них электромагнитных волн.

Однако, если характерные размеры элементов устройств много меньше длин электромагнитных волн в этих процессах, переходят к упрощенной модели в виде цепей.

Приняв скорость распространения электромагнитных волн равной 300 000 км/с и граничную частоту колебаний 100 МГц, получаем длину волны 3 м. Поскольку рассматриваемые устройства имеют много меньшие размеры, то принятное допущение можно считать приемлемым. Не следует все же забывать, что надо перейти к другой модели при росте частоты, если только он не сопровождается одновременным эквивалентным уменьшением характерных размеров.

Переход к цепям позволяет не рассматривать волновые процессы в пространстве (и соответствующие математические зависимости от координат), а учитывать зависимости только от време-

ни. Это сильно упрощает описание явлений, так как основными переменными вместо векторов напряженности и плотности тока становятся такие скалярные алгебраические величины, как напряжение и ток, зависящие в общем случае только от времени.

Теперь, в рамках принятых допущений, конкретное электронное устройство может быть представлено моделью в виде цепи и соответствующей ей схемной моделью.

Слово схема происходит от греческого *schema*, означающего образ, вид. В электронике под схемой подразумевают чертеж, на котором с помощью специальных, условных графических обозначений (УГО), показывается состав и взаимосвязь элементов различных устройств.

В зависимости от назначения различают схемы структурные, принципиальные, монтажные и др. В нашем предполагаемом путешествии схема это своеобразная карта дорог, поселков и весел увлекательной страны «Электроника».

В инженерной практике графический язык чертежей и схем, является одним из основных при проектировании новых устройств, он дополняет, а иногда и заменяет сложные аналитические выкладки. Возможно, это связано с асимметрией человеческого мозга, обрабатывающего такого рода информацию правым полушарием. Известно, что зрение – самое сложное и тонкое из всех чувств. Поэтому эстетическая красота играет решающую роль во многих творческих процессах. Красота схем и графиков также неотъемлемое свойство при их восприятии и последующей оценке. Самодостаточность же геометрической информации оценили еще древние греки: изображая чертеж к теореме они зачастую не снабжали его никаким комментарием, кроме одного – «Смотри!» Сколь информативны в этом смысле знаменитые «пифагоровы штаны». Этот опыт древних греков подходит и к электронным схемам: имеющий глаза, да видит...

В схемотехнике изучаются принципы и методы анализа, синтеза и реализации электрических схем устройств, отвечающих заданным характеристикам. Здесь схемы выступают в роли моделей электронных устройств и систем. Поскольку подобные схемы при анализе заменяют само устройство, их называют также схемами замещения. Зачастую отображения элементов схем замещения и компонентов, поведение которых они моделируют, совпадают. Тогда схема одновременно является и принципиальной.

В микроэлектронике произошло как бы слияние графики схем и изделий: появились интегральные схемы, микросхемы и т. п. Схемотехнический раздел микроэлектроники носит название микросхемотехники. Микросхемотехника (интегральная схемотехника)

охватывает исследования и разработку схемотехнических решений (электрических и структурных схем), используемых в интегральных микросхемах и в электронной аппаратуре на их основе. Здесь многие понятия, например такие, как компонент и элемент, схема и другие становятся многозначными. Смысл этих понятий и терминов зависит от контекста.

Когда-то для радиоинженеров вычерчивание схем устройств было сущей катогорией, поэтому они всячески пытались облегчить этот труд: упрощали символы условных графических обозначений, придумывали различные трафареты. В конце 60-х годов XX века американский изобретатель Сессиль Эффингер даже специально реконструировал печатающую машинку, поставив вместо литер букв изображения электро-радиокомпонентов. Теперь же многочисленные схемотехнические САПР позволяют в интерактивном режиме реализовать не только графическую часть, а весь процесс разработки новых радиоэлектронных устройств.

Основу схемотехники составляет теория электрических цепей. Электрическая цепь представляет собой совокупность соединенных определенным образом элементов, устройств и объектов, образующих путь для прохождения электрического тока. Электронные цепи, содержащие электронные компоненты (диоды, транзисторы и т. п.), являются частным случаем таких цепей.

Любая электрическая цепь может быть представлена в виде схемы (обратное утверждение справедливо далеко не всегда).

Для составления схемы, прежде всего, необходимо представить в виде схемных моделирующих элементов каждый компонент цепи, а затем соединить их соответствующим образом. Компоненты цепей и соответственно их схемные модели имеют определенные характеристики (параметры, свойства).

Анализ поведения схемы (модели) сопоставляется с результатами измерений режимов работы цепи (объекта) и делается вывод об их тождественности (или на языке специалистов адекватности модели). При необходимости в модель вносятся уточнения и, наоборот, по результатам моделирования изменяют саму цепь, улучшая ее характеристики. При проектировании новых устройств подобный процесс носит итеративный (повторяющийся) характер.

В программе **EWB** результаты моделирования поведения различных схем показываются в форме показаний на дисплеях виртуальных схемных электроизмерительных приборов или наблюдений временных зависимостей на экране виртуального схемного осциллографа. Здесь виртуальные приборы «включены» в виртуальную схему и поэтому названы нами схемными для отличия от другого случая, когда компьютер снабжается платой сбора данных, а на

его экране эмулируется (воспроизводится) лицевая панель реального прибора. Поскольку физически сам прибор и различные его органы управления отсутствуют, то такие системы называют виртуальными измерительными приборами. Их функция – реальные измерения в реальных цепях. Впрочем, далее, если из текста ясно, о каких именно приборах идет речь: схемных или реальных, то соответствующее прилагательное для краткости вообще опускается.

В программе **МС** подобная имитация приборов отсутствует, и результаты моделирования представляются в иной форме.

Совет (EWB и МС)

В обеих программах, к работе с которыми мы приступаем, существует возможность обратиться к помощи (Help) – не стесняйтесь ею пользоваться. Она хоть и на английском языке, но иногда действительно помогает. Кроме того, полезно просмотреть демонстрационные файлы со схемами, содержащимися в библиотеках программ. В виртуальном мире допустим и «метод тыка» – пробуйте все виртуальные кнопки, которые видите на экране: в отличие от реальности, ничего особенно страшного не произойдет. В случае, когда программа задает вопрос на подтверждение команд, надо все же задуматься и, вообще-то, лучше осуществлять обдуманные действия и анализировать получаемые результаты.

1.3. Схемы на компьютере

...как бы мне хотелось попасть в Зазеркалье! Там должно быть столько всяких чудес! Давай играть, будто мы туда можем пройти! Вдруг стекло станет тонким, как паутинка, и мы шагнем сквозь него! Посмотри-ка, оно и правда, пает, как туман. Пройти через него теперь совсем не трудно...

Льюис Кэрролл. Алиса в Зазеркалье

Разработка виртуальной модели

Начнем с простейшего устройства. Не думаю, чтобы кто-нибудь из читателей не открывал фонарик, ну хотя бы для того, чтобы сменить в нем батарейку или лампочку.

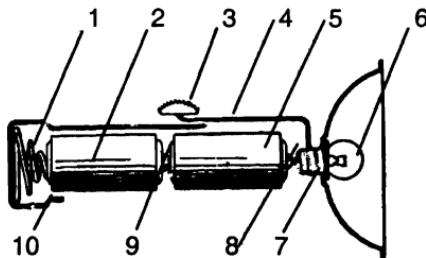


Рис. 1. Электрический фонарик

Электрическая цепь простейшего фонарика (рис. 1) состоит из электрохимического источника тока в виде двух последовательно соединенных гальванических элементов (батареи) или аккумуляторных элементов (аккумуляторов) 2 и 5, лампочки 6 и выключателя 3. Соединения осуществляются последовательно проводниками (пружинными контактами 1 и 4, патроном 7 для лампочки и корпусом 10, если он выполнен из металла).

Составим принципиальную схему фонарика (рис. 2). Для этого воспользуемся программой EWB. В этой программе реализован стандартный многооконный интерфейс с ниспадающими и разворачивающимися меню.

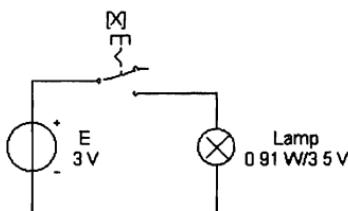


Рис. 2. Принципиальная схема фонарика (EWB)

Откроем на панели компонентов пиктограмму группы Source

(источники) и выберем в нем Battery (батарея). Удерживая ЛКМ (левую кнопку мыши) в нажатом состоянии, перетаскиваем изображение батареи в левую часть рабочей области экрана и отпускаем ЛКМ (эта процедура далее называется буксировкой).

Затем аналогично переносим в центр экрана из раздела

Basic (основные компоненты) Switch (переключатель) и из

  раздела Indicators (индикаторы) компонент Bulb (лампа накаливания), который помещаем в правую часть экрана. На этом первая часть «строительства» схемы закончена: «рабочие материалы доставлены на стройплощадку».

Упорядочим расположение выбранных компонентов на экране, если оно не соответствует воображаемой схеме. Для этого ЛКМ выделяем необходимый компонент и перемещаем (буксируем) его в нужное положение. Возможно, на этом этапе, потребуется изменить пространственную ориентацию компонентов. В данном конкретном случае удобнее повернуть лампу на 90° против часовой стрелки: выделим лампу (однократным нажатием ЛКМ), при этом она примет активный (красный) вид и нажмем на кнопку (пикто-

 грамму) Rotate (вращение) горизонтального ряда инструментов. Эту же операцию можно провести с клавиатуры, выделив лампу и нажав Control+R (разумеется, находясь при английской раскладке клавиатуры – APR) или, после выделения компонента, войдя в меню Circuit (схема) и воспользовавшись командой Rotate.

Далее выполняем соединения компонентов. Лучше всего, как и при сборке реальных цепей, начать с положительного полюса «+» батареи. Устанавливаем стрелку курсора в верхнюю часть вывода: там появляется жирная черная точка – символ неразъемного соединения. Нажимаем ЛКМ и кратчайшим путем ведем линию-резинку к крайнему левому выводу переключателя. После того как там возникнет символ соединения, отпускаем ЛКМ.

Совет Для успешного позиционирования мест соединений удобнее работать при больших масштабах изображения, например 100%, начертив часть схемы, можно возвращаться в более удобный режим скажем 80%. Не старайтесь располагать соединительные узлы близко к компонентам. После того, как соединение выполнено узел, компонент или проводник можно выделить и переместить стрелками на клавиатуре в нужное место.

На экране возникает изображение соединительного проводника в виде двух ортогональных отрезков. Аналогично соединяем любой правый вывод переключателя с верхним выводом лампы и ее нижний вывод с отрицательным полюсом «–» батареи.

Общий чертеж принципиальной схемы выполнен (см. рис. 2), и теперь надо отредактировать параметры (свойства) компонентов.

Начинаем с батареи. Дважды щелкаем на ней ЛКМ. На экране появляется подменю (рис. 3) Battery Properties (свойства батареи). Выбираем в этом подменю Value (значение) и набираем в соответствующем окошке цифру 3, оставляя единицу измерения V, т. е. Вольт. Затем выделяем Label (обозначения) и печатаем буквенный символ ЭДС Е и подтверждаем сделанный выбор свойств нажатием на кнопку «OK».

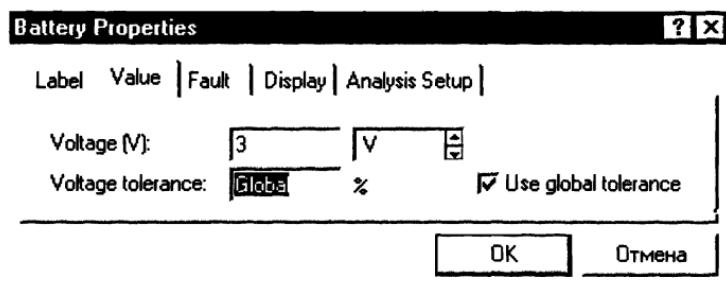


Рис. 3. Диалоговое окно выбора параметров батареи (EWB)

Переходим к лампе. Действуя аналогично предыдущему, выделяем лампу, вызывая диалоговое окно для редактирования ее параметров. Набираем в окошке Label «Lamp». Устанавливаем в позиции Value PMAX (максимальная мощность) 0,91 W (Ватт), что соответствует произведению номинального напряжения конкретной реальной лампочки 3,5 В на ее номинальный ток 0,26 А (эти параметры указаны на ее цоколе). Здесь же набираем в окошке VMAX (максимальное напряжение) 3,5.

Совет Следите за разделителем целой и дробной части (EWB и MC) десятичного числа: в обеих программах это точка. Обращайте внимание на единицы измерения и при необходимости переходите к кратным, например kW (кВт), mV (мВ) и т. п.

Выбор численного значения параметров можно сделать для другой конкретной или воображаемой батареи и лампочки. При необходимости можно, действуя аналогично, переименовать позиционное обозначение переключателя, перейдя соответственно к другой клавише, которая им управляет, например [X] вместо [Space], принимаемой по умолчанию.

Проверка работоспособности собранной схемы

Устанавливаем в виртуальном выключателе Activate simulation



(включение моделирования), размещенному в верхней правом части панели инструментов указатель на I (In – включено), и делаем щелчок ЛКМ. Клавиша этого выключателя переходит в положение «включено». Прерывание моделирования производит-



ся нажатием на расположенную ниже кнопку «Pause» (пауза), повторное нажатие отменяет эту команду. Выключение моделирования производится нажатием на O (Out – выключено). Эти же процедуры можно осуществить и из меню Analysis: Activate, Pause, Stop или с клавиатуры: «Control+G», «F9», «Control+T».

После запуска моделирования переводим выключатель [X] на схеме (рис. 2) в положение «включено» (нажав на клавишу буквы X при АРК) и наблюдаем, как лампочка окрашивается в черный цвет (имитация ее горения). Нажимая несколько раз на [X], как бы включаем и выключаем фонарик. Сохраним этот файл для дальнейшей работы.

Теперь произведем виртуальные измерения напряжений на компонентах виртуальной цепи (рис. 4). Чтобы оставить исходную цепь без изменений, сделаем ее копию. Для этого вначале производим ее выделение, нажимая на ЛКМ и обводя ее выделяющей рамкой, либо из меню Edit>Select All и далее, пользуясь стандартными командами Windows – Copy и Paste. (Можно также сохранить этот файл под новым именем и работать с этим новым файлом.) После того как копия возникнет на экране, наводим курсор на любой ее активный (выделенный красным цветом элемент) указатель – он превратиться в изображение руки, нажмем ЛКМ и бросим схему вниз. При достижении нужного положения (схемы не должны пересекаться) надо отпустить ЛКМ.

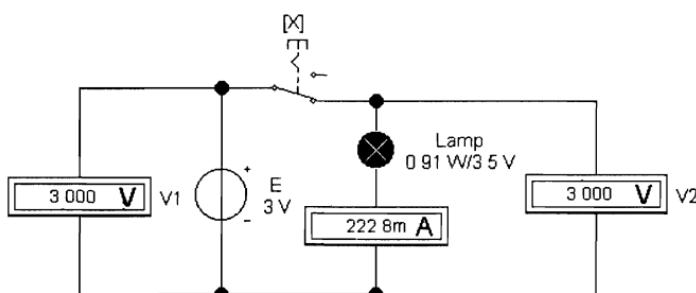


Рис. 4. Измерение напряжений и тока в модели (EWB)

Совет

Обязательно буксируйте схему на новое место сразу после копирования (пока она активная – «красная»), иначе, особенно в сложных схемах, повторно выделить наложенные друг на друга схемы и «растянуть» их практически не удастся. Привычная операция отмены (Undo) здесь, увы, отсутствует. Правда в меню File есть опция Revert Save (возврат к сохраненному), но она требует постоянного сохранения редактируемых схем, а это не удобно. Проще перед вставкой копии «прокрутить» экран, щелкнуть ЛКМ на свободном поле и только после этого делать вставку. Кроме того, в программе EWB проводники, соединяющие схемные компоненты выполнены свободно растяжимыми и сжимаемыми при закрепленных концах. Этим можно пользоваться для придания графике схем нужной конфигурации.

«Сожмем» немного схему слева и справа относительно центра (переключатель [X]), чтобы впоследствии конструируемая схема не «вылезала» за пределы видимой части экрана. Для этого выделяем батарею и перемещаем ее немного вправо, затем аналогично, но влево – лампу. Открываем панель Indicators (индикаторы)



, и «берем» из нее необходимые приборы: два вольтметра и один амперметр. Слева и справа от формируемой схемы помещаем по вольтметру, а внизу, по центру – амперметр. Вольтметры по умолчанию имеют расположение с «утолщением-минусом» внизу, поскольку отрицательному полюсу источника соответствует нижний вывод, то их можно подсоединить параллельно батарее и лампе (см. рис. 4), не меняя пространственной ориентации. Амперметр же ориентирован противоположным к «минусу» батареи образом: его «минус» находится справа. Поэтому его надо повернуть вокруг вертикальной оси. После этого его надо «включить» в разрыв нижнего провода, и тут есть два варианта. Первый заключается в том, чтобы образовать такой разрыв, устранив соединение «минуса» батареи с лампочкой.

Совет (EWB)

Для устранения какого-нибудь соединения достаточно выделить любую его конечную точку, отвести ее вместе с проводником в свободное место и отпустить ЛКМ, т. е. как бы один конец провода бросить в пустоту. Можно также выде-

лить проводник однократным нажатием ЛКМ и затем удалить его любым стандартным приемом, например, воспользовавшись клавишей «Delete». Аналогично удаляется любой ненужный компонент или даже часть схемы, но после ее стандартного рамочного выделения.

После образования разрыва включим амперметр между «минусом» батареи и нижним выводом лампы.

Другой, более простой способ включения амперметра, да и любого другого схемного двухполюсного компонента в существующую ветвь, заключается в следующем. Компонент выделяется, а затем буксируется и накладывается на то место проводника, где он должен располагаться так, чтобы его выводы совпали с проводником. Буквально как бы «втыкается» в схему.

Совет (EWB)

При включении двухполюсного компонента в схему при необходимости вначале заготовьте путем ее растяжения нужное место. Для изменения геометрии схемы без изменения характера соединений выделите часть схемы и буксirуйте ее на нужное место. После того как операция закончена, проверьте пробной буксировкой, соединился ли компонент со схемой: при его перемещениях он должен «тянуть» за собой соединительные провода. Если после подключения компонента схема выглядит не аккуратно (имеются запутанные соединения, лишние изломы и пересечения проводников и т. п.), то поправьте ее графику.

Итак, схема приобрела требуемый вид (см. рис. 4). Понаблюдаем за показаниями приборов. Переключатель [X] поставим в положение ВЫКЛ. и включим моделирование. Как и следовало ожидать, $V1 = 3,0$ В, $V2 = 0$, $A = 0$. При замыкании [X] соответственно, $V1 = 3,0$ В, $V2 = 3,0$ В, $A = 222,8$ мА. Мощность, выделяемая на лампе, составляет $3,0 * 0,2228 = 0,66684$ Вт, т. е. меньше номинальной, равной 0,91 Вт. Это связано с тем, что напряжение меньше номинального: 3,0 В вместо 3,5 В, соответственно меньше и ток, протекающий через лампу.

Для получения номинальной светоотдачи необходимо поднять напряжение до 3,5 В. Выполнив переустановку свойств батареи нетрудно убедиться, что при $E = 3,5$ В ток, будет равен 0,26 А, а мощность 0,91 Вт.

Теперь перейдем к более детальному моделированию, а именно составим схему замещения электрической цепи фонарика во включенном состоянии. Вначале будем считать, что внутреннее сопротивление батареи R_0 равно нулю, ее ЭДС постоянна и не зависит от времени. Это идеальный источник напряжения, который не «подсаживается» под нагрузкой и не разряжается. Выбранный ранее схемный компонент как раз отвечает этим условиям. Все соединительные элементы: провода, замкнутый контакт и другие места соединений (патрон – лампа, элементов между собой и с патроном и т. д.) будем считать не имеющими сопротивления, кроме того, отсутствуют какие-либо утечки в цепи. Лампу представим в виде идеального линейного резистивного элемента с сопротивлением равным $R = 3,5/0,26 = 13,46 \text{ Ом}$.

Скопируем последнюю схему. Затем удалим в ней лампу и на ее место включим резистивный элемент. Для этого откроем в панели компонентов группу Basic (основные) и из нее выберем резистор. Выделив свойства компонента, установим его обозначение R и значение $13,46 \text{ Ом}$.

Совет (EWB) Еще раз обратите внимание на запись единиц измерения: по умолчанию стоит $\text{k}\Omega$ ($\text{k}\Omega\text{м}$), значит, в данном случае, надо переустановить на Ω (Ом).

Собрав схему замещения с резистивным элементом, включаем моделирование и убеждаемся в правильности полученных результатов (см. рис. 5). На этом можно пока закончить виртуальную часть задачи и перейти к реальной.

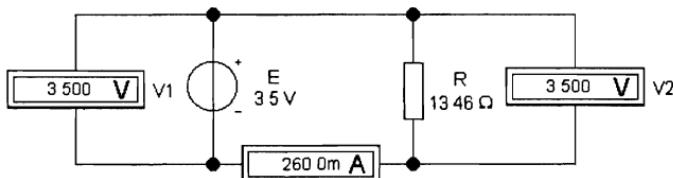


Рис. 5. Электрическая схема замещения цепи фонарика с измерительными приборами (EWB)

Эксперимент

Возьмем реальный фонарик (см. рис. 1) или, в крайнем случае, батарейку и лампочку. Удобно также воспользоваться специальным набором «Юный электротехник» (КИТ № NK143), с которым потом можно провести самостоятельно многие другие анало-

гичные исследования. Убеждаемся, что лампочка может гореть. Желательно также иметь хотя бы простейший мультиметр (тестер, ампервольтметр). Для измерений тока в готовом фонарике изготовим нехитрое приспособление: «датчик тока» – разрыв цепи, состоящий из двух фольговых пластинок, изолированных друг от друга, например «скотчем»; от пластинок сделаем выводы тонкими изолированными проводами. Размеры этого «датчика» выберем в зависимости от устройства конкретного фонарика. Поместим «датчик» в любое разъемное соединение внутри фонарика, например между центральным выводом цоколя лампочки и «плюсом» батареи 8 (рис. 1), если это допускает конструкция, и выведем провода от него наружу. Для измерения напряжения надо также предусмотреть еще один вывод от винтовой части цоколя или возможность ее касания щупом; при металлическом корпусе этим выводом является сам корпус. В случае сборки цепи батарейка – лампочка «вживую» перечисленные проблемы отсутствуют. Итак, все готово – включаем выключатель – фонарик не горит. Замыкаем выводы «датчика» накоротко – лампочка загорается. Разъединяем выводы «датчика» и присоединяем к ним щупы мультиметра, предварительно установив пределы измерения на 500 мА на постоянном токе и соблюдая необходимую полярность. Лампочка должна гореть, а мультиметр показывать протекающий ток. Обозначим его I , зафиксировав показания. Отсоединяем мультиметр. Замыкаем выводы «датчика» тока, переключаем мультиметр на предел измерения 10 Вольт постоянного напряжения. Измеряем напряжение на горящей лампочке V . Выключаем лампочку и измеряем напряжение на батарее – это ее ЭДС E . Вывинчиваем лампочку и измеряем ее сопротивление в не рабочем (холодном) состоянии R_0 . Предположим, что мы получили следующие результаты: $E = 2,8$ В, $V = 2,6$ В, $I = 0,21$ А, $R_0 = 1$ Ом (номинальные значения для испытуемой лампочки были указаны выше).

Совет

Не проводите подобные эксперименты с бытовыми электроприборами, например с настольной лампой, включенной в сеть с напряжением 220 В. Это не виртуальность: реальные последствия могут быть весьма не предсказуемы!

Сопоставления виртуальности и реальности

Рассматривая эти результаты, мы обнаруживаем, по крайней мере, два несоответствия в поведении реального объекта и модели. Во-первых, напряжение при включении лампочки «падает» с 2,8 В до 2,6 В. Во-вторых, если мы разделим напряжение на лам-

лампе на сопротивление, то получим ток $2,6/1 = 2,6$ А. В то время, как в эксперименте получилось всего 0,21 А. Ну и, наконец, если мы будем при проведении эксперимента длительное время не выключать лампочку, то обнаружим, что снимаемые с приборов показания (E , V , I), медленно «сползают» вниз. Повторим измерение сопротивления лампы, но в виртуальной модели. Из группы In-

struments (инструменты)  возьмем Multimetr (мультиметр), скопируем лампу и соберем модель измерительной цепи (рис. 6).

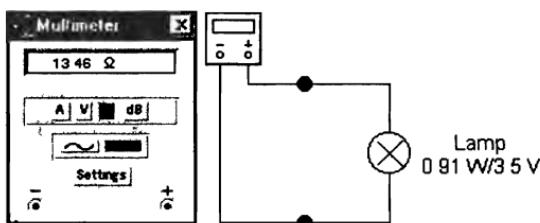


Рис. 6. Измерения сопротивления лампочки мультиметром (EWB)

**Совет
(EWB)**

Обратите внимание на то, что для ряда приборов (мультиметр, осциллограф и др.) в программе EWB в схему включают уменьшенное схемное изображение прибора, на которой есть активные выводы. Показания же снимаются с виртуальных изображений этих приборов, содержащих лицевые панели с органами управления, не связанными проводами со схемой. Эти изображения вызываются двойным щелчком ЛКМ на уменьшенном схемном изображении прибора. Виртуальное изображение развернутой лицевой панели можно свободно буксировать в любое удобное место экрана, в том числе поверх схемы, как обычное дополнительное окно. Выводы на этих изображениях не активны: не пытайтесь к ним что-либо подсоединить, зато активны установочные кнопки, и ими надо правильно пользоваться для работы.

Результат измерений на первый взгляд кажется и вовсе неожиданным: 13,46 Ом вместо 1 Ом! А ведь это всего лишь демонстрация несовершенства принятой модели! В чем же дело?

Уменьшение напряжения на 0,2 В при токе 0,21 А можно объяснить, например, наличием в реальной цепи еще одного сопротивления R_0 , включенного последовательно с лампой и равного $0,2/0,21 = 0,94$ Ом. При этом возникает законный вопрос: чем обусловлено это сопротивление? Может быть соединительными элементами?

Берем реальный мультиметр и измеряем сопротивление проводов – ничего подобного. Остается заподозрить батарею. Да, конечно, она не идеальна. Что ж, надо подправить (уточнить, скорректировать) модель, введя внутреннее сопротивление батареи $R_0 = 0,94$ Ом.

Соберем моделирующую схему, воспользовавшись данными эксперимента (рис. 7). Включим моделирование. Вот теперь другое дело, результаты совпадают с погрешностью до нескольких процентов, а это уже вполне объяснимо погрешностями измерений и округлениями в расчетах.

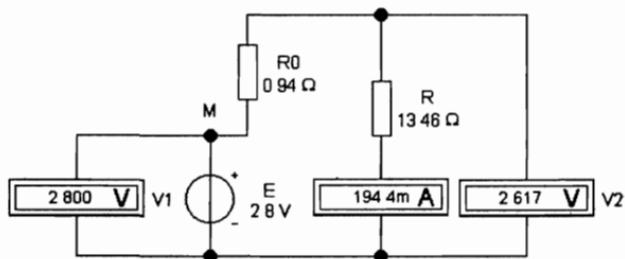


Рис. 7. Моделирование работы «реальной» батареи (EWB)

Проведем моделирование работы реальной батареи с аналогичными данными, но используя программу **МС**. Открываем основное рабочее окно программы и в нем нажимаем на кнопку **New** (новый) или с клавиатуры **Control+N**. Затем, в появившемся меню (рис. 8), выбираем опцию **Schematic** (схемы). Наводим курсор на кнопку с изображением стрелки - **Select Mode** (выбор объекта) и нажимаем ЛКМ. Подводим стрелку-курсор к пик-

тограмме с изображением гальванической батареи **Battery** и нажимаем ЛКМ. Затем, отпустив кнопку мыши, переводим курсор на рабочее поле: на экране возникает графический символ батареи. Нажимаем ЛКМ и в появившемся окне (рис. 9) набираем в окошке **Value** 2,8 (значение ЭДС в вольтах), а в окошке **Part** (позиционное обозначение элемента схемы) проставляем **E1**. Нажимаем ОС, переводим курсор к кнопке **Select Mode** и нажимаем ЛКМ.

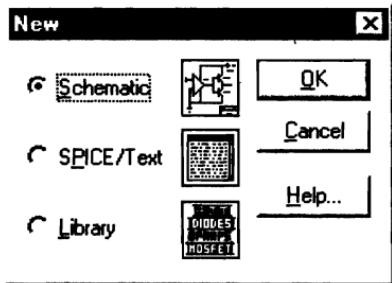


Рис. 8. Окно выбора режима работы в программе МС

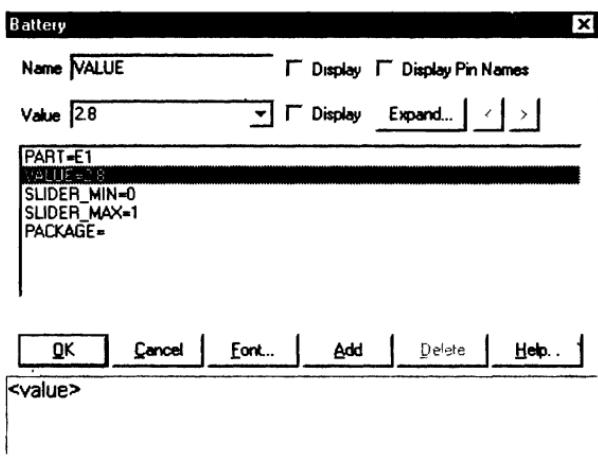


Рис. 9. Окно для задания параметров батареи (МС)

Совет (МС)

Не забывайте каждый раз после выбора и редактирования очередного компонента переключаться в режим Select Mode (этого не надо делать только в одном случае: следующая процедура заключается в выборе однотипного с предыдущим компонентом). Если этого не сделать, то можно все рабочее поле покрыть одинаковыми компонентами, от которых трудно «отвязаться». Правда, в отличие от EWB, в программе МС есть операция Undo (отмена), позволяющая вносить исправления на ходу. Кроме того, этот режим можно изменить, войдя в меню Options (опции) общих настроек программы Preferences (предпочтения), но это лучше выполнять, уже привыкнув к программе.

Аналогично выбираем два резистора, воспользовавшись пиктограммой с соответствующим изображением в самом верхнем ряду панели инструментов  Resistor.

**Совет
(MC)** Обратите внимание на то, что в программе **MC** изображение зигзагообразной «змейки» выполнено на трех разных кнопках: выбор компонента, выбор резистора и позиционные обозначения. Этот же символ использован для условного графического обозначения резисторов на схемах при работе в стандарте ANSI.

Когда-то такое обозначение резисторов было повсеместным. Вообще же этот символ подобен древнеегипетскому иероглифу, обозначающему воду. Позже, через финикийцев, символ проник в латинский алфавит и, в укороченном виде, превратился в букву M. В этом смысле, повышенная любовь авторов программы **MC** к этому символу сакральна.

Для резисторов в соответствующих окнах проставляем позиционные обозначения R1 и R2, а также их параметры (значения сопротивлений в омах), равные соответственно 0,94 и 13,46.

**Совет
(MC и EWB)** Не забывайте, что при наборе десятичных дробей в рабочем поле программ обязательно надо использовать разделительную точку, а не запятую, например **0.94** и **13.46**.

Для придания выбранным компонентам необходимой пространственной ориентации обводим их выделяющей рамкой и пользуемся кнопками Rotate (вращение), Flip X (поворот относительно оси X), Flip Y (поворот относительно оси Y). Буксируем компоненты, нажав ЛКМ на графическом символе и не отпуская, располагаем их на нужных местах.

Теперь нужные элементы на месте и остается их только соединить проводниками. Сборка схем и их графическое редактирование в программе **MC** несколько канительнее, чем в **EWB**. Нажи-

маем на пиктограмму  Orthogonal Wire (ортогональные проводники) и соединяем проводником соответствующие выводы компонентов. Возвращаемся в режим Select Mode. Для проведения моделирования в программе **MC** обязательно необходимо зазем-

лить цепь. Выбираем заземление нажатием на пиктограмму (Ground) и подводим изображение заземления к нижнему проводнику (см. рис. 10,а).

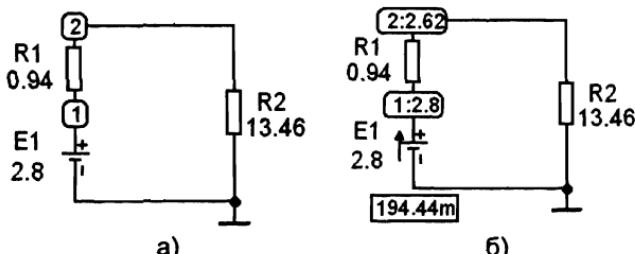


Рис. 10. Моделирование работы «реальной» батареи (MC)

Нажимаем на пиктограмму Displays node numbers (обозначения узлов на схеме). Этим осуществляется проверка целостности соединений в собранной схеме. Выводы, связанные с землей не нумеруются. Лишние узлы легко обнаруживаются после этой процедуры. В данной схеме при правильном соединении возникает два нумерованных узла (рис. 10,а). Если оказалось, что схема содержит ошибки, то, выделяя соответствующие части и удаляя их нажатием на клавишу Delete и достраивая заново, можно добиться необходимой формы и содержания.

Переходим к моделированию. Последовательно нажимаем на клавиатуре Alt+1, в появившемся окне Run (работа) и опять на клавиатуре F1. На экране снова возникает набранная схема (рис.

10,а). Нажимаем на пиктограмму Node Voltages (узловые потенциалы). На схеме в позициях с номерами узлов возникает численное значение напряжения узлов схемы относительно заземленного узла, потенциал которого принят равным нулю. Нажимаем

на пиктограмму Currents (токи). На схеме (рис. 10,б) возникает стрелка тока и его численное значение в прямоугольной рамке: 194,44 mA. Кроме того, в скругленных прямоугольных рамках возникают значения потенциалов, записанные в формате: №узла, двоеточие, потенциал. В данном случае: (1:2,8) и (2:2,62). Сопоставляя численные результаты на рисунках 7 и 10,б видим их совпадение.

Вернемся теперь к сущности моделирования. Обратим внимание на одну немаловажную деталь: приведенные схемы (см. рис. 7

и 10) именно виртуальны, так как в реальности точки M и соответственно узла 1 в природе не существует. Поэтому не потрошите зря батарейки: включить вольтметр V1 так, как это показано на схеме (см. рис. 7) не удастся. Если же вы полагаете, что это точка есть ничто иное, как место соединения двух элементов в центре фонарика 9 (см. рис. 1), то придется еще раз прогуляться назад в виртуальность и реальность, чтобы убедиться в противном.

«C'est la vie!» – «Такова жизнь!», как говорят французы, а они, как известно, понимают в ней толк.

Еще более парадоксальный результат можно получить при неправильном понимании сущности моделирования работы электродвигателя. Электрический двигатель представляет собой электромеханическую систему. Электрическая мощность, потребляемая двигателем от источника, с некоторым КПД превращается в механическую мощность на валу двигателя. При моделировании эту механическую мощность в электрической схеме замещения представляют как эквивалентную мощность, рассеиваемую в нагрузочном резисторе, который, разумеется, физически отсутствует в реальном двигателе.



В программе **EWB** в разделе **Miscellaneus** (смешанный) присутствует модель двигателя постоянного тока (DC Motor). Если собрать простейшую схему, моделирующую работу двигателя (рис. 11), то вольтметр V1 измеряет напряжение на двигателе, а вот вольтметр V2 включен как бы к валу! Если это понимать буквально, то он измеряет напряжение между валом (OUT – выход) и землей. В реальном случае это могло бы быть напряжение, связанное с несовершенством изоляции обмоток двигателя. Здесь же это просто прием моделирования: вольтметр V2 является виртуальным тахометром, измеряющим частоту вращения вала. Одному Вольту на шкале V2 соответствует один оборот в минуту вала (RPM – Rotated Per Minute). В приведенном на рис. 11 примере при

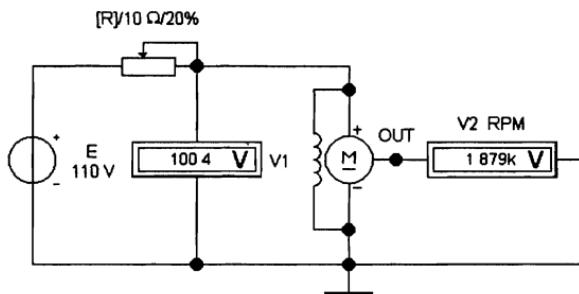


Рис. 11. Модель двигателя постоянного тока (**EWB**)

напряжении $V1 = 100,4$ В, $V2 = 1,879$ кВ = 1879 В. Конечно, ни о каком таком электрическом напряжении на валу не может быть и речи. Зато вал, согласно модели, вращается, делая 1879 об/мин, что и показывает вольтметр-тахометр $V2$. Изменяя сопротивление реостата R , включенного последовательно с двигателем, нажатием на клавишу R или $Shift+R$, можно наблюдать регулирование напряжения на его зажимах и, соответственно, частоты вращения вала двигателя.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют, что отождествление виртуальной модели с реальным объектом, который она моделирует, за пределами тех условий, которые были заложены при формулировке модели, недопустимо. Модель – это фантазия, которая не всегда сбывается, но она далеко не бесполезна, если ею пользоваться правильно и не выходить за принятые рамки. В данном случае батарейка представлена «черным ящиком», из которого «торчат» два провода (зажима), а мы додумываем на основе известных нам законов такое ее внутреннее устройство (модель), чтобы по отношению к внешним зажимам она вела бы себя так же, как и реальное устройство. Ну, а этого мы почти добились. Расхождения в измерениях и результатах моделирования при холодной и раскаленной нити накаливания связаны с увеличением на порядок сопротивления при нагреве до 3000 °C (потому-то и перегорают лампы чаще всего при включении за счет десятикратного «броска» тока на холодной нити). Значит, лампа ведет себя не линейно: ее сопротивление зависит от температуры нити, которая в свою очередь зависит от протекающего тока. В подобных случаях в схему замещения вместо линейного вводят нелинейный резистивный элемент, но это сильно усложняет анализ. Не представляет особого труда объяснить, по крайней мере, качественно, и уменьшение показаний со временем. Электрохимические реакции, происходящие в батарее при ее работе, приводят к обратимым изменениям ее состава, вследствие чего падает ЭДС. Аналогично разряжается и аккумулятор, но его можно подзарядить, так как протекающие в нем химические реакции обратимы. Эти особенности также в принципе можно учесть при формировании модели, если это необходимо.

Казалось бы, что вопрос исчерпан, но это только на первый взгляд. Будь у нас приборы поточнее, мы тут же, при более скрупулезной постановке эксперимента, обнаружили бы, что одно внутреннее сопротивление, даже если его принять нелинейным (ведь батарея также нагревается при работе и это можно проверить на ощупь) и зависящим от времени, объясняет далеко не все. Например, мы приняли, что сопротивление соединений между

лампой и батареей равно нулю. В действительности же оно (если не произошло сильного окисления контактов), хоть и много меньше сопротивления лампы и батареи, но больше нуля, а при окислении тем более! Учесть его не представляет особого труда, но есть и более тонкие эффекты. Так, за счет контакта разнородных металлов в реальной цепи возникает контактная разность потенциалов, свой вклад вносит и температура (термоэдс), а какие «страды кипят» около раскаленной нити! Сверхчувствительные приборы, например хороший зеркальный гальванометр, отметили бы, что ток не постоянен, а его мгновенные значения принимают случайные отклонения от среднего, наподобие перемещений броуновской частицы. В галогенонаполненных лампах непрерывно протекают электрохимические реакции, «подлечивающие» утончающуюся нить накала, что также влияет на электрические характеристики. Обычные приборы к подобным сверхмальным отклонениям нечувствительны, а регистрируют средние значения (подобно тому, как наше ухо не воспринимает ударов отдельных молекул, и к счастью: иначе музыка была бы совсем иной). Можно отмахнуться от этих и еще многих других тонкостей: надо же на чем-то и остановиться, в конце концов. Все определяется поставленной задачей. Для проектирования и эксплуатации осветительного устройства можно было бы принять самую грубую первую модель, но в полупроводниковой микроэлектронике, да еще на гигагерцовых тактовых частотах, заиграет весь «физический квантовый оркестр».

В примере с электрическим двигателем также предполагалась большое количество разнообразных допущений. Часто многие из них не указываются явно, а как бы предполагаются по «здравому смыслу». Иногда про них забывают, и это может служить источником ошибок. При научной постановке проблемы именно принятые аксиомы и допущения и представляют интерес для ученого: только изменения их, дополняя или ниспровергая вообще, можно открыть новые законы и явления. Безусловным критерием правильности разработанных моделей служит практика.

Помимо перечисленных проблем есть еще одна принципиальная: а что вообще показывают наши приборы? Да, это как бы наши глаза в схеме и без них мы слепы. Попробуйте на минуту убрать приборы из схемы – ощущение беспомощности возникнет моментально. А вот «что и как мы видим?» – это большой вопрос, который пока оставим риторическим.

Поднятая проблема адекватности модели и реального объекта является общей для естествознания. Поучителен в этом плане пример, приведенный А. Эйнштейном. Объясняя теорию относительности, он пишет следующее. «Физические понятия суть

бодные творения человеческого разума и не однозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться. В нашем стремлении понять реальность, мы отчасти подобны человеку, который хочет понять механизм закрытых часов. Он видит циферблат и движущиеся стрелки, даже слышит тиканье, но не имеет средств открыть их корпус. Если он остроумен, то может нарисовать себе некую картину механизма, которая отвечала бы всему, что он наблюдает, но он никогда не может быть вполне уверен в том, что его картина единственная, которая могла бы объяснить его наблюдения. Он никогда не будет в состоянии сравнить свою картину с реальным механизмом, и не может даже представить себе возможность или смысл такого сравнения. Но он, конечно, уверен в том, что по мере того, как возрастает его знание, его картина реальности становится все проще и проще и будет объяснять все более широкий ряд его чувственных восприятий. Он может также верить в существование идеального предела знаний и в то, что человеческий разум приближает этот предел. Этот идеальный предел он может назвать объективной истиной». Тут, как говориться, ни добавить, ни убавить.

1.4. Структура схем

*Я не то чтобы от скуки — я надеялся понять,
как способны эти руки эти звуки извлекать
из какой-то деревяшки, из каких-то грубых жил,
из какой-то там фантазии, которой он служил?*

Б. Окуджава

Вглядываясь во внутреннюю часть телевизора или компьютера, среди груды блоков, деталей и проводов, вначале кажущихся довольно хаотическими, постепенно, по мере постижения сущности, можно обнаружить четкий порядок, позволяющий устройству выполнять свои функции. Еще более заметен этот порядок, если обратиться к рассмотрению печатного монтажа или принципиальной схемы. Здесь сконцентрирован труд многих поколений ученых, изобретателей, инженеров и мастеров.

В схемотехнике проведена классификация типовых компонентов и блоков, в которые они входят и, наконец, законченных в функциональном отношении устройств и систем из этих устройств. Эта классификация совместно с законами и правилами поведения отдельных элементов и сложных систем, собранных из них, позволяет анализировать существующие электронные устройства или проектировать новые.

Одним из ключевых признаков классификации в схемотехнике является собственно конфигурация схемы всего устройства и отдельных его частей. Эта конфигурация определяет способ связи элементов целого, а следовательно, наряду со свойствами самих элементов, предопределяет свойства этого целого. Так, два компонента цепи: конденсатор и индуктивная катушка, соединенные последовательно или параллельно, образуют колебательные контуры с противоположными частотными характеристиками (см. рис. 15 и 16). В некотором роде схемотехника похожа на генную инженерию, где отдельные гены являются компонентами, а строение генома в целом напоминает схему. Эта аналогия может стать более глубокой и содержательной, если обратиться к электрофизическим характеристикам биологических объектов.

Самый первый наш пример относился к очень простому по своим функциям устройству (фонарику), работающему на постоянном токе, поэтому и его модель оказалась очень простой.

В устройствах с более сложными функциями используется, как правило, большее число и более сложных компонентов. Кроме того, конфигурация цепей, т. е. способ соединения компонентов, также становится более сложной. Поэтому при схемотехническом моделировании используют большее разнообразие типовых схемных элементов и способов их соединений.

Простейшим компонентом любой цепи является место электрического соединения ее элементов или участков между собой: вывод, электрод, контакт, зажим, полюс и тому подобное. По смыслу – это некоторый идеальный «однополюсник», который может специально обозначаться на схемах точкой с соответствующей маркировкой, а может и не обозначаться (изолированный компонент или соединение двух не однополюсных компонентов). В последнем случае его присутствие подразумевается, и он выступает в роли своеобразного гоголевского носа.

При компьютерных расчетах понятие узла цепи шире, чем это принято в элементарной физике, где за узел принимается место соединения только трех и более проводников, что диктуется применением элементарного правила Кирхгофа для токов. В электронике необходимо знать потенциалы узлов при соединении в них и двух выводов от соответствующих компонентов и на выводе, к которому вообще ничего ни присоединено (например, на выходе усилителя без нагрузки).

В программе **EWB** графическое обозначение узлов на схемах возникает автоматически при соединении в точке трех или четырех проводников (см. рис. 11) или может вводиться при создании схем из раздела компонентов **Basic** (основные) и выборе компонента

 Connector (соединитель). Из узла может выходить не более четырех ортогональных проводников. Узел может быть снабжен при его выделении Label (текстовой меткой) в окне Connector Properties (см., например, метку OUT на рис. 11). Нумерация узлов (Node) при моделировании выполняется программой автоматически и ее можно выявить, активируя соответствующий узел и нажав в появившемся окне Connector Properties на кнопку Node (узел). Эти номера используются при моделировании поведения цепей в опции Analysis.

**Совет
(EWB)**

Старайтесь аккуратно выделять элементы: только щелкать кнопкой, не сдвигая мышь с места, иначе может нарушиться конфигурация схемы. Если это не удалось, то для восстановления начального вида схемы воспользуйтесь перемещением выделенного элемента соответствующими стрелками на клавиатуре и, в крайнем случае, заново повторите нарушенное соединение. Для работы с единичным компонентом наведите на него стрелку-курсор: она превратиться в изображение руки. Нажмите правую кнопку мыши (ПКМ) и в появившемся меню выберите необходимую команду.

В программе **MC** графическое обозначение узлов на схемах также возникает автоматически при соединении в точке трех или четырех проводников (см. рис. 10). Индикация номеров про-

водится нажатием на кнопку  Node Numbers (номера узлов), повторное нажатие на эту кнопку отменяет команду. Эти номера также используются при моделировании поведения цепей.

Особым схемным компонентом-узлом, потенциал (и номер), которого принимается равным нулю, является заземление (Ground). Его выбор производится в программе **EWB** из меню

Sources (источники) выбором пиктограммы , а в программе **MC** соответственно  (Ground).

**Совет
(EWB и MC)**

Поскольку в обеих программах расчеты при моделировании проводятся относительно этого

«нулевого» узла (Ground), то не забывайте выполнять заземление. Программа **МС** вообще не работает, если не заземлен хотя бы один узел; программа **ЕWB** ведет себя аналогично в схемах, использующих трансформаторы. Такая вот своеобразная ахиллесова пята.

Для упрощения начертания сложных схем часто удобно не проводить общую «земляную» шину, а заземлять компоненты локально в необходимом месте (все «земли» имеют один и тот же нулевой потенциал).

В обеих программах есть возможность обратиться к помощи (Help) – не стесняйтесь ею пользоваться. Она хоть и на английском языке, но иногда помогает. Кроме того, полезно просмотреть файлы с примерами, прилагаемыми к программам.

Следующим компонентом цепей, отображаемым на всех схемах, являются соединительные проводники (Wire). В программе **ЕWB** графическое обозначение проводников на схемах возникает автоматически при соединении выводов двух любых компонент, находящихся на экране. Графический редактор по-своему оптимизирует соединение с помощью ортогональных проводников.

Совет (ЕWB)

Вид полученного соединения можно отредактировать, выделив соответствующий отрезок и перемещая его в одном из направлений, двунаправленной стрелкой, показанной на нем. Можно также заранее спланировать путь проводника, располагая в необходимых местах «монтажные» узлы, к которым можно присоединить не более четырех ортогональных проводников. Желательно выполнять схемы с минимальным количеством пересечений, не соединяемых между собой проводников. Для наглядности соединений проводники и узлы могут быть раскрашены по команде выбора их свойств, причем раскрашивание узла автоматически приводит к раскрашиванию в тот же цвет соединяемых им проводников.

В программе **MC** для проведения соединения компонентов необходимо нажать на пиктограмму  Wire mode (ортогональные проводники) или с клавиатуры **Ctrl+W**. Можно также воспользоваться другой пиктограммой  Diagonal Wire Mode (ввод проводников под произвольным углом) – это соединение похоже на рисование линий «резинкой».

Проводники на схемах принимаются идеальными, т. е. сверхпроводящими, в отличие от всей остальной, не занятой компонентами плоскости чертежа схемы, которая тоже предполагается идеальной, но изолятором. Не идеальность реальных проводников учитывается при необходимости введением в моделирующую схему дополнительных элементов.

Для одного и того же проводника все узлы, лежащие на нем и вообще любые его точки на схеме являются эквипотенциальными, т. е. имеют один и тот же потенциал относительно заземленного узла. Таким образом, схемные проводники также являются своеобразными однополюсниками.

Следующим типом компонентов цепей и соответственно схемным компонентом являются двухполюсники. Состояние двухполюсника однозначно определяется разностью потенциалов (напряжением) между двумя выводами (полюсами) и его свойствами. Согласно принятой модели цепи, в один и тот же момент времени, ток, входящий в один полюс двухполюсника в точности равен току, выходящему из другого его полюса.

В качестве основных «кирпичиков» на схемах замещения используют следующие элементарные (одноэлементные) идеализированные двухполюсники: резистивные (**R**), индуктивные (**L**), емкостные (**C**), источники напряжения (**E**) и источники тока (**J**). Здесь параметры, определяющие свойства этих двухполюсников соответственно таковы: сопротивление **R**, индуктивность **L**, емкость **C**, ЭДС **E** и ток **J**. Процедура выбора этих двухполюсников для составления схем и задание их параметров рассматриваются по мере необходимости.

Совет

Старайтесь различать понятия идеализированных двухполюсников на схемах замещения и реальных компонентов применительно к цепям, принципиальным схемам и схемам замещения. Сделать это не всегда просто, так как их условные графические изображения часто совпадают, а в микросхемах они часто сливаются. Отождествление этих разных

классификационных признаков может привести к неоправданной идеализации и, следовательно, к ошибке. Например, резистор, как реальное изделие, на высоких частотах обладает еще и емкостью, и индуктивностью, следовательно, его схема замещения должна состоять из трех различных двухполюсников. В конденсаторе же могут появиться потери на нагрев, следовательно, в схеме замещения надо добавить резистивный элемент. Тогда как индуктивная катушка имеет помимо реактивного (индуктивного) и активное сопротивление, а на высоких частотах в ней может проявиться и межвитковая емкость

Следующим компонентом цепей и соответственно схемным элементом является трехполюсник, например транзистор, имеющий три вывода: эмиттер, базу и коллектор.

Удобнее рассматривать трехполюсник как четырехполюсник, в котором один из выводов как бы раздваивается и является общим для входной и выходной цепи.

В общем случае четырехполюсник имеет две пары полюсов: первую на входе и вторую на выходе. Например, двухобмоточный трансформатор имеет два входных зажима, соединяющих его с источником питания и два выходных, к которым соответственно подключается нагрузка.

Состояние четырехполюсника и выполняемые им функции определяются двумя парами напряжения и тока и связывающими их параметрами, характеризующими его свойства, заданными в той или иной форме. Обычно схемы располагают ориентируя их так, чтобы источник полезного сигнала (вход) находился слева, а нагрузка (выход) – справа. Это соответствует принятым правилам европейской письменности и чтения: слева – направо. Например, для выпрямителя «сеть» слева, а нагрузка – справа; для радиоприемника: антенна – слева, громкоговоритель – справа.

Не следует понимать буквально так, что только один какой-либо компонент, в зависимости от его устройства, является двух- или четырехполюсником: это лишь частные случаи. Любая часть электрической цепи, имеющая N выделенных полюсов (зажимов) является N -полюсником (при $N > 2$ – многополюсником).

Вообще же все это модели типа «черного ящика», из которого выходят одна или две пары проводов, учитываемых в конкретной задаче. Например, телевизор, рассматриваемый как потребитель электрической энергии из сети, несмотря на всю сложность внут-

рисхемных соединений, является всего лишь электрическим двухполюсником. Однако этот же телевизор, но рассматриваемый по отношению к информационному сигналу, поступающему на его антенный вход и после преобразований, попадающему на выводы звуковой катушки электродинамического громкоговорителя, является типичным четырехполюсником.

Здесь уместно будет вспомнить эйнштейновскую трактовку часов, приведенную выше (см. подраздел 1.3). Так вот, телевизор – это те же «часы», но с электронной «начинкой» вместо шестеренок, и мы, подобно эйнштейновскому наблюдателю, создаем при описании его действия те или иные модели, сверяясь с практикой.

Вообще же модель в виде того или иного многополюсника может быть распространена на входы и выходы и не электрической природы. Приведенное ранее описание двигателя постоянного тока как раз является подходящим примером электромеханического четырехполюсника. Входная пара зажимов – электрическая с переменными: напряжение питания и потребляемый ток. Выходная пара «зажимов» механическая – это вал и неподвижный корпус, с которых снимаются переменные: момент силы и частота вращения. Произведение входных (электрических) переменных напряжения и тока друг на друга дает электрическую мощность, потребляемую двигателем от источника, а произведение механических переменных момента, развиваемого двигателем, на частоту вращения вала дает механическую мощность, передаваемую двигателем механической нагрузке.

Систематическое применение описанного подхода составляет сущность электрического моделирования физических систем. Возвращаясь к примеру с телевизором, теперь можно сказать, что преобразование информационного сигнала от антенного входа до звука проходит через два четырехполюсника, соединенных последовательно чисто электрический (антенный вход – выводы звуковой катушки) и электроакустический. Для последнего выходной «парой зажимов» является подвижный диффузор электродинамического громкоговорителя и его неподвижный корпус. Выходными акустическими переменными здесь служат – звуковое давление и объемная колебательная скорость воздуха, примыкающего к диффузору (их произведение равно полной звуковой мощности).

Таким образом, при желании, описываемые программы могут быть в принципе применены не только по прямому назначению: для моделирования электронных цепей, но и гораздо шире. Но это, как говорится «тема иного романа», поэтому особо любознательным порекомендуем обратиться к классической монографии А.А. Харкевича «Теория преобразователей».

Рассмотрим некоторые абстрактные двухполюсники, не наделяемые никакими характерными свойствами реальных компонентов за исключением выводов, которыми они могут быть соединены между собой и с внешними цепями. В зависимости от числа и способа соединения таких абстрактных двухполюсников могут получаться различные конфигурации схем. Для их изображения применим графику программы **EWB**, используя базовое обозначение резистора и введя только нумерацию этих схемных компонентов. Единичный двухполюсник (рис. 12,а), если не учитывать его возможную полярность, поскольку это дополнительное свойство, имеет только один вариант размещения (соединение его только одним выводом эквивалентно отсутствию). Правда можно получить два вырожденных четырехполюсника в сочетании с проводниками и узлами (рис. 12,б,в).

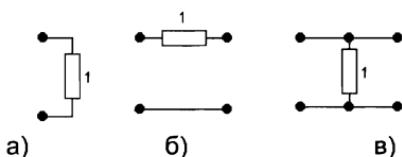


Рис. 12. Одноэлементные двухполюсники и четырехполюсники

Для двух двухполюсников возможны два вида соединений: последовательное (рис. 13,а), характеризующееся общим током и параллельное (рис. 13,б), характеризующееся общим напряжением. Получились два новых двухполюсника, причем перестановки в них элементов с учетом сделанных допущений ничего не меняют. Двухполюсник с последовательным соединением (рис. 13,а) можно превратить в трехполюсник, если сделать дополнительный вывод от внутреннего соединения (рис. 13,в) и в четырехполюсник, сделав один любой вывод общим (рис. 13,г), изображаемым также как Г-образный четырехполюсник (рис. 13,д). Здесь уже в общем случае перестановки элементов приводят к изменению свойств.

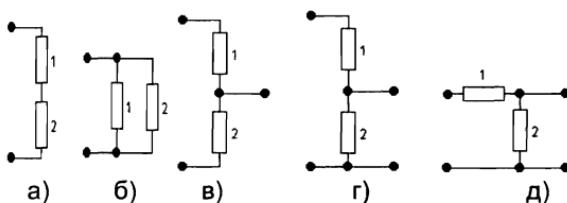


Рис. 13. Двухэлементные двухполюсники и многополюсники

При анализе схем стараются уменьшить число входящих в них элементов, но так чтобы по отношению к входным (а для четырехполюсника и к выходным) зажимам поведение схемы не изменилось. Это так называемые эквивалентные преобразования. Для простых схем на постоянном токе эта задача решается элементарно. В тоже время для сложных схем и сложных сигналов она может оказаться проблематичной.

В качестве примера эквивалентной замены многоэлементного двухполюсника на одноэлементный рассмотрим задачу, предложенную А.Д. Сахаровым. Девять резисторов с номинальным сопротивлением 1 Ом каждый соединены по схеме, показанной на рис. 14,а. Требуется определить входное сопротивление цепи R_{ab} .

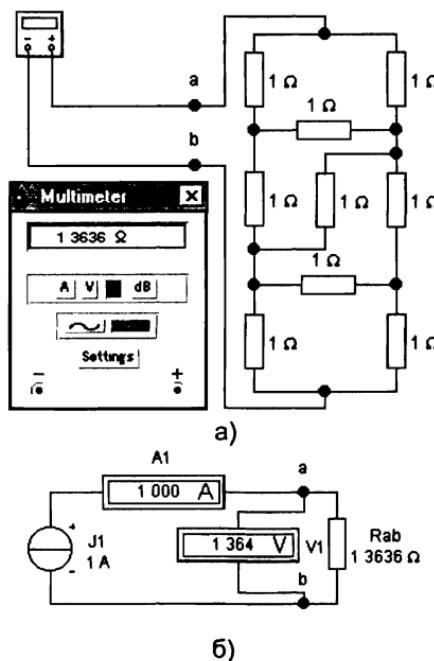


Рис. 14. Моделирование задачи А. Д. Сахарова (EWB)

«Лобовое» аналитическое решение задачи заключается в использовании правил Кирхгофа. При этом придется составить и затем решить систему из девяти уравнений. Другой метод заключается в последовательных эквивалентных преобразованиях с использованием правил пересчета типа «звезда» – «треугольник», последовательных и параллельных соединений. Сам А.Д. Сахаров решал задачу более изящно, используя симметрию схемы.

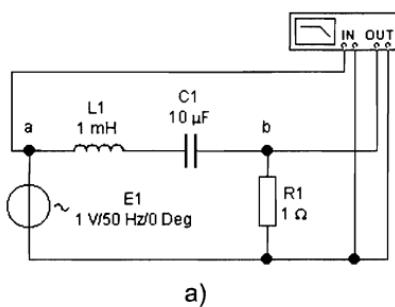
Впрочем, теперь мы во всеоружии виртуальной схемотехники получаем решение этой задачи достаточно тривиальным виртуальным экспериментом. Для этого просто мультиметром измеряется сопротивление на входе ав схемы (рис. 14,а). Как следует из этого эксперимента, приближенно $R_{ab} = 1,3636$ Ом (тогда как точный ответ $15/11$ Ом).

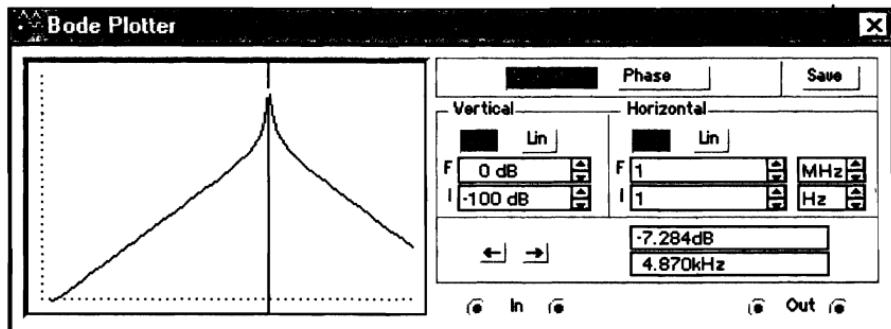
Таким образом, рассматриваемый многоэлементный двухполюсник может быть заменен всего лишь одним эквивалентным резистивным элементом, что и показано на рис. 14,б. Кстати, внутри виртуального мультиметра как бы реализована именно такая схема измерений: при питании входа от источника постоянного тока $J = 1$ А, измеряемое напряжение на входе в вольтах численно равно входному сопротивлению в омах (рис. 14,б).

Используя источники и приборы на переменном токе и включая их к входным зажимам, можно аналогично определить полное входное сопротивление на переменном токе и более сложных схем, в которых присутствуют наряду с резистивными и реактивными (индуктивные и емкостные) элементы. В этом случае можно также определить, как это сопротивление зависит от частоты.

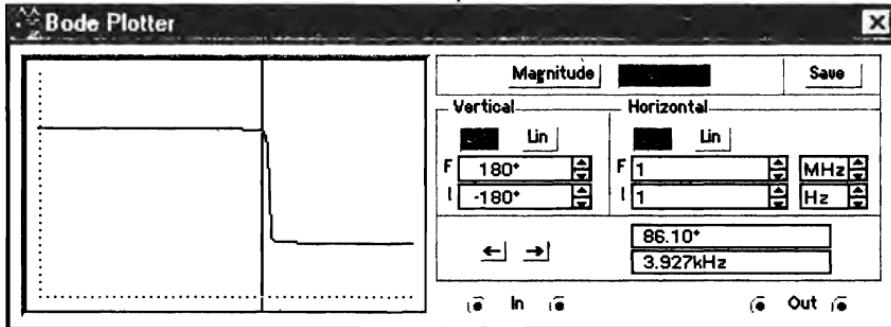
Пусть исходными двухполюсниками будут индуктивный и емкостной элементы. Соединяя эти элементы двумя возможными способами, получаем два колебательных контура: последовательный (рис. 15) и параллельный (рис. 16). Исследуем их частотные характеристики.

Описание поведения цепей на частотном «языке» (в частотной области), где аргументом является частота для радиоинженеров столь же естественно, как и описание на временном «языке» (во временной области), где аргументом является время. Ведь частота и время – это две обратно пропорциональные величины: они как близнецы-братья. Радиоинженер свободно использует тот или иной язык в зависимости от того, какие свойства цепи рассматриваются, и легко переходит с одного языка на другой.

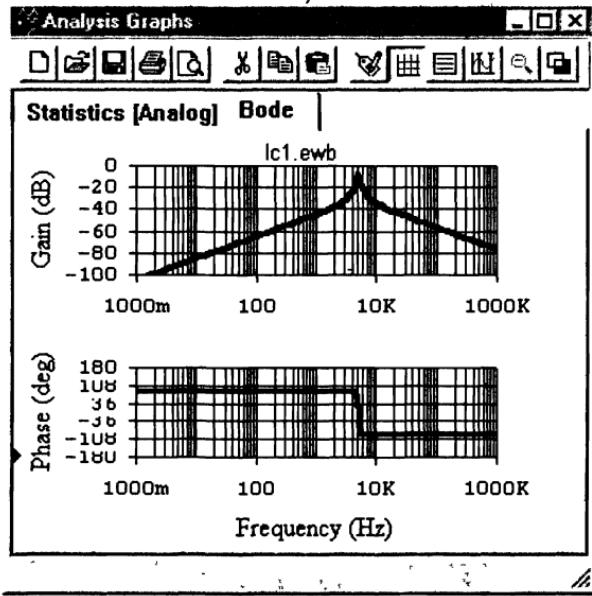




б)

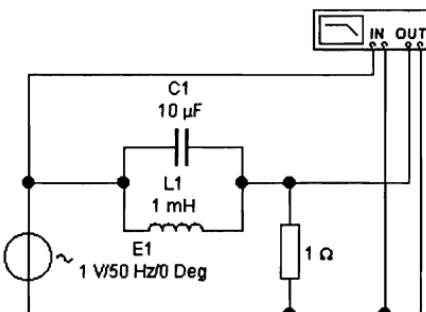


в)

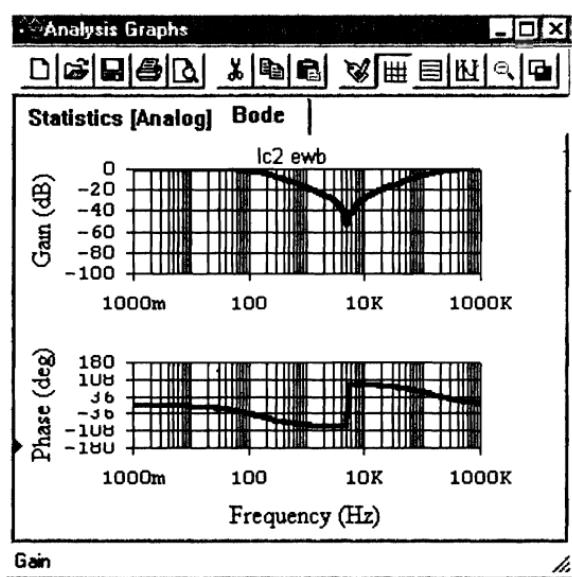


г)

Рис. 15. Последовательный колебательный контур (EWB)



a)



б)

Рис. 16. Параллельный колебательный контур (EWB)

Так, если рассматриваются вопросы фильтрации, то сигналы представляются в виде спектров, т. е. зависимостей амплитуды входящих в них гармоник от частоты. В свою очередь, фильтрующая цепь также описывается на частотном языке через зависимость коэффициента передачи по напряжению (отношение напряжения выходного сигнала к напряжению на входе) от частоты. На частотном языке становится понятно, что фильтр, как четырехполюсник, может иметь различные по характеру пропускания полосы (диапазоны) частот. В одних – сигнал проходит с малым за-

туханием – это полосы пропускания (прозрачности). В других, наоборот, сигнал сильно затухает – это полосы заграждения (непрозрачности). Подобная зависимость носит название амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Оптическая аналогия здесь очевидна, так как вся физическая оптика и построена на использовании именно частотного языка и там он даже более естественен, чем временной. Зная спектр входного сигнала и АЧХ фильтра, можно судить о том, каков будет сигнал на выходе, и подобрать фильтр с такой АЧХ, чтобы, скажем, в выходном сигнале отсутствовала помеха на определенной частоте.

Для перехода с частотного языка обратно на временной необходимо еще знать и как изменяется фаза сигнала после прохождения через цепь, т. е. так называемую фазочастотную характеристику (ФЧХ). Соответственно для сигналов рассматривают также не только спектр амплитуд, но и спектр частот, правда, первый, как несущий информацию об энергии более употребителен.

В программе EWB для получения АЧХ и ФЧХ можно воспользоваться специальным прибором Боде-плоттером (Bode Plotter), названным по имени автора, американского радиоинженера Г. Боде. (Не путайте с французским изобретателем буквопечатающего телеграфного аппарата Ж.М.Э.Боде, по имени которого назван аппарат и единица скорости передачи сигналов «Бод».) Этот прибор находится в разделе Instruments.

Соберем схему согласно рис. 15,а. Исследуемый контур L1C1 подключен к генератору E1. Боде-плоттер выбирается по пикто-

грамме  в группе  Instruments (инструменты). Вход плоттера IN на  условном графическом изображении прибора надо соединить со входом контура, а его выход OUT с источником выходного сигнала (с подсобного измерительного резистора R1 вносящего небольшие потери).

Для получения частотных характеристик после сборки схемы необходимо вызвать изображение лицевой панели, дважды щелкнув ЛКМ по условному графическому изображению прибора. По умолчанию в появившемся полном изображении лицевой панели прибора (см. рис. 15,в) кнопки **Magnitude** (амплитуда) и **Log** (логарифмический масштаб) находятся в «утопленном» положении и для наблюдения АЧХ надо лишь в вертикальной и горизонтальной развертках произвести установки диапазонов моделирования по амплитуде F (от First – начальное значение) I (от In – конечное значение) и нажать на кнопку включающую моделирование. Далее

для наблюдения ФЧХ надо «утопить» кнопку  (фаза) и аналогично предыдущему установить начальное F и конечное I значение фазы, а затем включить моделирование. В результате на экране виртуального схемного прибора получаем вначале АЧХ, а затем ФЧХ (рис. 16,в). Для проведения количественных измерений на этих графиках можно воспользоваться вертикальной визирной линией, перемещаемой из левой части экрана курсором или кнопками с изображением стрелок  

Программа **EWB** позволяет получить частотные характеристики, сведенными на один экран. Для этого, после установки диапазонов и проведения моделирования, надо нажать на пиктограмму



Display Graphs (график на дисплее). В результате получатся графики резонансной АЧХ рис. 15,г, где Gain — коэффициент усиления, выраженный в децибелах, и ФЧХ рис. 15,г, где Phase — фазовый угол, выраженный в градусах (Degrees). В верхней части панели Analysis Graphs имеется набор инструментов для редактирования полученных графиков.

Пересоединив катушку и конденсатор, получим параллельный контур (рис. 16,а). Дадим команды на моделирование аналогично предыдущему случаю и получим АЧХ и ФЧХ (рис. 16,б) обратные предыдущим (рис. 15,г).

Проведем аналогичные исследования простейших колебательных контуров в программе **МС**.

Соберем схему согласно рис. 17,а. Для исследования частотных характеристик входим в режим Analysis (анализ) и выбираем в ниспадающем меню AC, т. е. Alternate Current (переменный ток). В появившемся окне AC Analysis Limits (границы анализа по переменному току) делаем установки опций в соответствии с рис. 17,б. Для включения режима моделирования нажимаем кнопку Run. Получаем на рис. 17,в АЧХ и ФЧХ, аналогичные рис. 15,б-г.

Совет
(MC)

Обратите внимание на численные установки в окне частотного анализа (рис. 17,б). Frequency Range (диапазон частот) имеет формат: «верхняя граница, нижняя граница». Number of Points (число точек) выбирается в зависимости от того, как взят шаг по частоте (Frequency Step). Если графики получаются

в виде отрезков ломанных прямых линий, то это свидетельствует о явно малом числе точек и его надо увеличить, перейдя к опции Log (логарифм) и подбирая экспериментально. Диапазоны изменения переменных вначале можно взять в автоматическом режиме (Auto), а затем подобрать по виду графика.

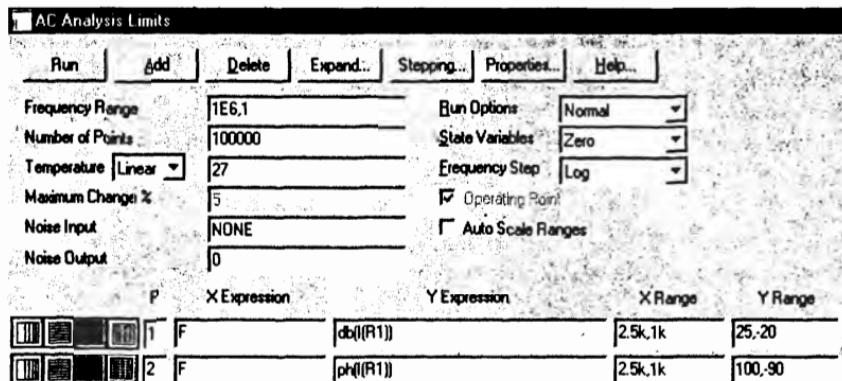
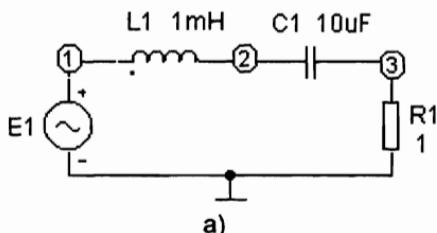


Рис. 17. Последовательный контур (МС)

Дополнительно исследуем поведение последовательного контура в режиме резонанса. Воспользовавшись АЧХ или по параметрам (индуктивности $L = 1 \text{ мГн}$ и емкости $C = 1 \text{ мкФ}$) контура и по формуле $F_0 = 1/(2\pi LC)$, найдем резонансную частоту $F_0 = 1600 \text{ Гц}$. Установим в модели источника переменного напряжения $E1$, возбуждающего контур (рис. 17,а), эту частоту. Зададим режимы моделирования переходных процессов согласно рис. 17,г и, включив моделирование, получим осциллограммы рис. 17,д. Из полученных осциллограмм видно, что напряжения на источнике $V(E1)$ и на резистивном элементе $V(R1)$ совпадают, а ток в резистивном элементе $I(R1)$ совпадает с этими напряжениями по фазе. Сдвиг фаз между током, протекающим в контуре, и питающим напряжением

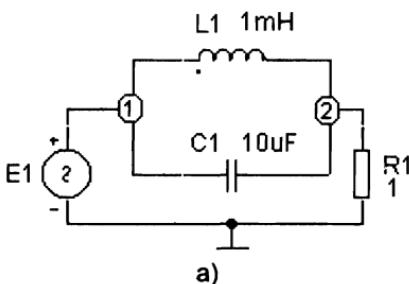
равен нулю (см. также ФЧХ на рис. 17,в). Напряжения на реактивных элементах: индуктивном $V(1,2)$ и емкостном $V(2,3)$, по амплитуде значительно превосходят напряжение источника и находятся в противофазе. Поэтому данный случай и носит название «резонанс напряжений».

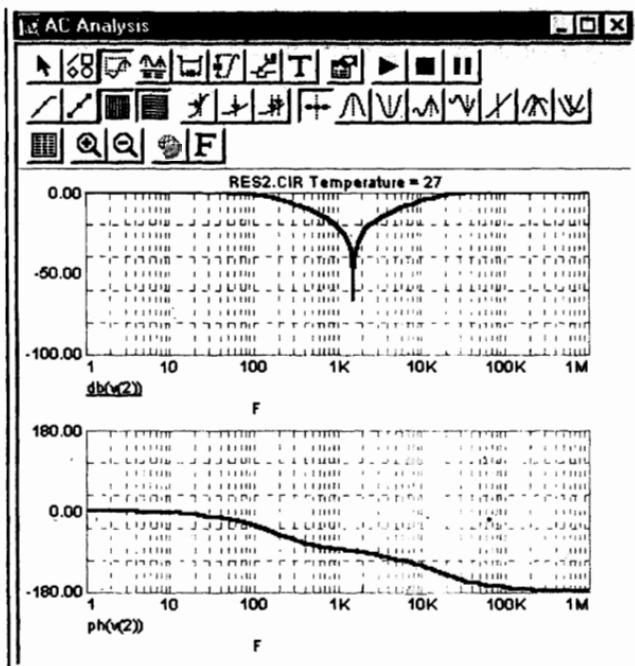
Для количественной оценки резонансных систем вводят их добротность, равную отношению энергии запасаемой в индуктивном или емкостном элементах к энергии рассеиваемой за один период свободных колебаний.

Добротность можно найти графически по ширине АЧХ по обе стороны F_0 на уровне 0,707 от амплитуды или рассчитать по формуле $Q = 2\pi F_0 L / R$. В данном случае, при $L = 1\text{мГн}$ и $R = 1\text{ Ом}$, $Q_1 = 10$, если же сопротивление уменьшить в 10 раз, то добротность соответственно увеличится в 10 раз ($Q_2 = 100$). Эти результаты показаны в режиме Stepping на рис. 17,в.

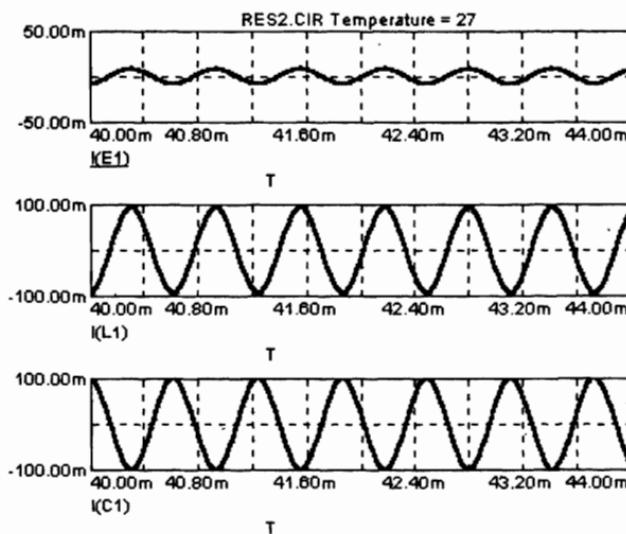
От последовательного контура переходим к параллельному (рис. 18,а). Проводим анализ на переменном токе (АС) и получаем АЧХ и ФЧХ (рис. 18,б), аналогичные рис. 16,б. Если провести более детальные исследования в режиме Transient (переходный режим), то в данном случае можно обнаружить, что на резонансной частоте полный ток $I(E_1)$ стремится к минимуму, а токи в параллельных ветвях находятся в противофазе. Поэтому данный случай носит название «резонанс токов».

Четырехполюсник, показанный на рис. 13,г, если оба двухполюсника являются резистивными элементами, часто используется в качестве простейшего делителя (аттенюатора – ослабителя) напряжения. Собрав соответствующую схему (рис. 19,а), можно убедиться, что выходное напряжение U_1 по отношению к входному U_2 делится в отношении $R_2/(R_1+R_2)$. Однако, это соотношение нарушается для нагруженного резистором R_3 делителя (рис. 19,б). Плавную регулировку выходного напряжения обеспечивает потенциометр (рис. 19,в).





б)



в)

Рис. 18. Параллельный контур (МС)

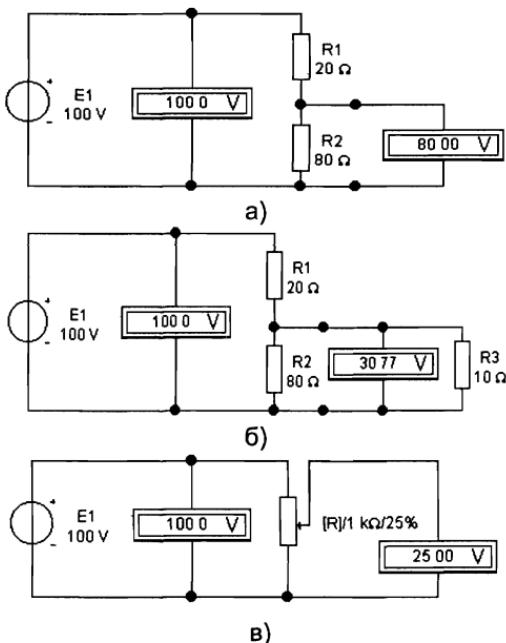


Рис. 19. Делитель напряжения (EWB)

Три двухполюсника могут быть соединены последовательно (рис. 20,а), параллельно (рис. 21,а), а также образовав смешанное соединение (рис. 20,в). Из них можно также образовать еще два новых трехполюсника: трехлучевую звезду (рис. 21,а) и треугольник (рис. 21,б). Здесь важен не геометрический вид картин соединения, а сам способ соединения, хотя они и получили свое название потому, что в принципе их можно начертить и в виде, действительно напоминающем звезду и треугольник (в данном случае это не предусмотрено графическим редактором).

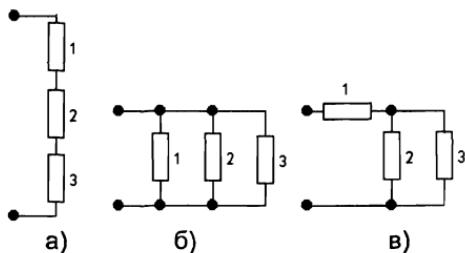


Рис. 20. Трехэлементные двухполюсники

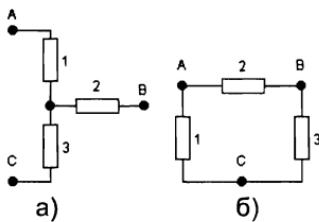


Рис. 21. Трехэлементные трехполюсники

Три двухполюсника могут также быть соединены как П- и Т-образный четырехполюсники (рис. 22, а, б). Если исходные двухполюсники являются резистивными, то получающиеся из них четырехполюсники выполняют функции аттенюаторов (ослабителей) сигнала. Если же исходные двухполюсники являются частотнозависимыми элементами (индуктивными и емкостными), то цепь работает как пассивный фильтр.

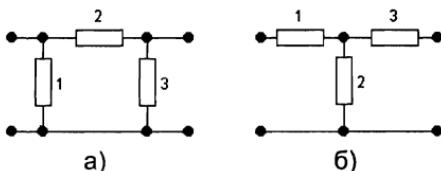


Рис. 22. Трехэлементные четырехполюсники

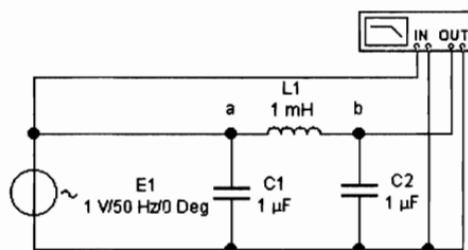
В электрических фильтрах производится необходимая частотная селекция сигналов: составляющие в некоторой полосе пропускаются, а в другой – задерживаются. Слово «фильтр» имеет франко-латинское происхождение: *feutre, filtrum* означают фетр, войлок (очевидно эти материалы использовались древними народами для очистки жидкостей).

Первый электрический фильтр (на индуктивно-емкостных элементах) был применен в 1880 г. русским военным связистом капитаном Г.Г. Игнатьевым для разделения телефонных и телеграфных сигналов, передаваемых по одной линии. Царское Военное ведомство так строго хранило свои секреты, что мир узнал об электрических фильтрах из других источников.

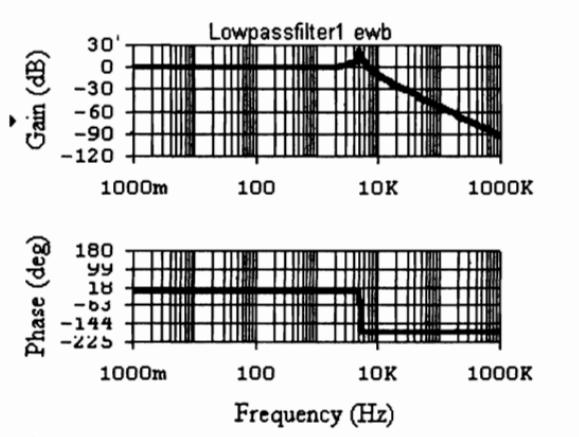
Исследуем частотные характеристики П-образных фильтров.

В программе **EWB** соберем симметричный фильтр, состоящий из одного индуктивного и двух емкостных элементов (рис. 23, а). На Боде-плоттере получаем АЧХ и ФЧХ (рис. 23, б). Видно, что получившийся фильтр пропускает сигналы низкой частоты, начиная

с сигнала нулевой частоты, то есть с постоянного тока, до сигналов с некоторой граничной частотой (частотой среза). Поэтому такой фильтр носит название фильтра низкой частоты (ФНЧ). Кстати, в акустике роль такого фильтра выполняет обычный автомобильный глушитель и его конструкция также аналогична: колеблющийся воздух (масса-инерция) играет роль индуктивности, а боковые внутренние объемы, обладающие упругостью на сжатие, играют роль емкостей. В результате глушитель, как акустический ФНЧ, пропускает постоянный поток воздуха и задерживает звуковые колебания с частотами выше некоторой. Найдя количественное соответствие между акустическими параметрами глушителя и моделирующей его электрической схемы в принципе можно провести подробное исследование его работы.



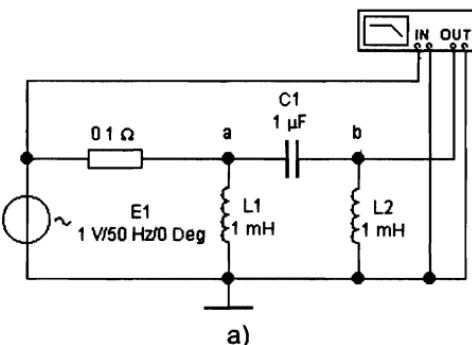
a)



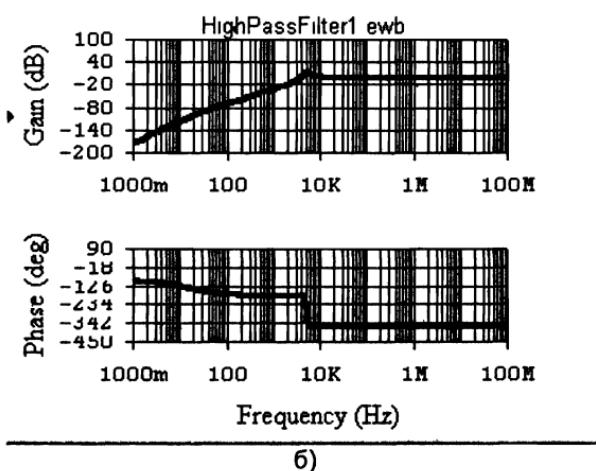
б)

Рис. 23. Фильтр низкой частоты (EWB)

Фильтр высокой частоты (ФВЧ) получится, если вместо «продольной» индуктивности включить емкость, а вместо «поперечных» емкостей – индуктивности (см. рис. 24,а). Резистор R1 на схеме имеет подсобное значение: в его отсутствие источник напряжения E1 оказывается короткозамкнутым через индуктивности L1 и L2, и программа не производит расчетов. Повторяя моделирование, получаем соответствующие АЧХ и ФЧХ (рис. 24,б).



а)



б)

Рис. 24. Фильтр высокой частоты (EWB)

В программе **МС** также можно исследовать аналогичные фильтры (см. рис. 25, 26), кроме того, в ее последних версиях даны специальные средства для синтеза аналоговых фильтров (см. далее раздел 5.4).

Соединив последовательно по входу ФНЧ и ФВЧ (рис. 27,а) можно взять с их выходов относительно заземления раздельные сигналы по низкой (low) и высокой (high) частоте.

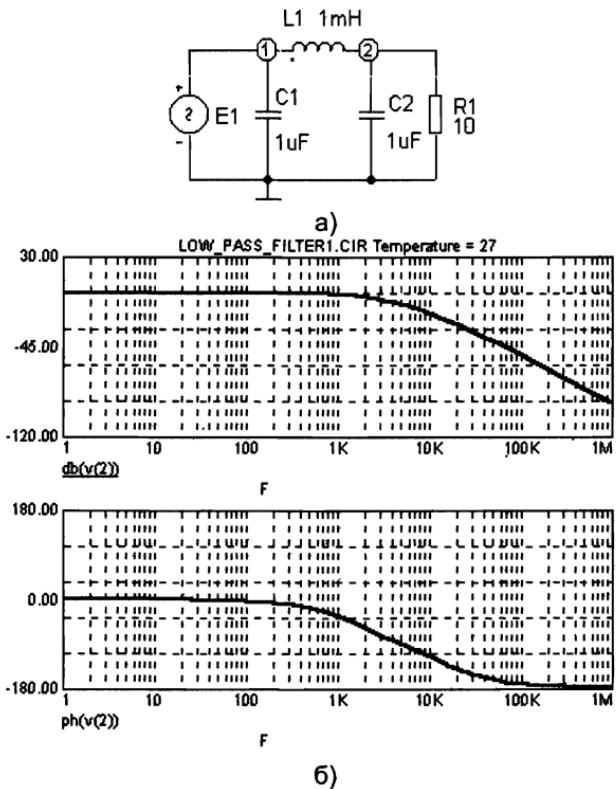
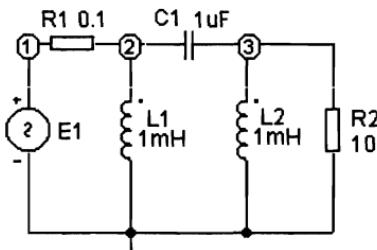


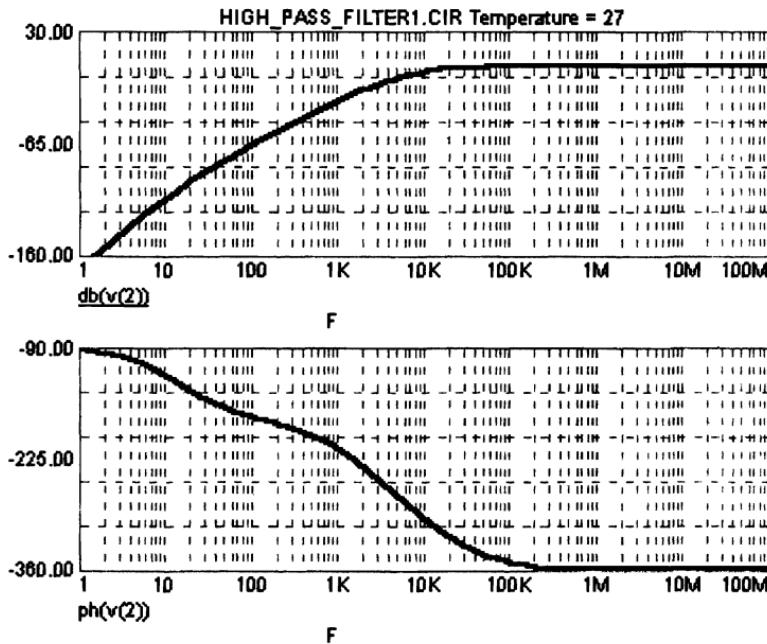
Рис. 25. Фильтр низкой частоты (МС)

При специально подобранных характеристиках ФНЧ и ФВЧ, со спадом и соответственно подъемом, которые пересекаются на одном уровне, получается так называемый кроссовер (от англ. crossover – крестовина, пересечение). На рис. 27,б показано прохождение через кроссовер сигнала с частотой 100 Гц, на рис. 27,в – 20 кГц, а на рис. 27,г – АЧХ. Собственно «кроссоверу» здесь соответствует частота в 1 кГц.

Подобное устройство используется в современной Hi-Fi (High-Fidelity – высококачественный) аудиотехнике. Кроссовер разделяет сигнал, снимаемый с усилителя мощности звуковой частоты по полосе частот на два канала: низкочастотный, подаваемый на сабвуфер («subwoofer» – «подвыпыватель», низкочастотный громкоговоритель) и средних и высоких частот, подаваемый на твитер («tweeter» – «пищалка», громкоговоритель высоких частот).

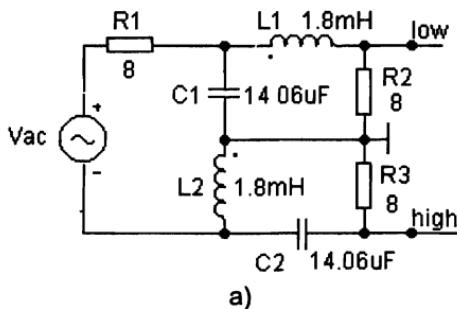


a)

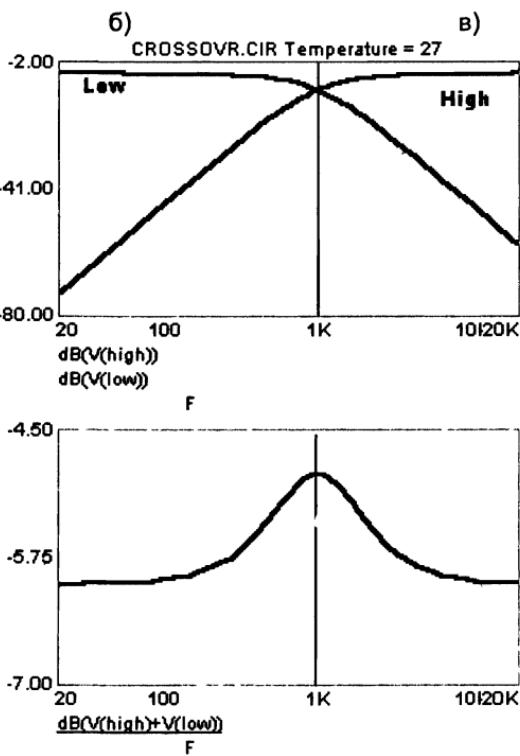
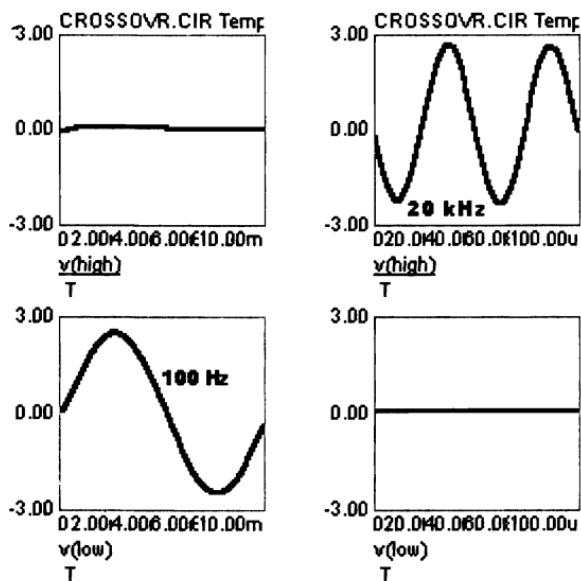


б)

Рис. 26. Фильтр высокой частоты (МС)



a)



г)

Рис. 27. Кроссовер (MC)

Как уже указывалось ранее, электрической схемой замещения можно моделировать не только чисто электрические цепи, но и физические устройства с более сложными видами преобразования энергии. Так, схема электрического двигателя (см. рис. 11) моделирует преобразование электрической энергии с некоторым КПД (зависящим от нагрева) в механическую энергию. В принципе можно построить модель для электромашинного генератора, осуществляющего обратное преобразование механической энергии в электрическую. В электронике также используются различные электромеханические преобразователи, например, так называемый пьезокварцевый резонатор. Рассмотрим его моделирование.

В 1880 г. французские ученые, братья Пьер и Жак Кюри, обнаружили, что при сдавливании пластинок, вырезанных определенным образом из горного хрустала, на их гранях возникают электрические заряды. Это явление получило название пьезоэлектрического эффекта (пьезоэффекта) от греческого слова «пьезо», означающего «давить». Вскоре, ими же, был открыт и обратный пьезоэффект, состоящий в механическом деформировании некоторых кристаллов под действием внешнего электрического поля.

Горный хрусталь – это прозрачные кристаллы бесцветного кварца (диоксида кремния SiO_2). Здесь мы встречаемся сразу с двумя ключевыми «героями», без которых немыслима современная микроэлектроника, а именно, с «кристаллом» и «кремнием». В связи с этим небезынтересно отметить, что когда древние люди впервые обнаружили в Альпах подобные камни, то решили, что это всего лишь очень сильно замерзшая вода, неспособная таять. Поэтому 2300 лет тому назад Теофаст назвал их «кристаллос» (по-гречески – лед).

Слово «кварц» видоизмененное название, которым этот минерал называли горняки Рудных гор в Германии, и имеет немецкие корни. Кремний же, составляющий основу всей неживой природы, достоин отдельной книги, поэтому ограничимся лишь двумя ремарками. «Камень, дающий огонь», так древние называли «кремень» – по латыни «силекс». От этого слова происходит научное название химического элемента «силициум» и родины микроэлектроники «Силиконовой Долины» (технополис в Калифорнии США). Одна из разновидностей кристаллов кварца по своему виду напоминает небольшой, очищенный с двух сторон шестигранный карандаш. Если ось Z направить по оси шестигранника, ось Y – перпендикулярно ей через одну из граней, то ось X пройдет соответственно через одно из ребер. Параллелепипед, вырезанный из кварца перпендикулярно оси X, с наименьшей толщиной по этой оси носит название X-среза (или среза Кюри). Взяв два металлических

электрода, и расположив их на противоположных гранях пластиинки, перпендикулярных оси X, получим своеобразный конденсатор.

Прямой пьезоэффект проявляется в том, что если подобную пластинку растягивать или сжимать по толщине X, то на обкладках конденсатора появляется электрический заряд, величина которого будет пропорциональна приложенной силе. Если же, напротив, к обкладкам подвести напряжение, то вследствие обратного пьезоэффекта толщина пластиинки будет изменяться. Закрепив пластиинку по контуру срединной плоскости ее толщины, получают простейший пьезокварцевый резонатор (пьезокварц).

Здесь необходимо отметить, что в электронике природный кварц вначале был заменен искусственным, а затем специальными пьезокерамиками, являющимися сегнетоэлектриками. Поэтому термин пьезокварц теперь используется скорее как собирательный. Сегнетоэлектрики являются диэлектриками, поведение которых в электрических полях аналогично поведению ферромагнетиков в магнитных полях. Величины пьезоэффектов в них на порядки больше, чем в кварце.

Термин сегнетоэлектрик, введенный в научный обиход И.В. Курчатовым, происходит от названия первого вещества, у которого в 20-х годах прошлого века были обнаружены эти свойства: кристаллов сегнетовой соли. Сегнетова соль представляет собой натриево-калиевую соль винной кислоты ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Это соединение было открыто еще в 1655 г. малоизвестным французским аптекарем по фамилии Сегнет (E. Seignette), проживавшим в легендарной крепости Ла Рошель. Столетиями эскулапы прописывали ларошельскую соль как слабительное средство... В англоязычной литературе этот класс веществ, в силу отмеченной аналогии поведения, называют по-другому и, на наш взгляд, не очень удачно ферроэлектриками. Связано ли это неприятие господина Сегнета с взаимной «любовью» англичан и французов или нет, история об этом умалчивает.

При приложении синусоидального напряжения определенной частоты пластиинка пьезоэлектрика будет совершать гармонические колебания по толщине с той же частотой. Амплитуда этих вынужденных колебаний зависит от амплитуды и частоты приложенного напряжения, геометрии, свойств материала пластиинки и характера ее закрепления. Постепенно увеличивая частоту внешнего возбуждения можно обнаружить, что АЧХ механических колебаний имеет остро резонансный характер, аналогичный кривой АЧХ последовательного электрического контура.

Обратимся к программе EWB. Вышеизложенное позволяет выбрать в электрической схеме замещения (рис. 28) величины ин-

дуктивности L_s , моделирующей механическую инерцию (зависящую от массы колеблющейся пластиинки), колебательной емкости, моделирующей упругость пластиинки при продольных колебаниях C_s и сопротивления R_s , связанного с внутренними потерями при циклических деформациях. Здесь, как принято, индексом s отмечены параметры последовательного (serial) контура. Характерной чертой природного пьезокварца, в отличие от других материалов, является малость внутренних потерь. Уточняя схему замещения, необходимо еще учесть собственную статическую емкость C_0 , образованную между обкладками пьезокварцевой пластиинкой и проявляющуюся в отсутствие колебаний. В данной схеме наблюдаются два резонанса: в последовательном контуре – резонанс напряжений и в параллельном контуре – резонанс токов. Это хорошо видно на экране Боде-плоттера (рис. 28). Для параметров указанных на схеме резонансная частота последовательного контура равна 1,5 МГц, а для параллельного – чуть выше.

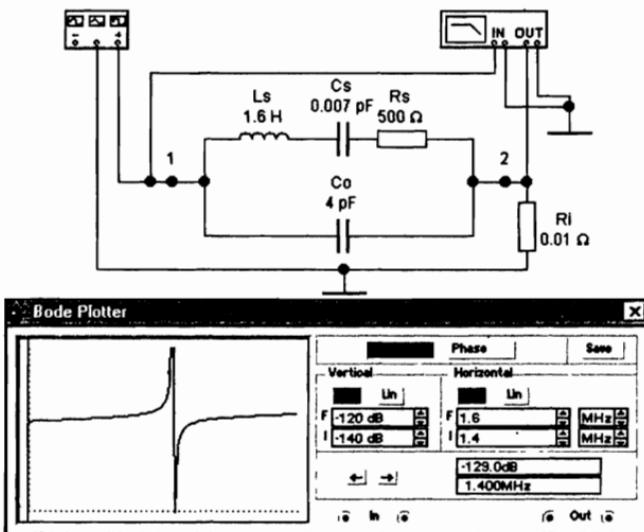
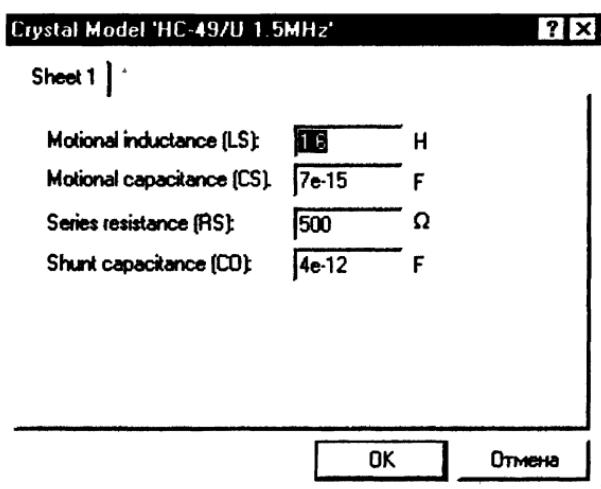
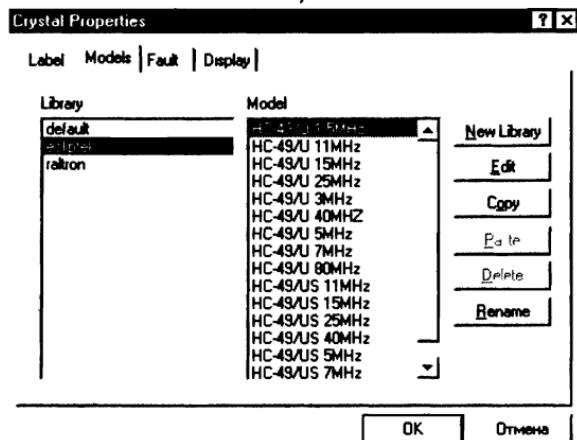
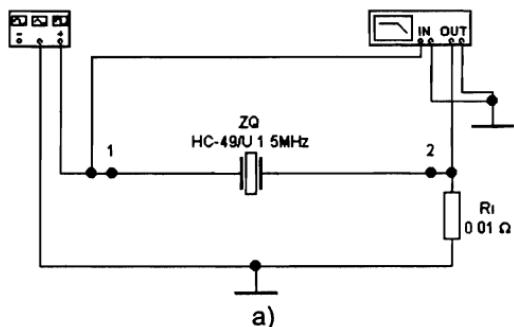
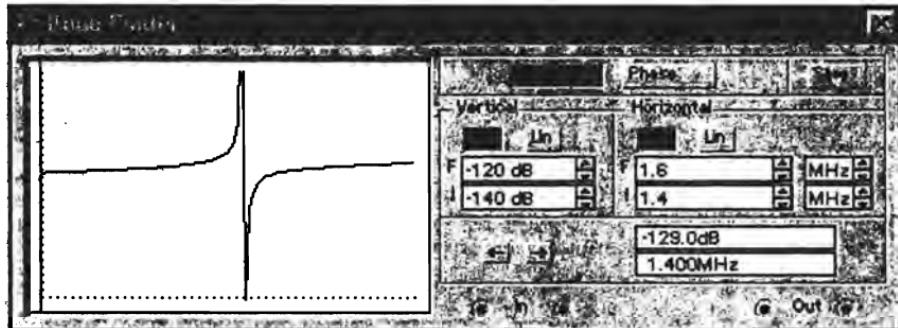


Рис. 28. Модель пьезокварца (EWB)

В разделе смесь программы EWB можно также открыть

готовый схемный компонент Crystal (кристалл) и собрать схему для его исследования (рис. 29,а). Свойства пьезоэлемента выбираются в соответствующих последовательно открываемых



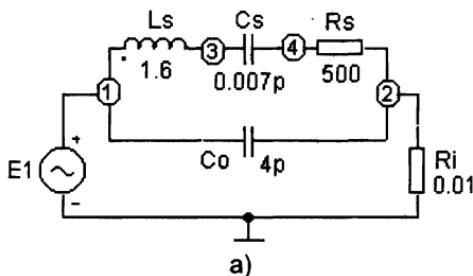


г)

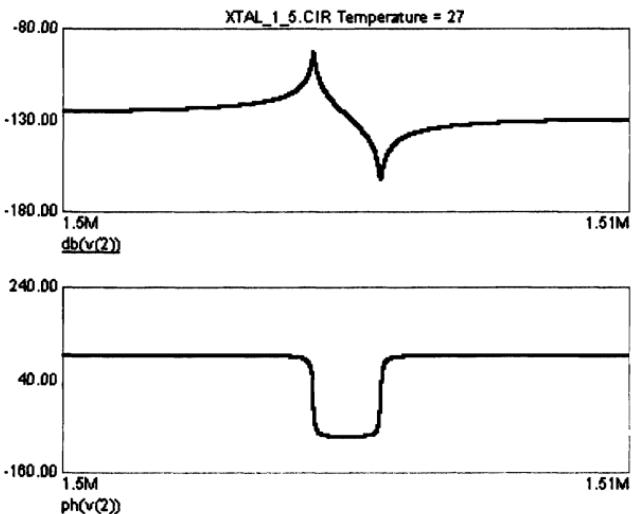
Рис. 29. Кварцевый резонатор (EWB)

окнах (рис. 29,б,в). Параметры выбранного резонатора ZQ соответствуют использованным в предыдущей схеме замещения (рис. 28), поэтому АЧХ, получаемая на Боде-плоттере (рис. 29,г) идентична.

Повторим моделирование кварцевого резонатора средствами программы **МС**. Выбрав схему замещения (рис. 30,а), аналогичную показанной на рис. 28,а и проведя ее моделирование, получим соответствующие АЧХ и ФЧХ (рис.30,б). Далее выберем готовый компонент: Component>Analog Primitives>Macros>Xtal (кристалл). Соберем схему согласно рис. 31,а. Свойства кристалла ZQ здесь задаются в формате «частота, сопротивление, добротность»: Xtal(fo,R1,Q). Сделанный выбор параметров показан в соответствующем окне на рис. 31,б, а результаты анализа в частотной области на рис. 31,в. Резистивный элемент R_i в схеме на рис. 31,а моделирует потери энергии в креплениях и на акустическое излучение в окружающую среду. Задавая определенную величину R_i , можно смоделировать работу, например, пьезоэлектрического суперзвитера («сверхпищалки»).

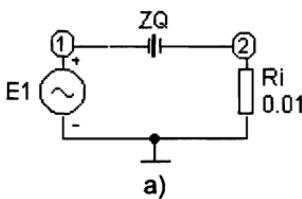


а)

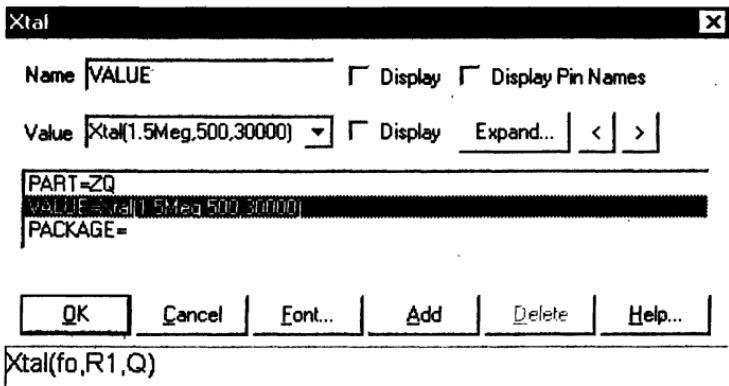


б)

Рис. 30. Модель пьезокварца (МС)



а)



б)

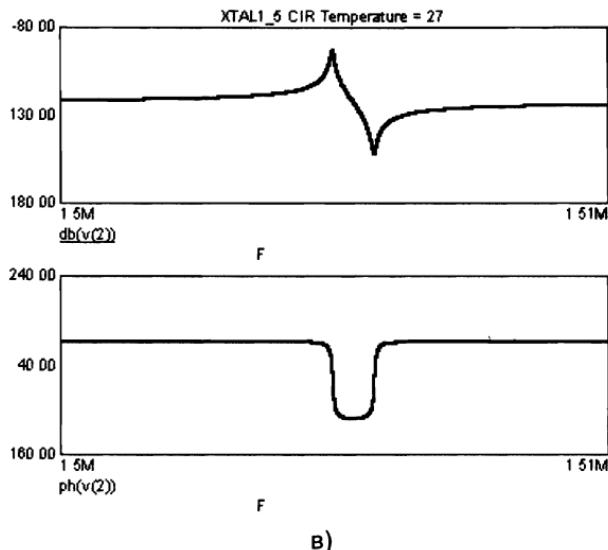


Рис. 31. Кварцевый резонатор (MC)

Сопоставление данных экспериментов, полученных с реальными пьезорезонаторами и на описанных виртуальных моделях в виде электрических схем замещения показывает их достаточно хорошее совпадение. Отсюда может сложиться впечатление, что на практике также вместо реальных кристаллов можно собрать цепь из соответствующих R, L и C компонентов. Реализация этой затеи особенно на высоких частотах вряд ли увенчается успехом. Корни обнаружившегося условного противоречия лежат в исходных принципах моделирования (см. выше). Не рассматривая всей проблемы, отметим лишь, что при виртуальном моделировании мы можем задавать любые значения для идеальных схемных элементов: и сколь угодно большие и сколь угодно малые. Добротность резонаторов из естественного кварца может достигать миллиона на мегагерцевых частотах, а LC контуров только десятков тысяч. На практике для указанных параметров индуктивности сразу же проявляются дополнительные потери в реальной обмотке и ее межвитковая емкость, не позволяющие выдержать необходимые характеристики. В реальном кристалле кварца нет никаких обмоток и придуманных нами соединений. Такова парадоксальность виртуальных моделей: в нарисованном доме жить нельзя. Однако после этих уничижительных «разборок» не следует впадать и в другую крайность: отвергать виртуальные модели. Напротив, их надо создавать и активно использовать, но по прямому назначению, не забывая о принятых допущениях и особенностях реальных систем.

Не приводя возможных дальнейших вариантов построения многополюсников, укажем лишь на мостовую структуру из четырех элементов (рис. 32,а) и пример ее реализации из полупроводниковых диодов (рис. 32,б). Последний пример показывает, что надо обращать внимание не только на то, как начертена схема, но и как в ней соединены элементы, где взяты входы и выходы. Число способов начертания одной и той же схемы бесконечно, так как в схемотехнической графике длины соединительных проводников, их геометрический вид и расположение элементов не влияют на свойства схем (пока речь не идет о трассировках печатных плат и микросхем).

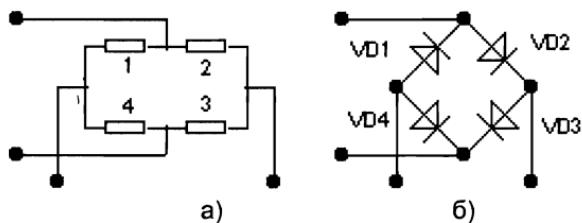


Рис. 32. Мостовая схема

При переходе к реальным цепям, например к печатным платам, эти факторы также начинают влиять на характеристики устройства за счет перекрестных наводок, неоднородного нагрева и тому подобных явлений.

Среди различных схем особое значение имеют планарные (плоские) схемы. Такие схемы можно начертить на плоскости без пересечения соединительных проводников. Пересечения с соединением в узлах и сами элементы при этом остаются прежними. Для подобных схем дорожки печатной платы или межсоединения в микросхеме также будут находиться в одном слое. Кроме того, такие схемы имеют двойственную (дуальную) структуру и математическое описание (уравнения), в котором напряжение и ток как бы меняются местами.

Описываемые структуры имеют следующую особенность геометрического перехода от одной к другой. Расположи внутри каждой замкнутой области плоскости чертежа на схеме этих структур (в своеобразных окнах) по одному узлу и еще один узел возьмем вне контура, ограничивающего всю схему. Затем однократным сечением через все элементы, лежащие на ограничивающих ветвях соединим введенные ранее узлы между собой и с внешним узлом. Если теперь на местах пересекаемых элементов расположить также взаимно двойственные, то получившаяся новая схема и будет дуальна первоначальной.

В качестве примера такого преобразования рассмотрим переход от последовательного контура к параллельному (рис. 33). Двойственными одноэлементными двухполюсниками здесь являются: источник напряжения E_1 – источник тока J_2 , индуктивный L_1 и емкостной элементы C_2 , резистивный элемент R_1 и элемент проводимости G_2 (с параметром равным величине обратной соотивлению). Общий ток в последовательном контуре I_1 перешел в общее напряжение в параллельном контуре U_2 , а если бы на схеме были указаны вольтметр и амперметр, то они также перешли бы один в другой. Заметим также, что с точки зрения топологии (как бы безразмерной геометрии) здесь дуальны контур и два узла, а с точки зрения физики сверхпроводник и сверхизолятор. Время, частота и фазовый угол не меняются (они инвариантны) при этом преобразовании. Интересными примерами двойственных цепей являются «звезда» и «треугольник», П- и Т-образный четырехполюсники. Зная поведение некоторой цепи свойства другой цепи ей дуальной, можно сразу описать без дополнительных исследований. Например, если некоторая цепь является ФНЧ, то ей дуальная – будет ФВЧ и, наоборот.

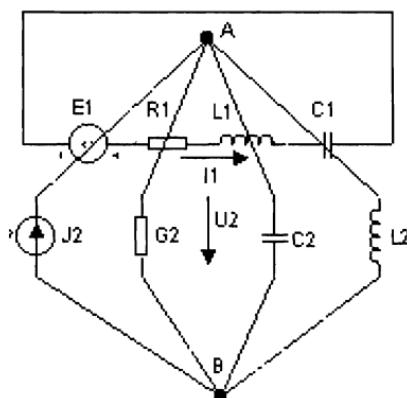


Рис. 33. Двойственные цепи

В принципе все последующие виды внутренней структуры многоэлементных четырехполюсников могут быть рассмотрены как различные сочетания соединений четырехполюсников. Два четырехполюсника могут быть соединены шестью различными способами. Наиболее распространенным является последовательное (каскадное, цепочечное) соединение.

1.5. Сигналы

*В далеком созвездии тау Кита
Все стало для нас непонятно.
Сигнал посыпаем мы: что это там?
– А нас посыпают обратно...*

В. Высоцкий

По образному выражению одного из основоположников теории электрических сетей (цепей) Г. Крона они состоят из двух структур, а не одной: «здесь присутствует одновременно «мертвая» подлежащая материальная сеть,...на которую накладываются два вида «живых» параметров...». Этими параметрами, «оживляющими» «мертвые» цепи и схемы, служат напряжения и токи.

В электронике различают напряжения и токи, задающие режимы работы цепей, как правило, это постоянные величины, и **электрические сигналы**, зависящие от времени и несущие определенную информацию.

Аналоговые электрические сигналы, в отличие от дискретных (в том числе и цифровых), представляют в виде напряжений и токов, значения которых определены в любой момент времени. Сам термин «аналоговый» перешел в электронику по наследству от аналоговых электронных машин. Эти сигналы непрерывно отображают порождающие их физические процессы: они являются их прямыми аналогами.

Среди аналоговых сигналов по ряду причин особое место занимают синусоидальные (гармонические) сигналы.

Во-первых, многие природные процессы подчиняются гармоническим законам.

Во-вторых, любые негармонические сигналы можно представить определенной совокупностью элементарных гармоник.

В-третьих, характеристики гармонического сигнала — амплитуда, фаза и частота — являются емкими и простыми информационными параметрами.

В-четвертых, гармонические сигналы удобны в технической реализации при их генерации, передаче, приеме и обработке.

Кроме того, синусоидально изменяющиеся напряжения и токи, так называемые переменные напряжения и токи, составляют основу электроэнергетики.

Программы **EWB** и **MC** предоставляют пользователю богатый инструментарий для моделирования сигналов и поведения цепей.

Открыв в программе **EWB** группу Source (источники)  [], можно выбрать в ней по пиктограмме AC Voltage Source

(источник переменного напряжения) и по пиктограмме AC Current Source (источник переменного тока). Эти источники допускают необходимую установку параметров (амплитуды, частоты и начальной фазы). Здесь же имеется генератор однополярных пря-

моугольных импульсов, выбираемый по пиктограмме  Clock (тактовый генератор), для которого можно задать максимальное напряжение, частоту повторения (следования) импульсов и выраженный в % коэффициент заполнения (Duty cycle), равный отношению длительности импульса к периоду их повторения. Кро-

ме того, в группе Instruments (инструменты)  находится еще специальный функциональный генератор (Function Generator), ко-

торый выбирается по пиктограмме  . Этот генератор позволяет создавать как гармонические сигналы, так и периодические последовательности знакопеременных треугольных и униполярных прямоугольных импульсов с различными характеристиками. В зависимости от того, какие характеристики сигналов подлежат измерениям, в программе **EWB** используются различные приборы. Для измерения действующих значений синусоидальных напряжений и токов вольтметры и амперметры, устанавливают в режим измерения на переменном токе: Mode AC (Alternate Current). Эти же величины можно измерить универсальным мультиметром, на-

жав на кнопку  и соответственно на кнопку   или  на изображении его развернутой лицевой панели.

Совет (EWB)

Не забывайте переустанавливать род тока виртуальных измерительных приборов: постоянного DC (по умолчанию) – на переменный AC. Помните, что приборы регистрируют действующие значения переменного напряжения и тока, которое в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных значений, задаваемых на генераторах.

Основным прибором, с помощью которого исследуют сигналы, безусловно, является осциллограф (Oscilloscope), имеющий специальную пиктограмму  в группе инструментов.

В русскоязычной научно-технической лексике более распространен термин «осциллограф», который обычно считается синонимом «осциллоскопу». Хотя, как не трудно догадаться из латинско-греческого состава этих слов: oscillum – колебание, graphō – пишу и scopeō – смотрю, между ними есть различие. Когда-то существовали механические осциллографы с записью колебаний на фотобумагу или фотопленку, которые осциллоскопами уж никак не назовешь. Теперь же компьютер, соединенный с принтером дает возможность и «скопию» и «графию» одновременно. Поэтому будем пользоваться обоими терминами.

Рассмотрим поведение RC-цепей, как пример исследования сигналов. Соберем в программе EWB схему Г-образного четырехполюсника (см. рис. 19,в), поставив в его продольную ветвь конденсатор $C = 1 \text{ нФ}$, а в поперечную – резистор $R = 1 \text{ кОм}$. Получаем дифференцирующую цепь (рис. 34). Луч А осциллоскопа соединим с выходом генератора прямоугольных колебаний, а луч В – с выходом четырехполюсника. Постоянная времени T в секундах для RC-цепи равна $T=R*C$ (где R надо взять в омах, а C в фарадах).

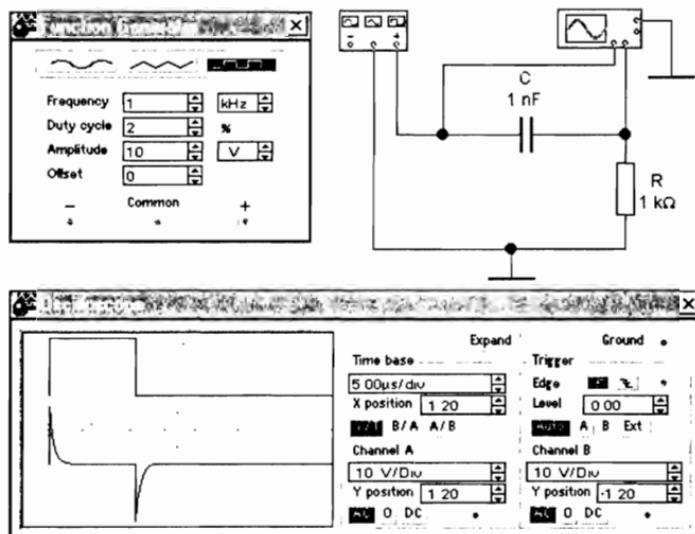
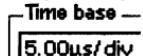


Рис. 34. Дифференцирующая RC-цепь (EWB)

В приводимом примере $T=1000 \text{ Ом} * 1*10^{-9} \Phi = 1*10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс}$. Установим период повторения импульсов на панели генератора и длительность импульсов $T_{\text{имп}}$ (зависящую от коэффициента заполнения), так чтобы они были много больше постоянной времени RC -цепи. В конкретном примере выбрана частота 1 кГц, следовательно, период повторения, как величина обратная, составит 0,001 с или 1 мс. Тогда, при коэффициенте заполнении в 2%, получим $T_{\text{имп}}=0,02 \text{ мс} = 20 \text{ мкс}$.

Для удобного наблюдения импульса на экране осциллографа выбираем длительность горизонтальной развертки (Time base)

5 мкс на одно (большое) деление шкалы 

Начало развертки смещаем на 1,16 деления установкой X position 1.16.

Чувствительность вертикальной развертки по каналам выбираем 10 В/дел, согласуя с величиной максимального напряжения на генераторе 10 В.

Поскольку изображение черно-белое и никаких дополнительных меток нет, то для того, чтобы лучи А и В несливались, раздвигаем их установкой положения по оси Y (Y position) вверх на 1,20 и вниз на -1,20 соответственно.

Совет (EWB) При проведении моделирования на компьютере удобно раскрасить цвета лучей осциллограмм, выбрав соответствующие цвета для проводников подводящих сигналы к соответствующим каналам.

Делаем также установки Y/T, Auto и AC (рис. 34). Наконец, для наблюдения одного кадра, войдя в Analysis и далее Analysis Option и Instrument, устанавливаем Pause after each screen (пауза после каждого кадра). Включаем моделирование. Из характера осциллограмм (рис. 34) видно, что прямоугольные входные импульсы превращаются на выходе в остроконечные, спадающие по экспоненте. При точном дифференцировании этих экспоненциальных «хвостов» не должно быть: должны быть импульсы в виде «линий-иголок».

Величина выходного напряжения приближенно равна производной от входного напряжения по времени, если постоянная времени цепи $T=R*C$ меньше длительности импульсов $T_{\text{имп}}$.

Поменяв R и C местами, при $R*C > T_{\text{имп}}$, получаем интегрирующую цепь: выходное напряжение пропорционально интегралу по времени от входного напряжения (рис. 35).

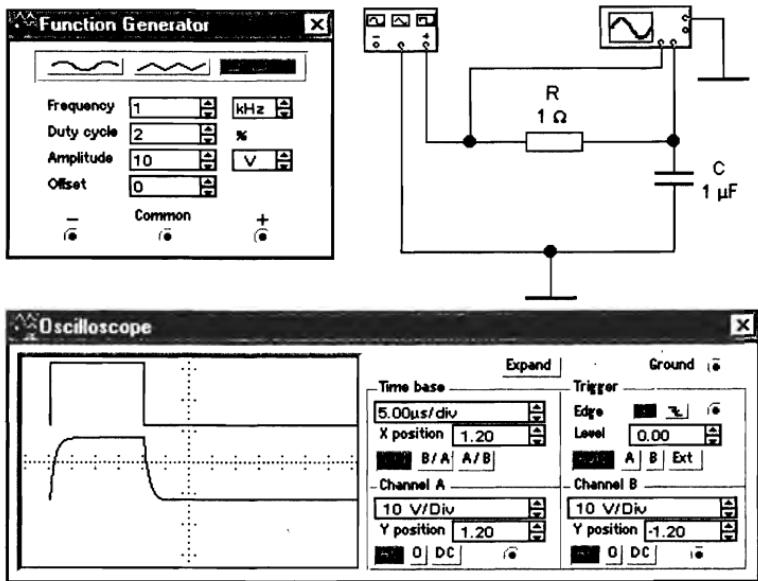


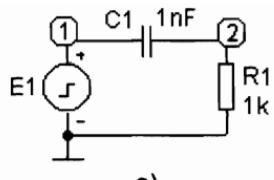
Рис. 35. Интегрирующая RC-цепь (EWB)

В программе **МС** источники сигналов находятся применением последовательности команд: Component (компонент)>Analog Primitives (аналоговые компоненты)>Waveform Sources (источники сигналов). Далее в этом последнем выпавшем меню выбираются в зависимости от конкретной задачи: Pulse Sources (источник импульсного напряжения), Sine Sources (источник синусоидального напряжения) и другие. Здесь также имеется возможность задавать источники сигналов сложной формы с помощью набора по специальным правилам математических выражений.

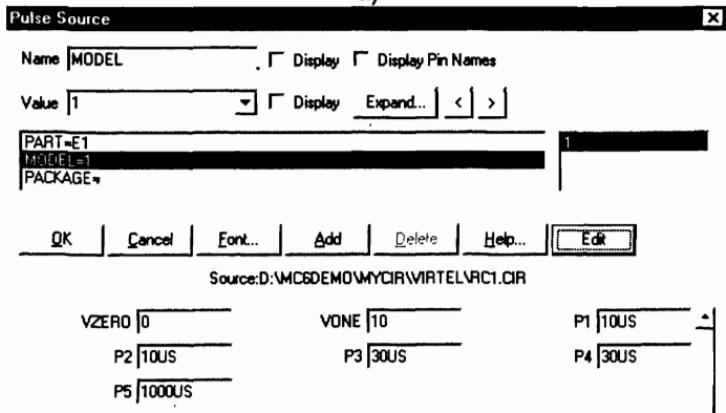
Для моделирования поведения дифференцирующей RC-цепи в программе **МС** выбираем импульсный источник E1 (рис. 36,а) и устанавливаем его параметры в окне свойств (рис. 36,б). Дополнительные нижние окошки, показанные на рис. (рис. 36,б) появляют-

ся после нажатия на клавишу редактирования

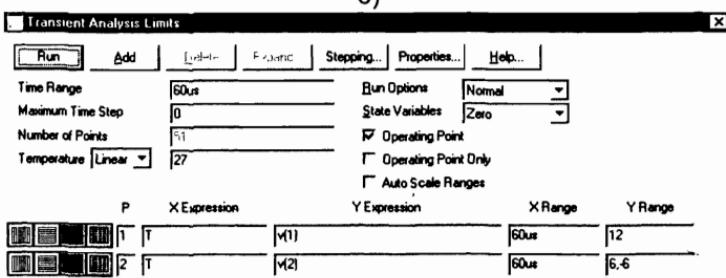
Значения параметров таковы: VZERO = 0 – начальное напряжение в вольтах, VONE = 10 – напряжение плоской вершины импульса в вольтах, P1 = 10 – начало фронта импульса в микросекундах (US, us или u), P2 = 10 US – начало плоской вершины импульса, P3 = 30 US – конец плоской вершины импульса, P4 = 30 US – конец спада импульса до уровня VZERO, P5 = 1000 US – период повторения импульсов. Для задаваемой последовательности времен



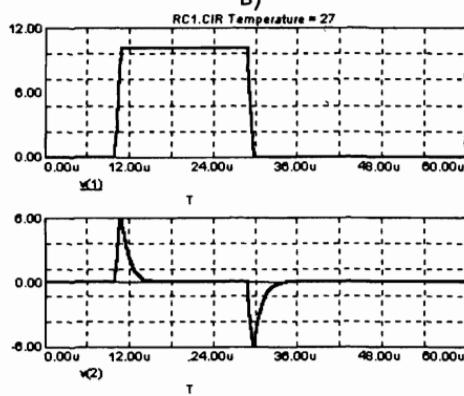
a)



б)



в)



г)

Рис. 36. Дифференцирующая RC-цепь (МС)

должны выполняться очевидные неравенства: $P5 \geq P4 \geq P3 \geq P2 \geq P1$. Если в левом нижнем углу основного рабочего окна программы нажать на кнопку  , то рядом возникает кнопка текст  , нажатие на которую в свою очередь приводит к появлению текстовой директивы модели, в данном случае:

.MODEL 1 PUL (VONE=10 P1=10us P2=10us P3=30us P4=30us P5=1000us). В этом окне также можно проводить редактирование параметров. Для того чтобы вернуться обратно в режим редактирования схем, надо нажать на кнопку  (страница 1).

**Совет
(МС)** Еще раз обратите внимание на то, что в качестве приставки, служащей для образования одной миллионной доли, т. е. микро, в этой программе используется латинские буквы прописная U или строчная u.

Помещаем на рабочее поле конденсатор $C1 = 1 \text{ пФ}$ и резистор $R1 = 1 \text{ кОм}$. Ориентируем и размещаем выбранные элементы необходимым образом. Подключаем заземление и устанавливаем нумерацию узлов (рис. 36,а). Вызываем окно (Transient) моделирования переходных процессов (рис. 36,в) и делаем в нем установки на моделирование. Включаем моделирование и получаем осциллограммы рис. 36,г, совпадающие по виду с осциллограммами на рис. 34. Поменяв R и C местами, получаем интегрирующую RC-цепь рис. 37,а. Проведя ее моделирование аналогично предыдущему, получаем осциллограммы рис. 37,б. Заменив в схеме генератор прямоугольных импульсов на гармонический (рис. 37,в) и проведя моделирование в режиме Stepping (пошаговая вариация параметра) с изменением величины R1 от 0,2 до 1 Ом, наблюдаем за характерной реакцией цепи.

**Совет
(МС)** При проведении моделирования на компьютере удобно раскрасить осциллограммы, выбрав соответствующие цвета при установке режимов моделирования или специально войдя в режим редактирования графиков.

Частотный «язык», о котором говорилось выше применительно к характеристикам схем, также широко используется при описании свойств сигналов. Любой сложный сигнал может быть представлен в виде спектров амплитуд и фаз. Само же слово спектр происходит от латинского spectrum, означающего видимое. Оно пришло в радиоэлектронику из физической оптики, в которой спектральные представления составляют фундамент теории.

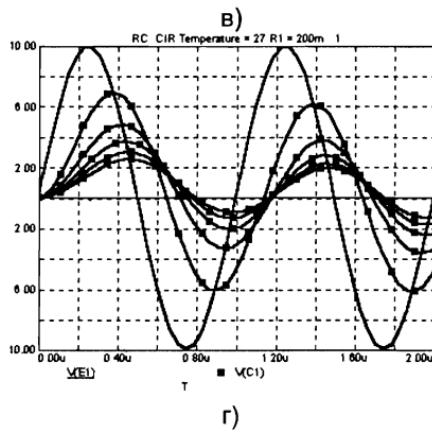
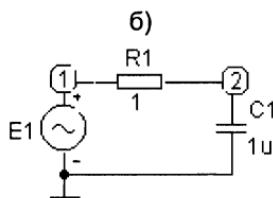
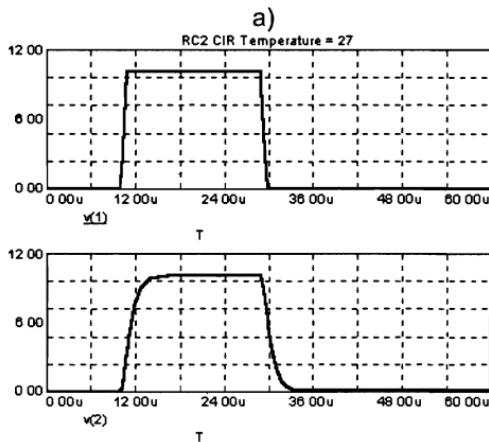
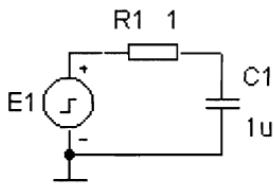


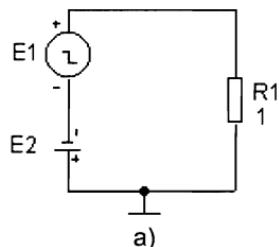
Рис. 37. Интегрирующая RC-цепь (МС)

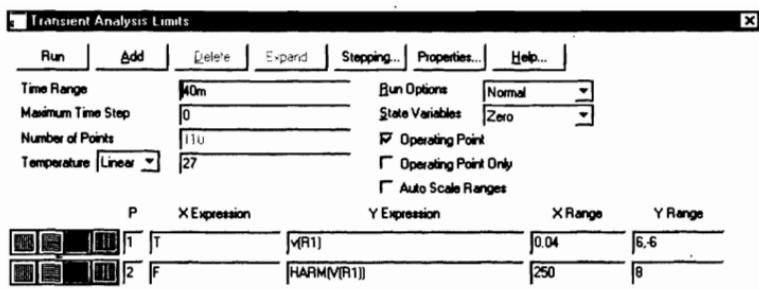
Для иллюстрации использования спектрального описания рассмотрим анализ и синтез сигнала в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов, напоминающей по форме меандр (греческий орнамент из прямоугольных завитков).

В программе **MC** возьмем генератор прямоугольных импульсов E1 с V_{ONE} = 10 В, длительностью 0,01 с и периодом повторения 0,02 с. Текстовая директива такова:

.MODEL 1 PUL (V_{ONE}=10 P1=0.ms P2= 0ms P3=10ms P4=10ms P5=20ms). Последовательно с ним включим источник постоянного напряжения E2, с ЭДС, равной 5 В (половине максимального значения напряжения импульсов E1), и полярностью, противоположной E1. В результате на общей нагрузке R1 (рис. 38,а) сформируется сигнал меандровой формы.

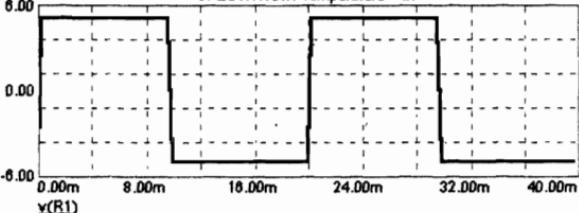
В окне задания параметров исследования переходных процессов для получения осциллограммы напряжения на нагрузке (рис. 38,б) в окошке X Expression (выражение по оси X) проставим T, а в окошке Y Expression V(R1). Для получения амплитудного спектра сигнала добавим (Add) еще один график, проставив в окошке X Expression F, а в Y Expression HARM(V(R1)): Здесь символ F взят от слова Frequency (частота), оператор HARM от слова HARMONIC (гармоника) и T от Time (время). Далее проставляем соответствующие диапазоны наблюдения или выбираем режим Auto (рис. 38,б). Включив моделирование (Run), получаем зависимость напряжения на нагрузке от времени и спектр амплитуд напряжений гармоник этого сигнала. Проведенный спектральный (гармонический) анализ показывает, что в этом сигнале наиболее выражены три гармоники: первая (основная) с частотой f₁, равной частоте повторения импульсов f₁ = (1/P₅) = 50 Гц, третья с f₃ = 3*f₁ = 150 Гц и пятая с f₅ = 5*f₁ = 250 Гц. Их амплитуды уменьшаются с ростом номера и равны соответственно U_{m1} = 6,4 В, U_{m3} = 2,6 В и U_{m5} = 1,3 В. Все три гармоники в данном случае синфазные и их начальные фазы равны нулю. В природных оптических явлениях мы часто встречаемся с подобным «анализом», например, сложный белый свет, пройдя через мельчайшие водяные капельки, образует картину спектра в виде многоцветной радуги.



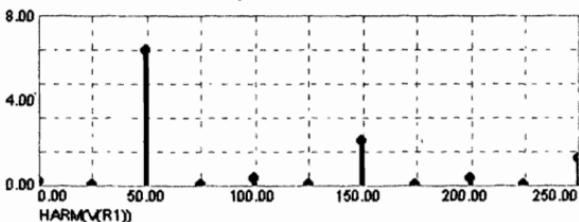


б)

SPECTR1.CIR Temperature = 27



T



F

в)

Рис. 38. Спектральный анализ меандрового сигнала (МС)

Теперь просуммируем полученные гармоники, т. е., восстановим (синтезируем) исходный сигнал. Соберем схему из трех источников синусоидального напряжения, параметры которых выберем в соответствии с проведенным выше анализом, и включим их на общую нагрузку (рис. 39,а). Текстовые директивы на задание параметров генераторов гармоник:

- .MODEL 1 SIN (F=50 A=6.4),
- .MODEL 3 SIN (F=150 A=2.6),
- .MODEL 5 SIN (F=250 A=1.3).

Повторяем моделирование в режиме Transient и получаем осциллограммы трех складываемых гармоник (рис. 39,б) и результат их сложения (рис. 35,в). Видно, что синтез даже при такой грубой аппроксимации, при котором учитываются только три первые гармоники, дает форму сигнала, приближающуюся к прямоугольной.

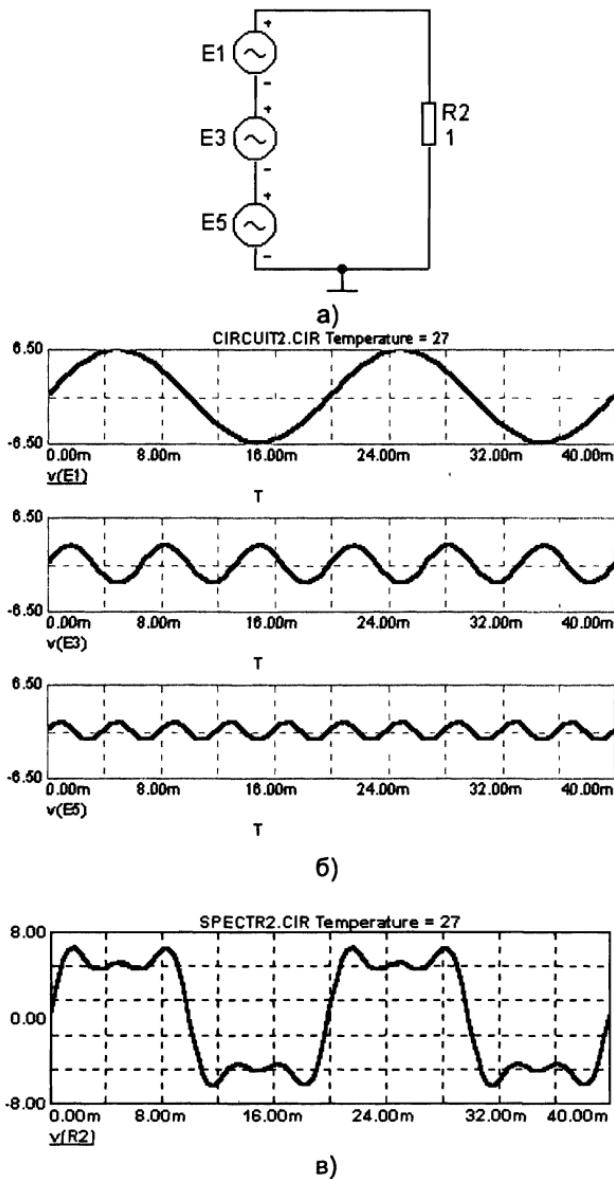


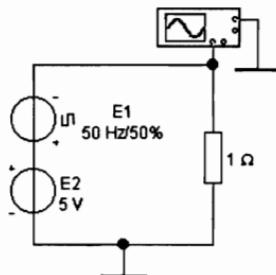
Рис.39. Синтез меандрового сигнала (МС)

В соответствии с теоремой число гармоник в разложении бесконечно. (Ж. Фурье – французский математик наполеоновской эпохи. Один из участников знаменитого египетского похода, защищая которых, Наполеон дал команду, ставшую исторической: «Ослов

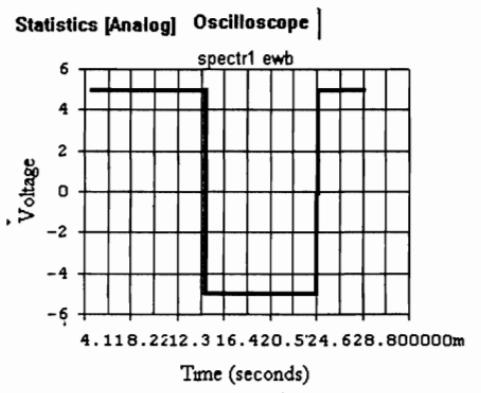
и ученых в центр каре!») На практике пользуются тем, что амplitуды гармоник достаточно быстро убывают с ростом их номера и исходный ряд обрывают в зависимости от требуемой точности.

Процедура синтеза также имеет наглядную оптическую аналогию в получении сложного цветного изображения в телевизионном кинескопе или на дисплее компьютера из трех составных: красного (Red), синего (Blue) и зеленого (Green). В полиграфии (в том числе и в цветных принтерах), поскольку белый цвет уже задан бумагой, используется смешение других цветов: голубого, пурпурного, желтого и черного.

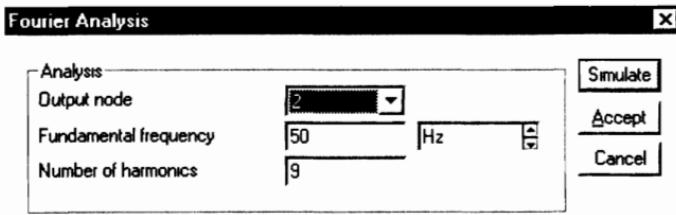
В программе EWB также можно провести аналогичные спектральные исследования. Используя генератор прямоугольных импульсов Clock и источник постоянного напряжения Battery, соберем соответствующую схему (рис. 40,а). Для удобства сравнения полярности источников по отношению к земле поменяем на противоположные. Все установки выполним такими же, как и для рис. 38.



a)



б)



б) Statistics [Analog] | Oscilloscope Fourier |

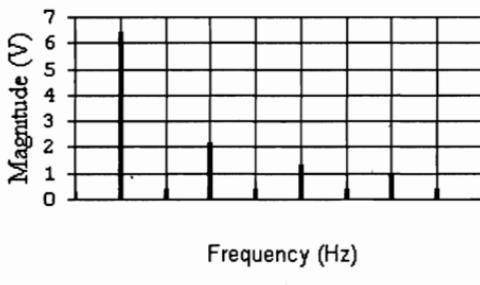
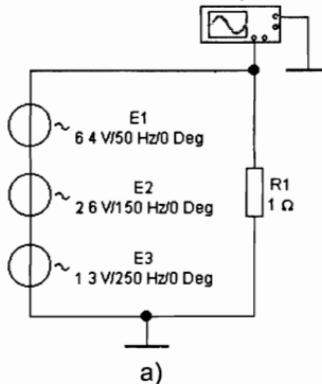


Рис. 40. Спектральный анализ меандрового сигнала (EWB)

Проведя моделирование, как обычно, получаем осциллограмму напряжения на резисторе (рис. 40,б). Затем, войдя в Analysis, выбираем анализ Fourier (Фурье) и делаем соответствующие установки (рис. 40,в). Нажав в этом окне кнопку Simulate (моделирование), получаем спектр исследуемого сигнала (рис. 40,г).

Для проведения синтеза собираем схему по рис. 41,а. Нажав на кнопки Display Graphs и Activate simulation, получаем осциллограмму синтезированного сигнала (рис. 41,б). Нетрудно видеть, что результаты анализа и синтеза в обеих программах совпадают, хотя техника их проведения и представления несколько различаются между собой.



а)

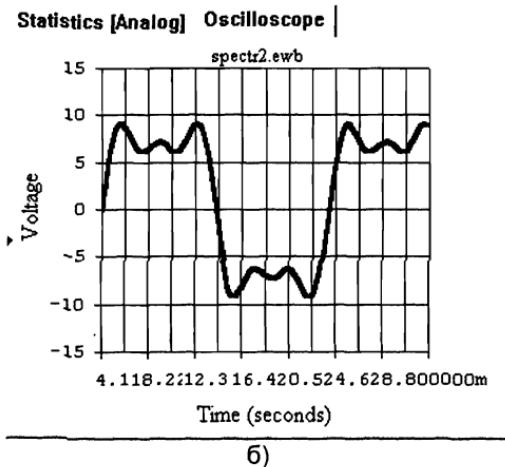


Рис.41. Синтез меандрового сигнала (EWB)

Рассмотренные методы моделирования будут использованы дальше для анализа работы разнообразных электронных устройств, но в них появятся полупроводниковые компоненты, со своими богатыми особенностями, на использовании которых собственно и основана электроника.

2. ДИОДНЫЕ СХЕМЫ

«Что такое полупроводник? – Да это один проводник на два вагона». **Анекдот**

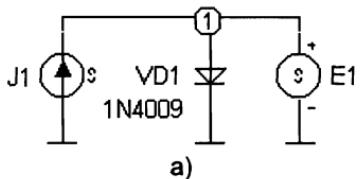
2.1. Диоды

С полупроводников фактически началась эра твердотельной электроники (микроэлектроники), которая сейчас оставила далеко позади электронику вакуумную и газоразрядную. Основным «героем» различных полупроводниковых структур является так называемый *p-n* переход. Здесь: *p* – от positive, т. е. положительный, область дырочной проводимости, а *n* – от negative, т. е. отрицательный, область электронной проводимости. Схемотехническое изображение диода, в котором реализован *p-n* переход, соответствует мнемоническому правилу, согласно которому стрелку тока на схемах показывают во внешней электрической цепи источника от его «плюса» к его «минусу». Таким образом, треугольник (символ стрелки тока) – это как бы *p*-область «+», а вертикальная черта – это *n*-область «-». Поскольку подобное устройство является диодом, то по аналогии с электровакуумным диодом, соответствующие выводы часто называют анодом и катодом. Особенность работы диода в цепи отражается в его ампервольтной характеристики: зависимости тока от напряжения. На практике ее часто называют «Вольт Амперной Характеристикой» (ВАХ), хотя, строго говоря, эти характеристики обратны друг другу. Для получения ВАХ диода воспользуемся программой **MC**.

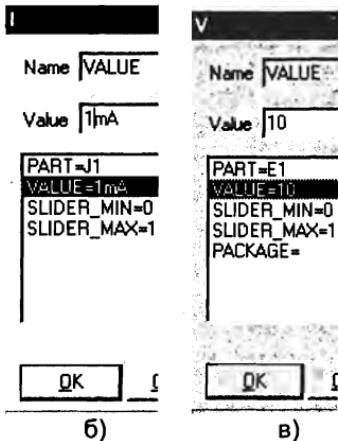
Моделирование работы диода

Сборка виртуальной схемы производится согласно (рис. 42,а). Открываем основное рабочее окно программы и в нем нажимаем на кнопку **New** (новый) или с клавиатуры **Control+N**. Затем, в появившемся ниспадающем меню, выбираем опцию **Schematic** (схемы). Наводим курсор на кнопку с изображением стрелки **Select**

Mode (выбор объекта)  - и нажимаем ЛКМ. Подводим стрелку-курсор к надписи **Component** (компонент) и нажимаем ЛКМ. Аналогично в разворачивающихся подменю последовательно выбираем **Analog Primitives** (аналоговые компоненты), **Waveform Sources** (источники сигналов), **ISources** (источники постоянного тока). На последней позиции нажимаем ЛКМ и фиксируем указатель на рабочем



a)



б)

в)

Рис. 42. Схема получения ВАХ диода (**МС**)

поле. Там возникает графическое изображение источника тока, и затем меню для его редактирования (на рис. 42.б показана информационная часть этого окна). В окошке Part (компонент) печатаем позиционное обозначение J1, а в окошке Value задаем ток источника 1mA, нажимаем ЛКМ на кнопку ОС в этом окне и окончательно на кнопку Select Mode.

Аналогично выбираем E1 (источник постоянного напряжения) и в окне редактирования Value (рис. 42.в) печатаем 10. Можно не указывать единицы измерения, тогда по умолчанию будут приняты основные единицы, для данного случая Вольт. Буквы S, видимые на УГО источников происходят от их английского названия Source.

Последовательно проходим по позициям: Component>Analog>Primitives>Passives Primitives>Diode и в открывшемся окне выбираем диод марки 1N4001 (аналог КД226А). Аналогично, последовательно пройдя по позициям: Component>Analog Primitives>Passives Primitives>Ground и выбираем заземление.

*Совет
(МС)*

В отличие от программы **EWB**, где заземление редкость и зачастую не обязательно, в программе **МС** хотя бы одна «земля» в схеме должна присутствовать обязательно.

Нажимаем ЛКМ три раза в разных местах рабочего поля и получаем три «земли», если ориентация выбранного компонента оказывается не подходящей, то поворотами устанавливаем требуемый вариант. Переходим в режим Select Mode. Буксируем «земли» к источникам и диоду и присоединяем к ним, т. е. заземляем их (рис. 42,а).

Нажимаем на кнопку Orthogonal Wire (ортогональные проводники) и соединяем проводником верхние выводы компонентов. Переходим в режим Select Mode. Нажимаем на кнопку Displays node numbers (обозначения узлов на схеме).

Этим осуществляется проверка целостности соединений в собранной схеме. Выводы, связанные с землей не нумеруются. В данной схеме при правильном соединении возникает только один нумерованный узел (см. рис. 42,а).

Совет (MC) В отличие от программы EWB, в программе MC проверка на целостность обязательна.

Итак, схема готова для моделирования.

Построение ВАХ диода

Выбираем в основном меню Analysis (анализ), а в ниспадающем меню DC, т. е. Direct Current (постоянный ток). В появившемся окне DC Analysis Limits (границы анализа по постоянному току) делаем установки опций в соответствии с рис. 43. Идея проведения

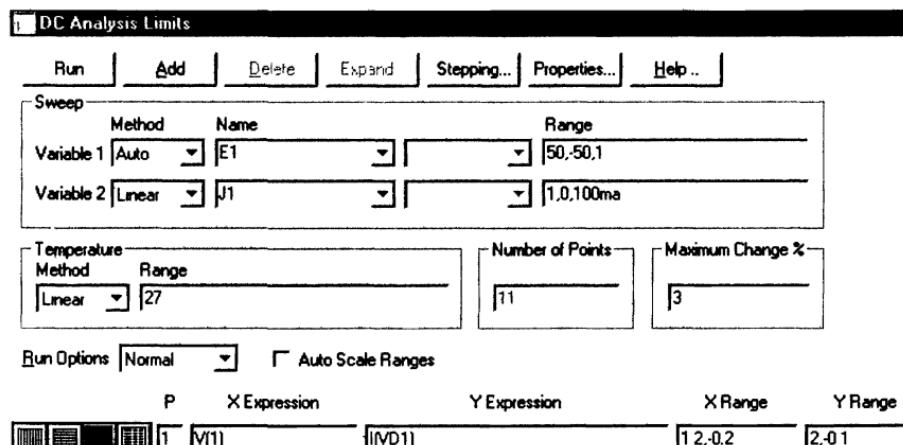


Рис. 43. Окно задания параметров моделирования диода (MC)

этого анализа заключается в проведении многократных расчетов цепи на постоянном токе при вариации в заданных пределах параметров источников Variable 1 и Variable 2. Поскольку один источник «работает» по оси абсцисс, а другой по оси ординат, то в результате получается необходимая характеристика. Для включения режима моделирования нажимаем на кнопку Run, клавишу F2 или кнопку ► на пиктограмме. Возникает график ВАХ (рис. 44). Из графика видно, что при прямом включении диода (правая половина графика) ток растет экспоненциально росту напряжения (в соответствии с заложенной в программу моделью диода). При обратной полярности диод заперт, и ток остается равным нулю, несмотря на рост отрицательного напряжения. Для выхода из режима анализа надо нажать на кнопку DC или клавишу F3.

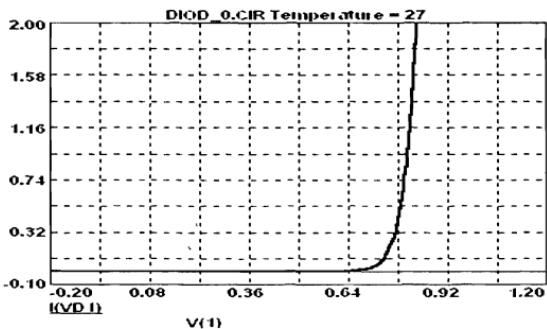
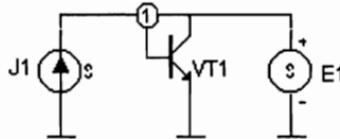


Рис. 44. ВАХ диода (МС)

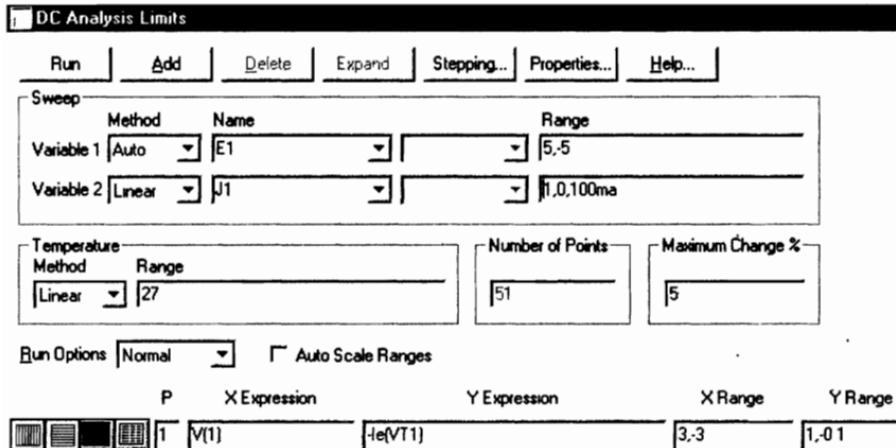
В интегральных микросхемах часто используется транзистор в диодном включении. Смоделируем его работу. Скопируем схему исследований диода на новый лист. Выделим диод и удалим его. Найдем в компонентах *p-p-n* транзистор и выберем первый в списке тип BC107A. Поместим его вместо диода и замкнем базу на землю (рис. 45,а). Изменим параметры источников (хотя модель «стергит» и их). Проверим целостность схемы (см. выше). Проводим анализ с установками согласно рис. 45,б. Обратите внимание на знак минус перед I, связанный со спецификой выбора знаков напряжений и токов в программе МС. Полученный результат (рис. 45,в) соответствует работе идеального диода.

Статические характеристики диода или транзистора в диодном включении можно получить и в программе EWB. Для этого необходимо собрать схему в соответствии с рис. 46.

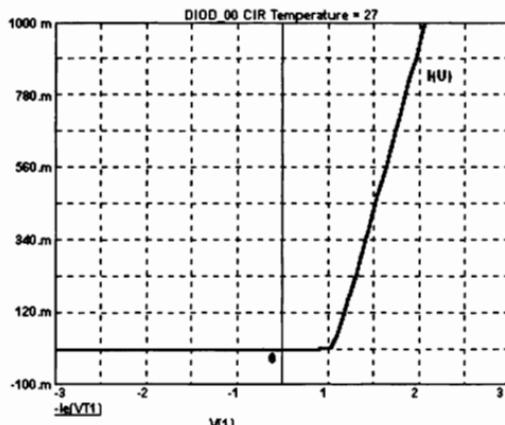
Здесь использован функциональный генератор (Function Generator) и осциллограф (Oscilloscope) из раздела Инструменты (Instruments). Резистор R1 является токоограничивающим, а рези-



a)



b)



b)

Рис. 45. ВАХ транзистора в диодном включении (МС)

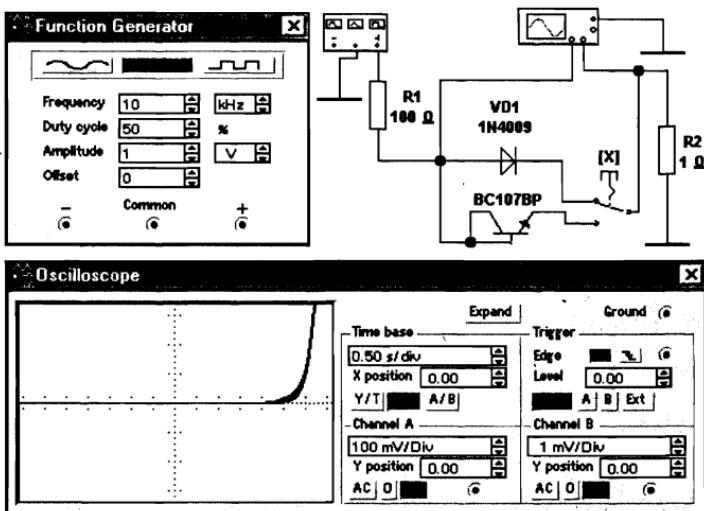


Рис. 46. ВАХ диода (EWB)

стор R2 – играет роль датчика тока (поскольку напряжение на нем в соответствии с законом Ома прямо пропорционально протекающему току). Установки режимов генератора и осциллографа подобраны для получения необходимой картины. Переключая клавишу Space и включая моделирование, можно наблюдать соответствующие характеристики на экране. Вид их уступает картине в МС, хотя здесь тоже имеется возможность наблюдения их в расширенном масштабе (рис. 47). Для этого надо нажать на кнопку Expand (расширение) на лицевой панели осциллографа (см. рис. 46). Здесь же можно переустановить режимы развертки и провести детальные измерения с помощью двух специальных курсоров. Можно также получить более детальную картину по-другому: войдя в опцию Analysis и далее Display Graphs (график на дисплее). Результат показан на рис. 48. В последнем случае можно развернуть картину на весь экран, нажав на кнопку расширения, находящуюся в окне Analysis Graphs (рис. 48).

Пожалуй, наиболее просто и качественно можно получить ВАХ в программе EWB, используя возможность проведения многовариантного анализа (DC Sweep).

Соберем простейшую схему (рис. 49,а). Последовательно нажав ЛКМ Analysis>DC Sweep, откроем окно выбора режима моделирования (рис. 49,б). Проставив в этом окне соответствующие

величины и нажав на кнопку **Simulate** (моделирование), получим идеализированную (линеаризованную) ВАХ диода (рис. 49,в).

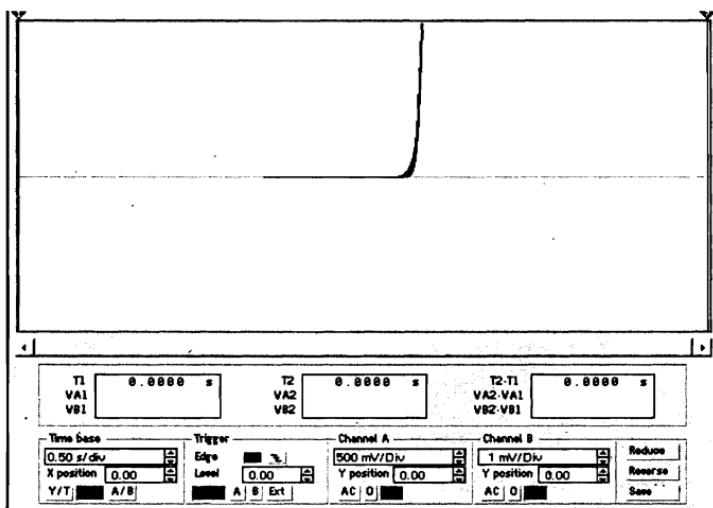


Рис. 47. ВАХ диода в режиме Expand (EWB).

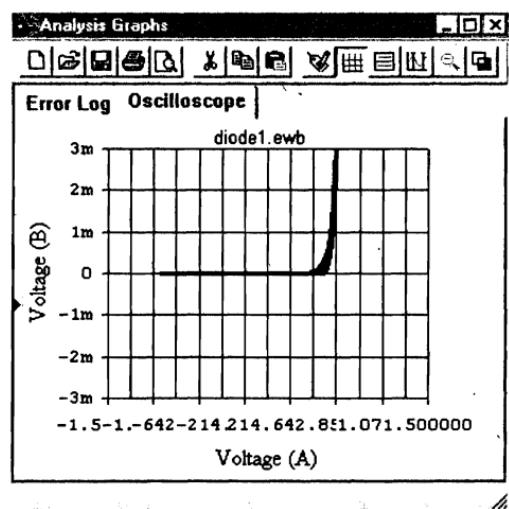
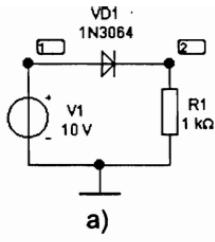
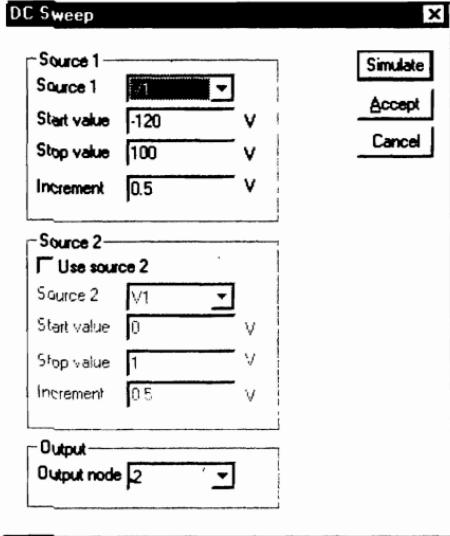


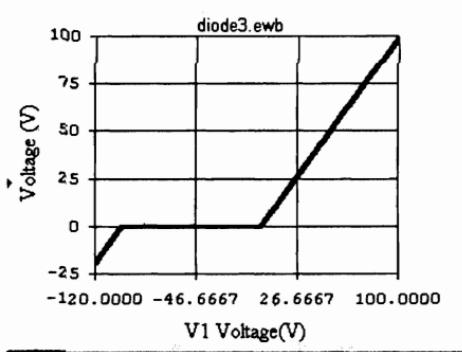
Рис. 48. ВАХ диода в опции Analysis (EWB)



a)



б)

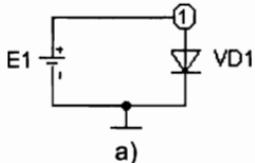


в)

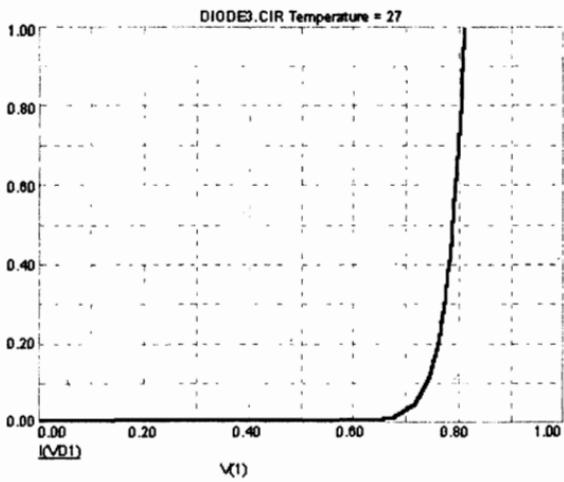
Рис. 49. ВАХ диода в режиме многовариантного анализа (EWB)

Для получения требуемых характеристик необходимо правильно выбрать номер выходного узла **Output node** в нижней части окна. Этот узел можно специально проставить на схеме, либо перебрать предлагаемые в этом окошке номера, которые программа ввела автоматически.

В программе **MC** тоже можно получить ВАХ, варьируя один параметр. Соберем схему по рис. 50, а и откроем окно анализа на постоянном токе аналогично рис. 45, б. В позиции Name печатаем имя источника E1. В позиции Range (диапазон) задаем диапазон и шаги для расчета: **1,0,.1**. Здесь первая цифра соответствует верхней границе диапазона (1 В), вторая цифра – нижней границе (0 В) и, наконец, третья цифра означает 0,1 В (в целях экономии принято непечатать только разделительную точку и дробную часть числа), этим и задается собственно сам шаг. Выбрав далее переменные по X **V(1)**, а по Y **I(VD1)**, и нажав Run, получим ВАХ диода (рис. 50, б). Кроме того, в программе **MC** имеется также возможность проведения более полного многовариантного анализа, за счет использования специального раздела **Stepping** (пошаговый режим).



a)



б)

Рис. 50. Упрощенный вариант получения ВАХ диода (**MC**)

**Совет
(MC)**

Будьте внимательны при задании границ диапазона и шага моделирования. Между отдельными числами ставится разделительная запятая, а в десятичных дробях целая часть числа отделяется от дробной части разделительной точкой. В случае если целая часть равна нулю, то ее можно не писать, а начинать с точки. Например, как это сделано выше: .1 написано для шага 0.1.

В EWB можно наглядно показать, как быстро на практике проверяются диоды мультиметром. Для этого, переключив мультиметр в режим омметра, измеряем сопротивление диода при прямом (рис. 51,а) и обратном (рис. 51,б) включениях. Из показаний видно, что сопротивления при этом отличаются в 100 раз. Для реального неисправного диода они были бы одинаково маленькими – у «закороченного» и одинаково большими при обрыве внутри.

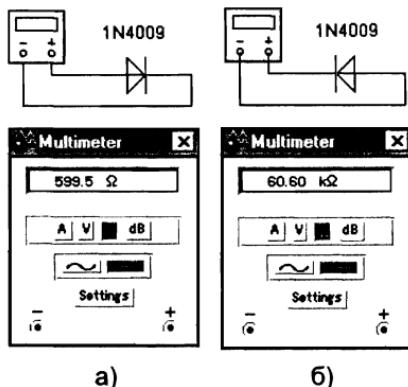


Рис. 51. Испытание диода (EWB):
а – прямое включение; б – обратное включение

Диоды широко используются в качестве элементов выпрямителей, для детектирования и ограничения сигналов.

2.2. Выпрямители

Горбатого исправят мостика,
а упрямого дубина.
Русская пословица

Однополупериодный выпрямитель

Бестрансформаторные схемы

Виртуальная модель в EWB (рис. 52).

Виртуальные компоненты.

Источник переменного напряжения E1: действующее значение напряжения (Voltage) – 24 V (Вольт), частота (Frequency) – 50 Hz (Герц) и фаза (Phase) – 0 Deg (Degree – градусов).

Диод VD1 кремниевый типа 1N4009 (аналог КД226А, КД103).

Резистор R1 – 100 Ом.

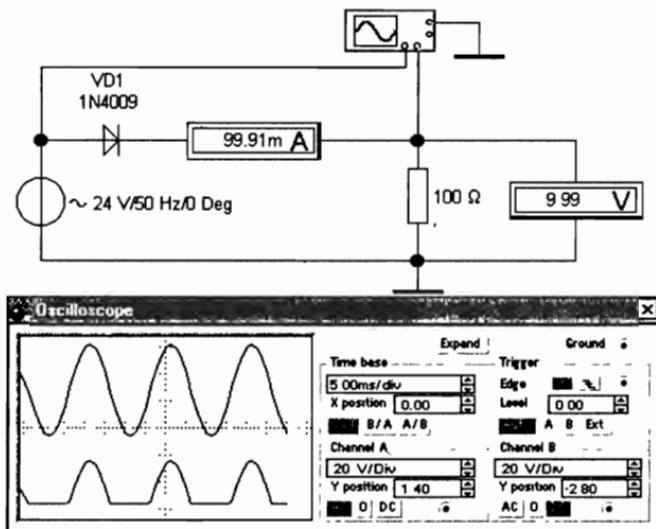


Рис. 52. Моделирование однополупериодного бестрансформаторного выпрямителя (EWB)

Виртуальные схемные приборы.

Амперметр и вольтметр постоянного тока (DC – Direct Current).

Осциллограф (осциллоскоп) двухлучевой (двухканальный): длительность горизонтальной развертки (Time base) – 5 мс/дел (ms/div – миллисекунд на деление шкалы); чувствительность вертикальной развертки – 20 V/div (Вольт на деление), канал А – верхний луч смещен по вертикали (Y position) на 1,40, канал В – нижний луч смещен (X position) дополнительно вниз на -2,80.

Результаты.

Приборы показывают, что окруженно средний ток, протекающий через нагрузку (резистор R1) равен 100 мА, при напряжении 10 В. Верхняя осциллограмма дает картину синусоидального напряжения, приложенного к диоду, а нижняя – на выходе выпрямителя (нагрузке). Видно, что диод «открыт» только в те полупериоды, когда на нем действует положительная полуволна напряжения. Сопоставим эти результаты с теорией. Видно, что качественная картина совпадает. Рассчитаем ток через нагрузку. При действующем значении напряжения 24 В амплитуда в $\sqrt{2}$ раз больше и равна примерно 31,4 В, а среднее значение выпрямленного напряжения (постоянная составляющая) для однополупериодного выпрямителя в π («пи») раз меньше, т. е. равно $31,4/\pi = 10$ В. Тогда ток в нагрузке равен $10 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 0,1 \text{ А} = 100 \text{ мА}$. Таким образом, данные полученные в результате виртуального моделирования и теоретического расчета совпадают.

Для измерения коэффициентов пульсаций тока и напряжения можно переключить приборы на переменный ток AC и взять отношение новых показаний к предыдущим.

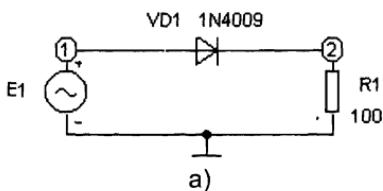
Совет
(EWB)

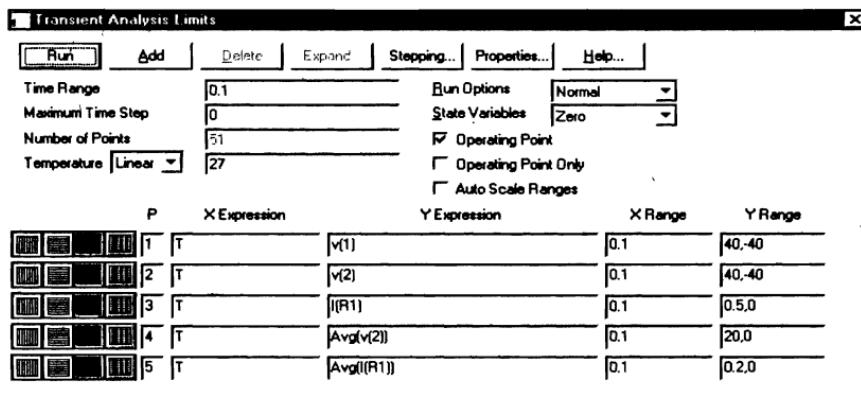
Виртуальные схемные приборы (амперметр и вольтметр) обладают инерцией, связанной с проведением расчетов переходных процессов, поэтому при ограничении времени наблюдения их показания могут быть ошибочными. Например, это может случиться, если для наблюдения одного кадра, войдя в Analysis и далее Analysis Option и Instrument, установить Pause after each screen (пауза после каждого кадра).

Виртуальная модель в MC (рис. 53,а).

Виртуальные компоненты.

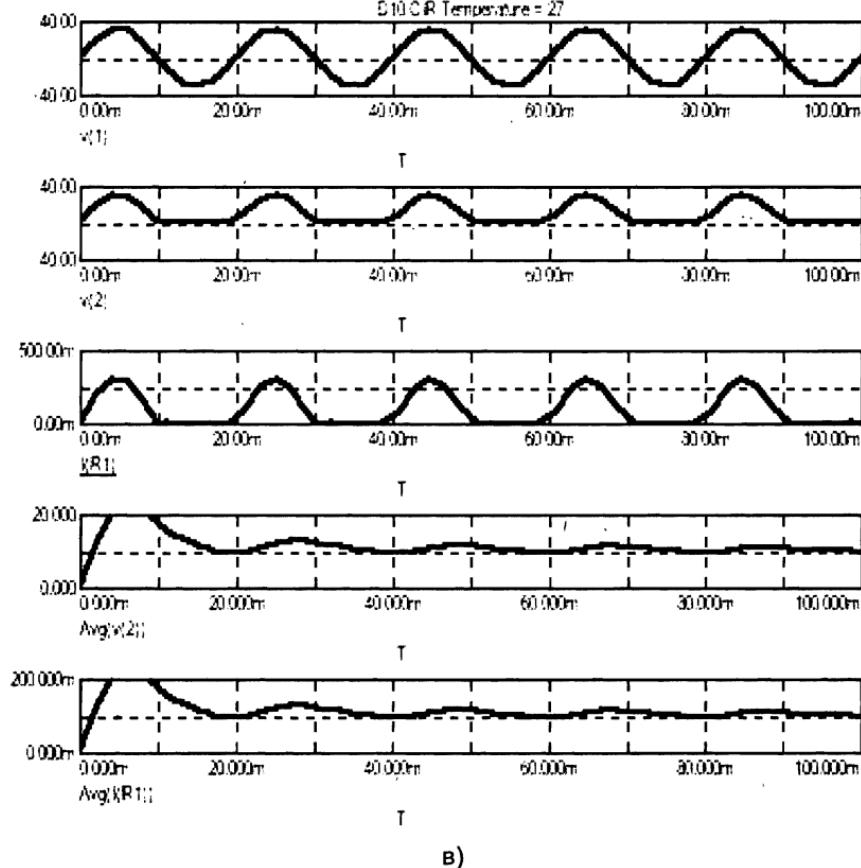
Источник переменного напряжения: Part=E1, Model=sin, амплитуда напряжения A – 31,4, частота F – 50.





б)

S10CR Temperature = 27



в)

Рис. 53. Моделирование однополупериодного бестрансформаторного выпрямителя (МС):
а – схема; б – установки параметров; в – графики

Диод VD1 кремниевый типа 1N4009 (аналог КД226А, КД103).

Резистор R1 – 100 Ом.

Виртуальные приборы.

Анализ выполняется в режиме Transient. Задание параметров моделирования показано на рис. 53,б. В данной программе можно построить одновременно до девяти графиков. На рис. 53,в построено пять графиков, причем на графиках 4 и 5 путем усреднения (оператор «AVG»— average, среднее) получены средние значения напряжения и тока для нагрузки. Здесь также видно хорошее согласие виртуального эксперимента и теории.

Схемы с понижающим трансформатором

Бестрансформаторные выпрямители, предназначенные для вторичного электропитания зарядных устройств и т. п. целей, применяют в простых, сравнительно дешевых системах. Наличие понижающего трансформатора предпочтительно, хотя бы из-за требований электробезопасности. Поэтому далее в моделирующей схеме, по сравнению с рассмотренными выше схемами, в них появляется новый компонент – трансформатор. Кроме того, источник входного напряжения теперь моделирует питание от однофазной сети переменного тока, что отражается в переустановке его параметров. Для простоты здесь выбрана модель трансформатора без магнитопровода, при необходимости более подробного моделирования реальных устройств надо специально подбирать и модель трансформатора. Параметры трансформатора выбираются так, чтобы при действующем значении напряжения 220 В на первичной обмотке, на вторичной (в режиме холостого хода, т. е. без нагрузки) было – 24 В, что дает коэффициент трансформации 9. Диод и нагрузочный резистор оставляем без изменений. Все это позволяет сохранить настройки режимов моделирования, хотя эти требования не обязательны.

Виртуальная модель в EWB (рис. 54).

Виртуальные компоненты.

Источник переменного напряжения E1: действующее значение напряжения (Voltage) 220 V, частота (Frequency) 50 Hz и фаза (Phase) 0 Deg (Degree – градусов).

Трансформатор T1 с коэффициентом трансформации 9.

Диод VD1 кремниевый типа 1N4009 (аналог КД226А, КД103).

Резистор R1 = 100 Ом.

Виртуальные схемные приборы.

Мультиметр, установленный в режим вольтметра постоянного тока (DC).

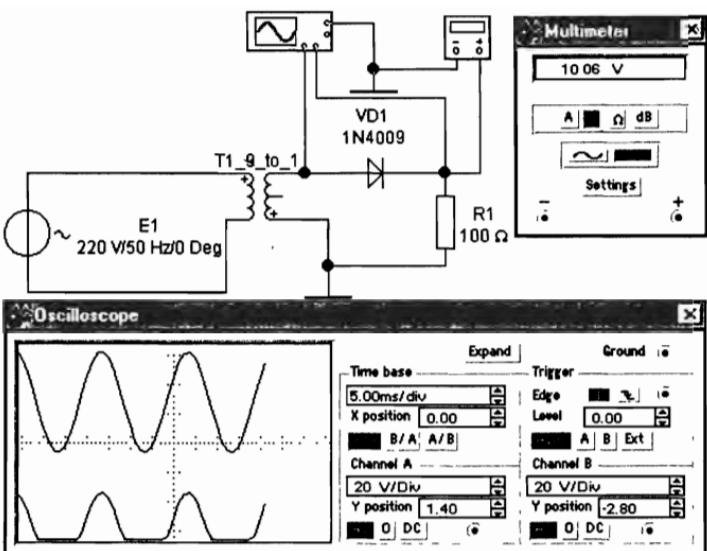


Рис. 54. Моделирование однополупериодного выпрямителя (EWB)

Осциллограф двухлучевой: длительность горизонтальной развертки (Time base) 5 мс/дел (ms/div – миллисекунд на деление шкалы); чувствительность вертикальной развертки 20 В/div (Вольт на деление), канал А – верхний луч смещен по вертикали на 1.40, канал В – нижний луч смещен соответственно на -2.80.

Результаты.

Приборы показывают, что округленно напряжение на нагрузке (резистор R1) равно 10 В. Картина на осциллографе осталась неизменной.

Виртуальная модель в МС (рис. 55,а).

Виртуальные компоненты.

Источник переменного напряжения: Part=E1, Model=sin, амплитуда напряжения A=310, частота F= 50.

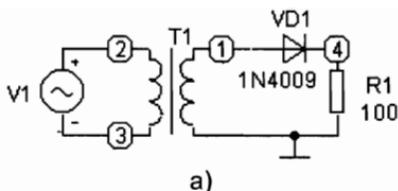
Трансформатор (Transformer): Part=T1, Value=0.01, 0.0001, 1.

Выбран идеальный однофазный двухобмоточный трансформатор в текстовом формате: <Primary Inductance>, <Secondary Inductance>, <Coupling Coefficient>, т. е. <индуктивность первичной обмотки>, <индуктивность вторичной обмотки>, <коэффициент связи>. Численные значения взяты из принятых режимов работы.

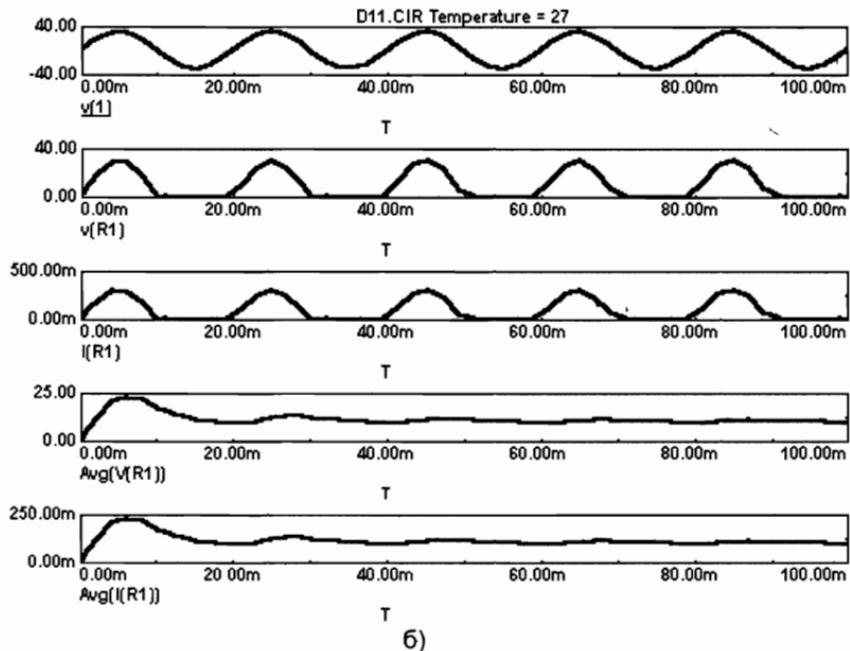
Диод VD1 кремниевый типа 1N4009.

Резистор R1 = 100 Ом.

Анализ выполняется в режиме Transient. Задание параметров моделирования осталось неизменным. Полученные результаты (рис. 55,б) идентичны предыдущим (рис. 53,в).



a)



б)

Рис. 55. Моделирование однополупериодного выпрямителя (МС):
а – схема; б – графики

Двухполупериодные выпрямители

В однополупериодных (однотактных) выпрямителях ток протекает в нагрузке только в течение половины периода, что приводит к большим пульсациям и малому КПД. Эти недостатки устраняются в выпрямителях, собранных по двухполупериодным (двуихтактным) схемам: со средней точкой и мостовой.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Для данной схемы необходим трансформатор, во вторичной обмотке которого имеется дополнительный вывод от ее середины (средняя точка). Этот вывод обычно заземляют, и на нем находится отрицательный полюс выпрямителя. Модель такого трансформатора имеется в **EWB**; она была использована ранее (рис. 54), но

средняя точка не была «задействована». В связи с особенностями снятия осциллограмм относительно заземляемого вывода, образуем модель составного трансформатора со средней точкой из двух идентичных трансформаторов T1 и T2. Для соблюдения преемственности моделирования с предыдущими случаями изменим только коэффициенты трансформации.

Виртуальная модель в EWB (рис. 56).

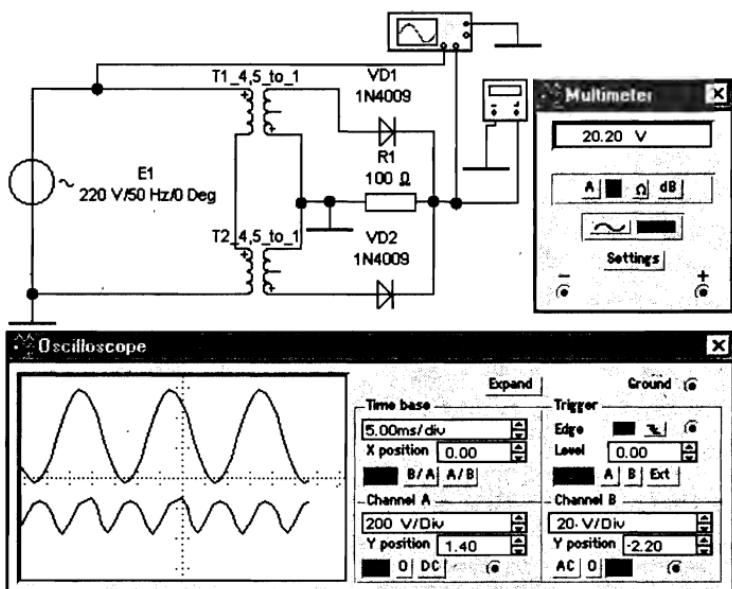


Рис. 56. Моделирование двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (EWB)

Виртуальные компоненты.

Источник переменного напряжения E1: действующее значение напряжения (Voltage) – 220 V, частота (Frequency) – 50 Hz и фаза (Phase) – 0 Deg (Degree – градусов).

Трансформаторы T1 и T2, имеющие коэффициенты трансформации 4.5.

Диоды VD1 и VD2 кремниевые типа 1N4009 .

Резистор R1 = 100 Ом.

Виртуальные схемные приборы.

Мультиметр, установленный в режим измерения вольтметра постоянного тока.

Осциллограф двухлучевой: длительность горизонтальной развертки (Time base) – 5 мс/дел (ms/div – миллисекунд на деление шкалы); канал А включен к питающей сети, чувствительность вертикальной развертки – 200V/div (Вольт на деление) и смещение по вертикали на 1.40; канал В включен к выходу выпрямителя чувствительность – 20 V/div и смещение соответственно на –2.20.

Результаты.

Выпрямление происходит в обоих полупериодах. Приборы показывают, что округленно напряжение на нагрузке (резистор R1) увеличилось в два раза и равно 20 В.

Виртуальная модель в **MC** (рис. 57, а).

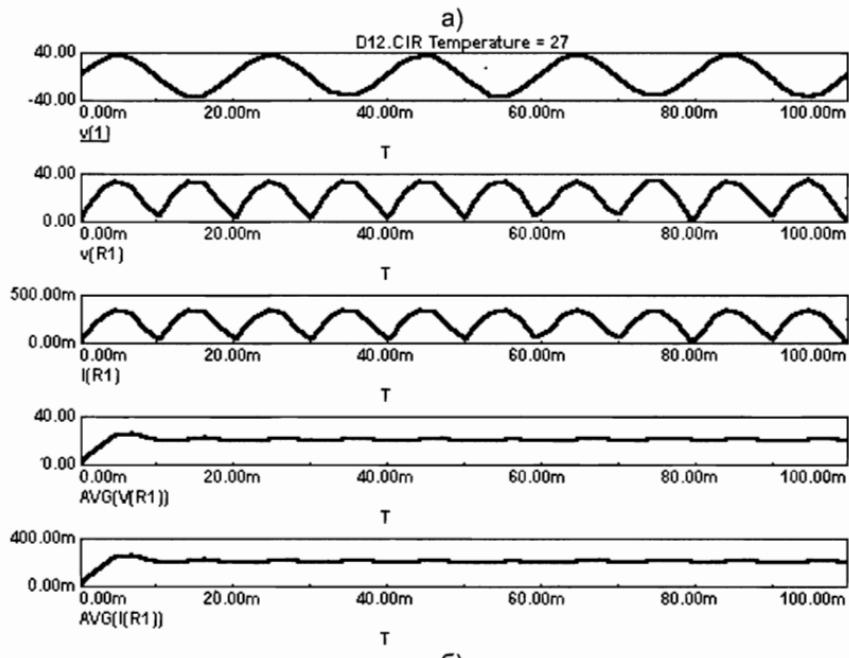
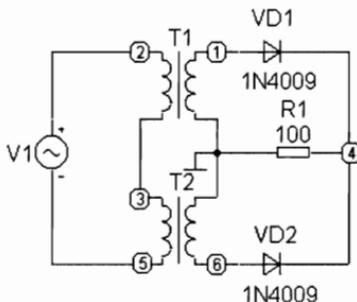


Рис. 57. Моделирование двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (**MC**): а – схема; б – графики

Виртуальные компоненты.

Источник переменного напряжения: Part=E1, Model=sin, амплитуда напряжения A – 310, частота F – 50.

Трансформаторы (Transformer): Part=T1, Value 0.01, 0.0005, 1 и Part=T2, Value 0.01, 0.0005, 1. Численные значения пересчитаны исходя из принятых режимов работы.

Диоды VD1 и VD2 типа 1N4009. Резистор R1 = 100 Ом.

Виртуальные схемные приборы: здесь (в отличие от **EWB**) как таковые отсутствуют эмуляции (воспроизведение) лицевых панелей и органов управления на экране и появляются только окна для задания режима моделирования и результат в виде графиков.

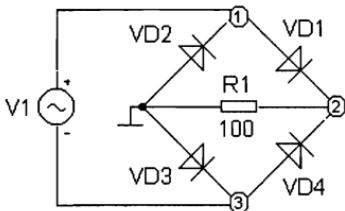
Анализ выполняется в режиме Transient. В задании параметров на моделирование изменяется масштаб графиков 4 и 5.

Результаты (рис. 57,б) показывают, что средние значения напряжения на нагрузке и ток в ней возросли в два раза.

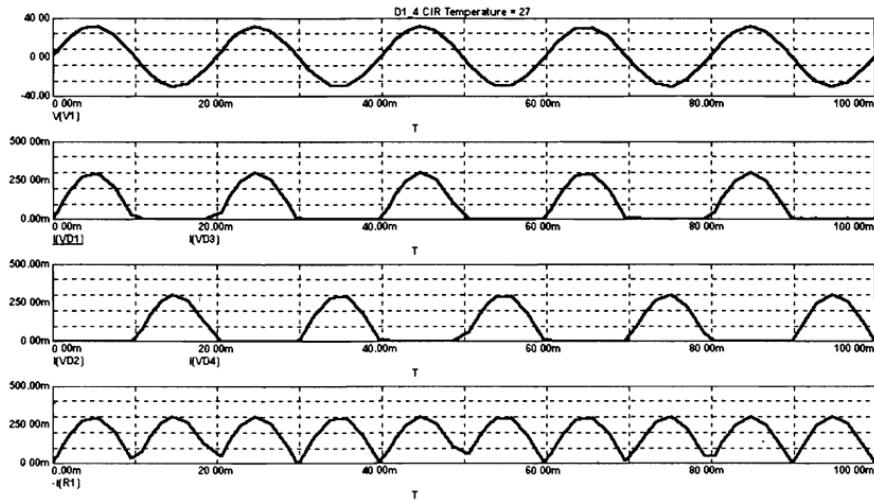
Мостовая схема

Выпрямители, собранные по мостовым схемам, весьма популярны среди радиолюбителей и широко используются в промышленных электронных устройствах и тому есть ряд веских причин. Однофазный мостовой выпрямитель является двухполупериодным выпрямителем. Он может питаться как от однофазной сети переменного тока, так и от трансформатора, но при этом, в отличие от предыдущих схем (рис. 56 и 57), не требуется вывода от средней точки. Ничто не дается даром: необходимое число диодов удваивается, но это не страшно, поскольку есть готовые микросборки, реализующие подобные схемы. КПД мостового выпрямителя выше, так как трансформатор используется наиболее полно: нет подмагничивания магнитопровода постоянным током, и ток во вторичной обмотке протекает в течение обоих полупериодов. Из-за увеличенного падения напряжения на выпрямительных диодах мостовые выпрямители редко используются при выпрямлении напряжений меньше 5 В.

Проведем исследование мостового выпрямителя в программе **MC**. Используем источник, тип диода и нагрузочный резистор аналогичные схеме на рис. 53,а. Для удобства начертания мостовой схемы выбираем диод, повернутый на 45° , последовательно выполняя операции выбора: Component>Analog Primitives>Passives Primitives>D45. Скопировав диод еще три раза, задаем диодам имена VD1–VD4, повернем каждый диод так, чтобы он имел ориентацию, указанную на рис. 58,а и соберем схему. Проводим моделирование питающего напряжения и токов, протекающих через диоды и нагрузку (см. рис. 58,б). Если параллельно нагрузке R1



а)



б)

Рис. 58. Мостовой выпрямитель (МС): а – схема; б – графики

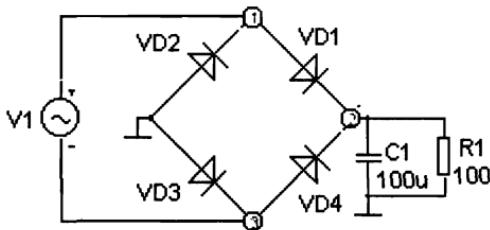
включить конденсатор С1 (рис. 59,а), то он сыграет роль простейшего сглаживающего фильтра. Увеличение емкости конденсатора приводит к уменьшению пульсаций.

Это можно исследовать в пошаговом режиме Stepping (рис. 59,б). На рис. 59,в видно, как влияет увеличение емкости конденсатора С1 от 0 до 500 мкФ с шагом в 50 мкФ. Еще большего уменьшения пульсаций выходного напряжения можно добиться использованием специальных многозвездных фильтров и систем стабилизации напряжения.

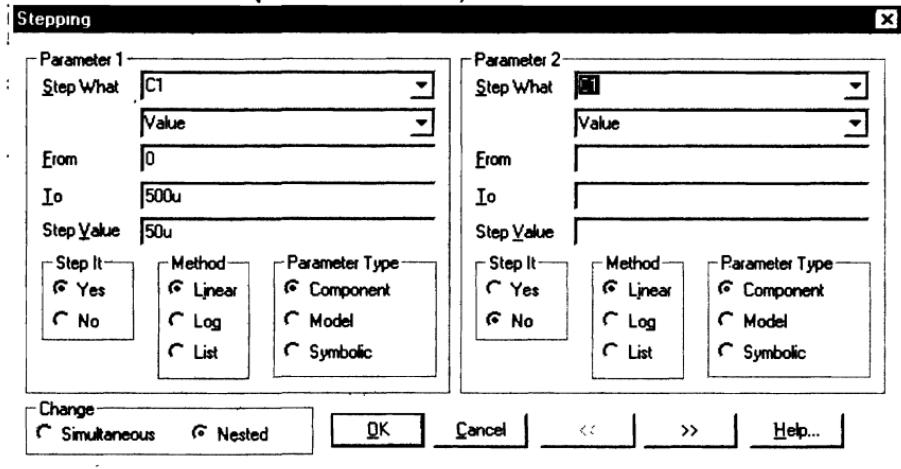
Обратимся теперь к набору мастер КИТ и смоделируем в программе EWB биполярный нестабилизированный источник питания ± 35 В/5 А (каталожный № NS053).

Соберем схему согласно рис. 60. Здесь источники переменного напряжения Е1 и Е2 моделируют вторичную обмотку трансформатора 2x35 В, а резисторы R1 и R2 нагрузку. Мост VD1 взят из

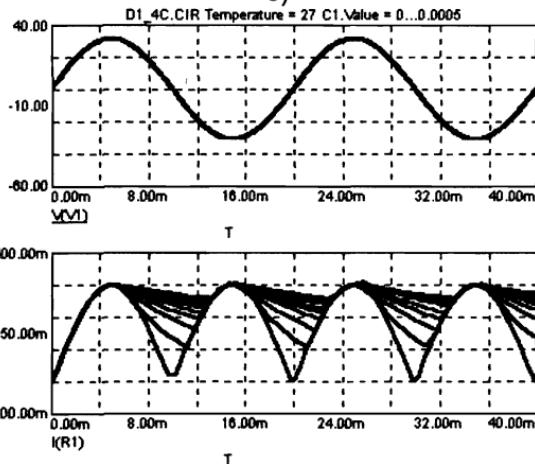
идеальных диодов. Из осциллограммы видно, на напряжение на нагрузке близко к постоянному и составляет примерно ± 50 В.



a)



b)



b)

Рис. 59. Многовариантный анализ (MC)

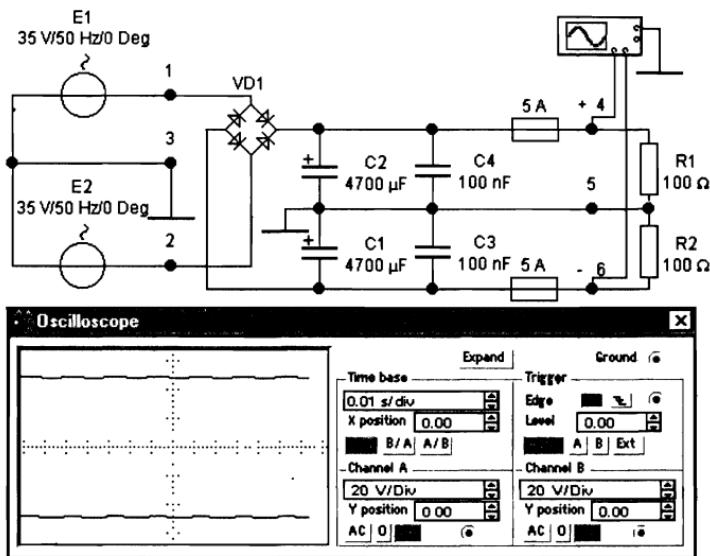


Рис. 60. Моделирование работы источника питания КИТ NS053 (EWB)

2.3. Стабилизаторы и ограничители напряжения

Выходное напряжение выпрямителя может изменяться вследствие различных причин, например, за счет колебаний напряжения питания, изменения параметров компонент от изменения температуры и т. п. Это может привести к ухудшению рабочих характеристик устройств, которые питаются от выпрямителя. В простейшем стабилизаторе напряжения используются специальные диоды, называемые стабилитронами.

Стабилитроны — опорные диоды (не путайте со стабисторами) работают на обратной ветви вольтамперной характеристики и подключаются к источнику напряжения в обратном направлении, т. е. катод к плюсу, а анод — к минусу (существуют также двухсторонние стабилитроны, для которых нет необходимости соблюдать это условие). Работа стабилитронов основана на эффекте Зенера: управляемом туннельном пробое полупроводника сильным обратным полем, не приводящим к его тепловому разрушению. В англоязычной литературе такие диоды называют зенеровскими диодами (Zener Diode).

Получим ВАХ стабилитрона. В программе МС аналогично построению схемы на рис. 42 выбираем компоненты: источник тока I1 и диод Zener (VD1). Проводим необходимые соединения согласно

рис. 61,а. Задание параметров моделирования на постоянном токе (DC) соответствует полученному графику ВАХ (см. рис. 61,б). На участке АВ этой характеристики и происходит зенеровский пробой.

В простейшем стабилизаторе напряжения (рис. 62,а) к источнику постоянного напряжения E_1 через балластное сопротивление R_1 включена нагрузка R_2 , параллельно которой включен стабилитрон $VD1$ (схема параллельной стабилизации).

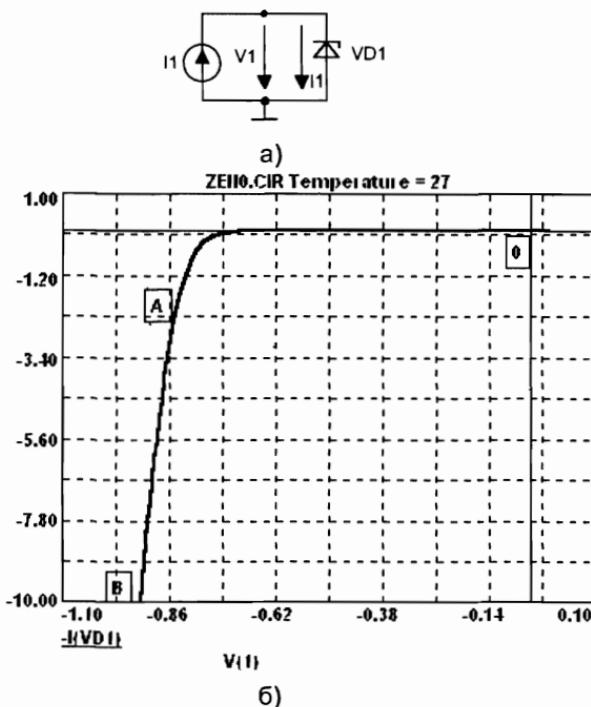
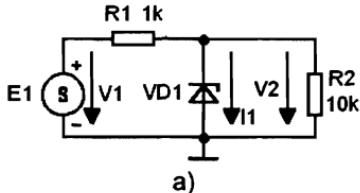
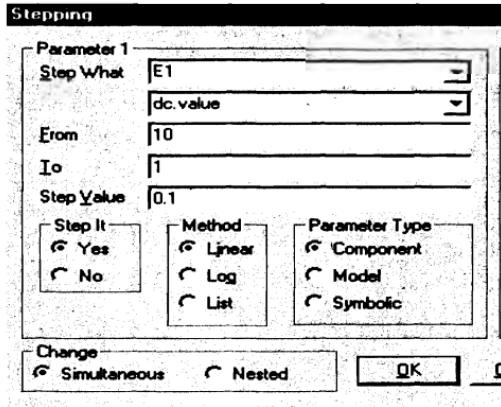


Рис. 61. ВАХ стабилитрона (МС): а – схема включения; б - график

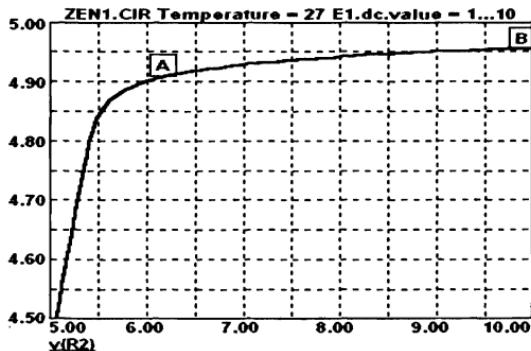
Проведем многовариантный анализ. Для этого зададим пошаговое изменение ЭДС E_1 (равной входному напряжению V_1) в окне Stepping (на рис. 62,б показана необходимая половина этого окна), и получим зависимость напряжения на нагрузке V_2 от напряжения на входе V_1 . Из графика рис. 62,в видно, что при превышении напряжения 6 В стабилитрон пробивается, и напряжение на нагрузке стабилизируется. Участки АВ кривых на графиках рис. 61,б и рис. 62,в являются сходственными: здесь через диод протекает ток I_1 , обуславливающий нелинейное изменение его сопротивления (параметра) и соответственно сам эффект стабилизации.



a)



б)



в)

Рис. 62. Параметрический стабилизатор напряжения (МС):
а – схема включения; б – окно «Stepping»; в – график

Моделирование стабилизатора в программе EWB

Вначале соберем схему для исследования ВАХ стабилитрона, аналогичную рис. 42, используя Zener Diode из раздела Diodes. Результат показан на рис. 63. Далее аналогично рис. 62,а составим схему стабилизатора (см. рис. 64,а). Для измерений здесь ис-

пользованы виртуальные схемные приборы программы **EWB**: амперметр А и вольтметр V. Изменяя значения ЭДС и включая моделирование, можно исследовать режимы работы стабилизатора. Как уже указывалось, программа **EWB** также предоставляет возможность многовариантного анализа. Для этого надо войти в меню **Analysis** (анализ) и в ниспадающем меню **DC** (Direct Current – постоянный ток) выбрать позицию **DC Sweep** (вариация параметров) и в открывшемся окне провести необходимые установки согласно рис. 64.б. Нажав на кнопку **Simulate** (моделирование), расположенную в этом же окне, полу~~составляющую~~ **результаты моделирования** в программах **MC** и **EWB**, видим, что они идентичны (небольшое различие связано с тем, что были использованы различные способы представления и типы диодов).

Диоды, стабилитроны, а также нелинейные полупроводниковые резисторы – варисторы могут использоваться как ограничители уровня напряжения (амплитудные дискриминаторы). В зависимости от полярности и схемы включения (последовательно или параллельно с нагрузкой), а также наличия дополнительного смещения можно получить различные варианты ограничителей уровня исходного сигнала. Смоделируем работу некоторых из них.

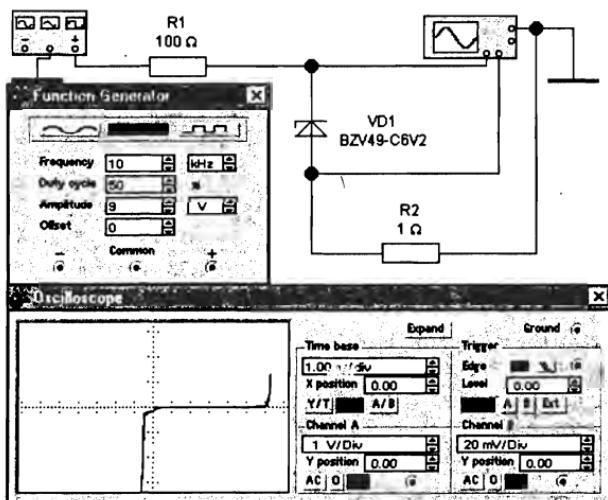
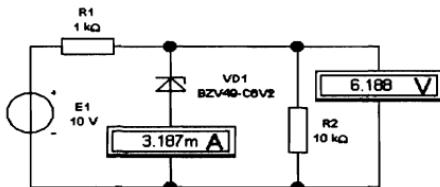
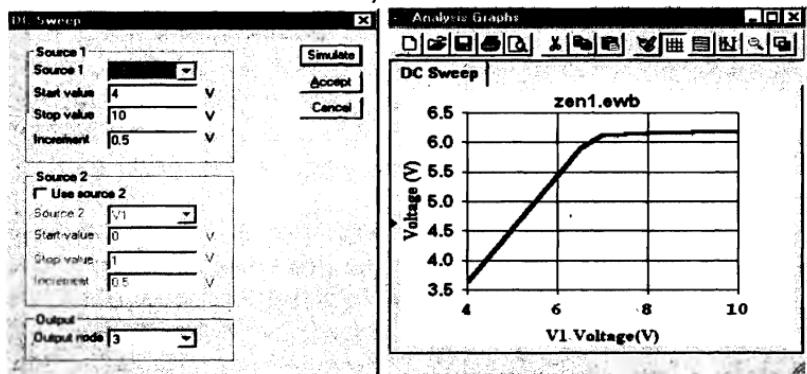


Рис. 63. ВАХ стабилитрона (**EWB**)



a)



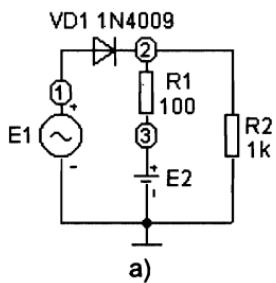
б)

в)

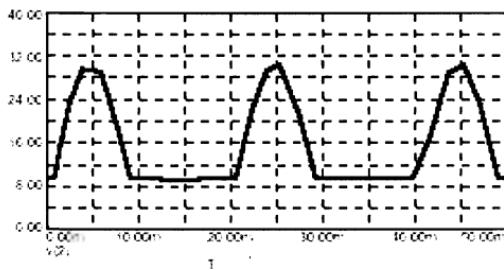
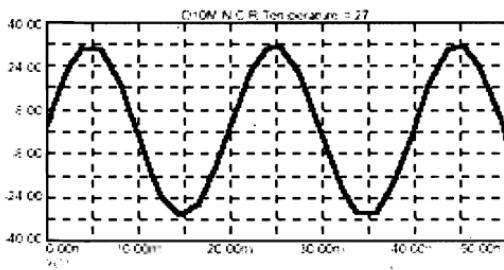
Рис. 64. Параметрический стабилизатор напряжения (EWB):
а – схема включения; б – окно «DC Sweep»; в – график

Схемы последовательных ограничителей отрицательной части сигнала (ограничение снизу) и положительной части сигнала (ограничение сверху) ничем не отличаются от обычного однополупериодного выпрямления. Для ограничения не на нулевом уровне добавим в схему (МС) рис. 53,а источник Е2 (рис. 65,а). Здесь приемником сигнала является резистор R2. Поскольку ЭДС Е2 = 10 В, то при заданной полярности происходит ограничение сигнала снизу на уровне +10 В (рис. 65,б). Различные варианты ограничения сигнала можно легко пронаблюдать, изменяя в этой же схеме поочередно полярность включения диода и батареи.

Смоделируем работу параллельного (шунтирующего) диодного ограничителя в программе EWB. Соберем схему согласно рис. 66,а и проведем моделирование с установками аналогичными рис. 52. Полученный результат (рис. 66,б) аналогичен предыдущему (рис. 65,в). Цифровая разметка оси ординат соответствует принятым значениям напряжений и искусенному смещению лучей А и В на экране виртуального схемного осциллографа. Изменяя в этой схеме поочередно полярность включения диода и батареи, также можно исследовать варианты ограничения сигнала.

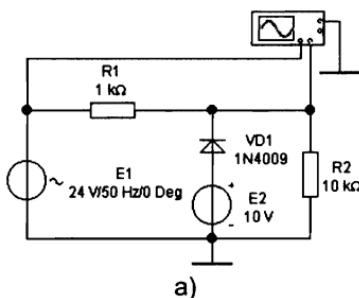


a)

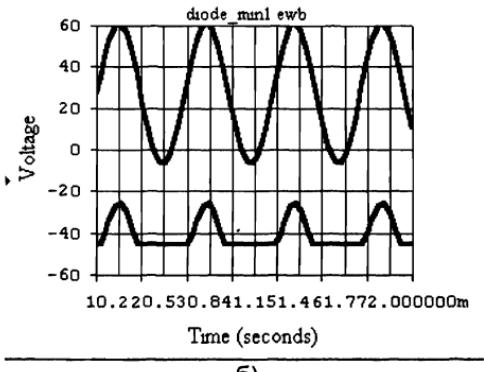


b)

Рис. 65. Последовательный диодный ограничитель (МС)



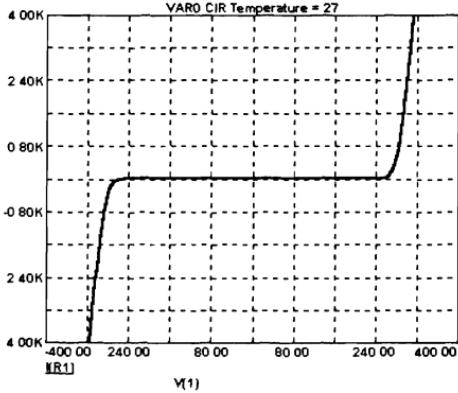
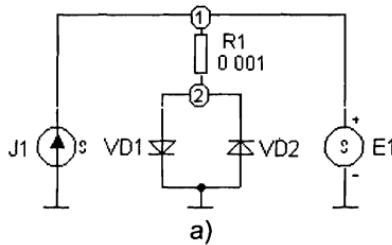
a)



б)

Рис. 66. Параллельный диодный ограничитель (EWB)

Комбинируя ограничение сигнала сверху и снизу, можно получить требуемые уровни двухстороннего ограничения. Например, используя два параллельных встречновключенных диода VD1 и VD2 (рис. 67,а) со специально подобранными характеристиками можно получить ВАХ (рис. 67,б), похожую на ВАХ нелинейных полупроводниковых резисторов – варисторов.



б)

Рис. 67. ВАХ двухстороннего ограничителя (MC)

Используя эту виртуальную схемную сборку можно смоделировать работу сетевого фильтра, часто используемого для подключения питания компьютеров к сети. Соберем схему по описанию набора сетевого фильтра КИТ № NK045 (см. рис. 68,а). В реальном устройстве между узлами 1 и 2 стоят не диоды, а два специальных последовательно включенных варистора. Заменять их диодами в реальном устройстве, если только целью не является создание короткого замыкания сети, нельзя ни в коем случае! Здесь мы вновь встречаемся с тем, что нельзя путать виртуальную модель и реальный объект. На схеме (рис. 68,а) источник E1 моделирует однофазную сеть переменного тока (50 Гц, 220 В), а E2 и E3 источники импульсной помехи. Резистор R1 моделирует нагрузку, резисторы R3 и R4 носят подсобный характер.

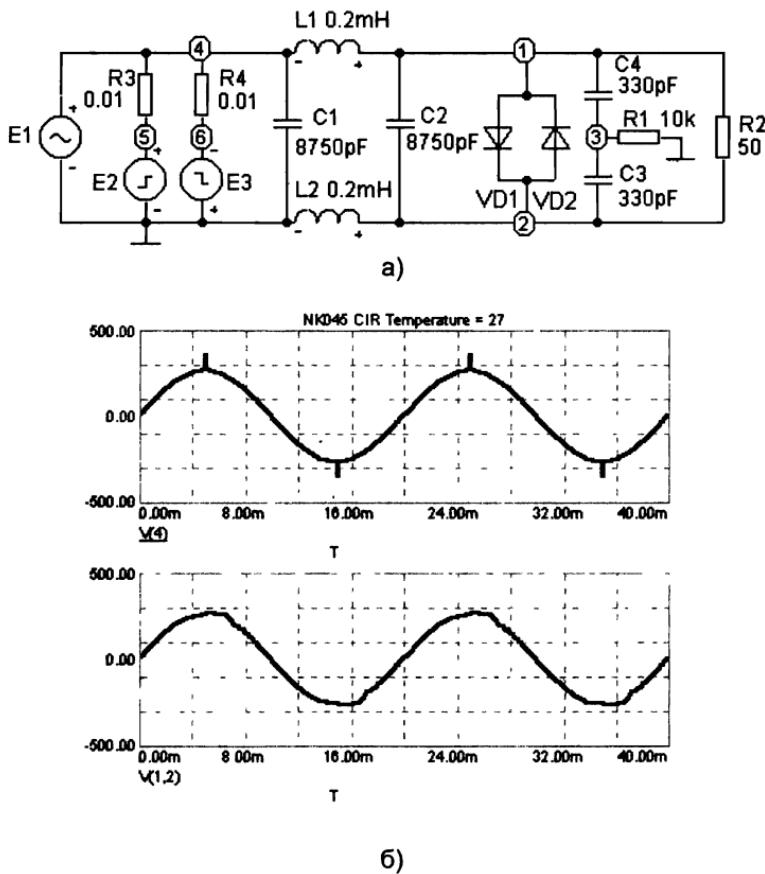


Рис. 68. Моделирование работы сетевого фильтра КИТ NK045 (МС)

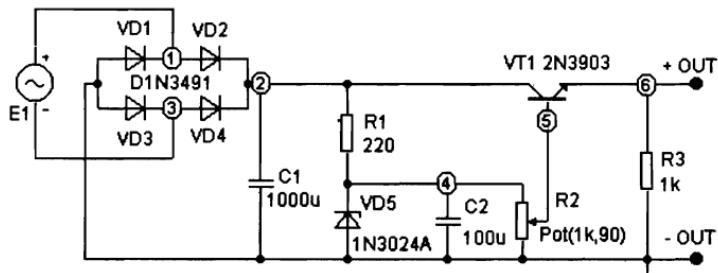
Для устранения коротких замыканий идеальных источников на землю, приводящих в расчетах к бесконечным значениям токов в соответствующих контурах, последовательно с каждым источником нужно включить резистор, с достаточно малым сопротивлением, практически не влияющим на свойство модели. Тогда программы будут нормально работать, а не выдавать сообщение об ошибке при каждой команде на проведение моделирования.

Значения индуктивностей в моделирующей схеме (рис. 68,а) взяты условно. Остальные параметры элементов фильтра соответствуют паспортным данным. Проведя моделирование в режиме Transient, получим осциллограммы, показанные на рис. 68,б, из которых видно, как фильтр «справляется» с этой помехой.

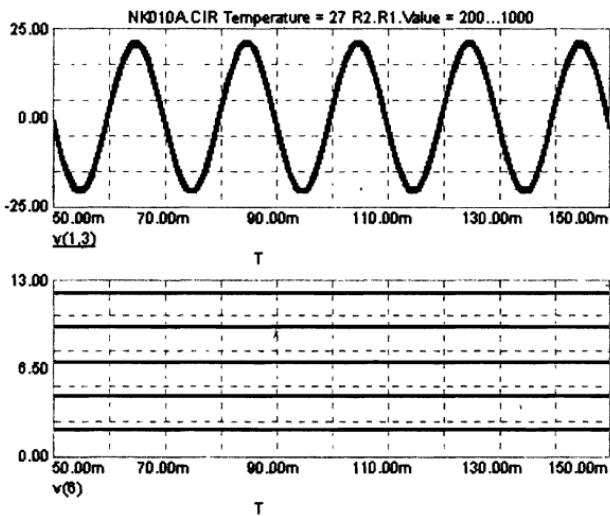
Закончим этот раздел рассмотрением работы простого регулируемого источника питания с выходным напряжением 0...12 В из набора КИТ NK10A. Источник представляет собой регулируемый стабилизатор напряжения, совмещенный с выпрямителем и фильтром (рис. 69,а и 70). Для работы этого стабилизированного источника необходим понижающий сетевой трансформатор 220В/15 В с током вторичной обмотки не менее 0,8А. На приведенных моделирующих схемах трансформатор отсутствует и питание источника осуществляется от идеального генератора переменного напряжения Е1 с частотой 50 Гц и амплитудой $A = \sqrt{2} * 15 = 21$ В для программы **MC** и действующим значением 15 В для программы **EWB**. Остальные компоненты схем подобраны из имеющихся в библиотеках программ. Регулировка выходного напряжения осуществляется с помощью потенциометра R2.

Результат моделирования в программе **MC** (рис. 69,б) показан в виде осциллограммы входного напряжения и графиков выходного напряжения в режиме Sweeping по параметру R2 от 200 Ом (нижняя линия) до 1000 Ом (верхняя линия) с шагом в 200 Ом.

В программе **EWB** можно наблюдать результат регулирования, нажимая на клавиатуре на R или Shift + R и следя за показанием вольтметра. Приведенный на рис. 66 отсчет 12 В соответствует положению движка виртуального потенциометра 85%, то есть напряжение снимается на базу транзистора с сопротивлением, равным 850 Ом. В этой же программе можно воспользоваться многовариантным анализом, войдя в режим Analysis и далее Parameter Sweep. В открывшемся окне (рис. 70,б) необходимо сделать показанные установки для изменения R2. Затем нажать на кнопку

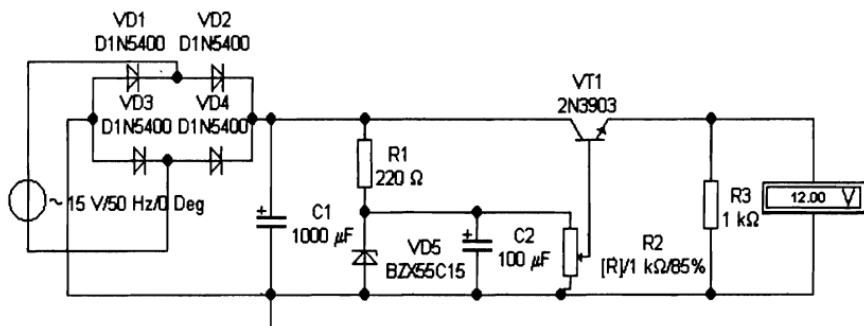


a)

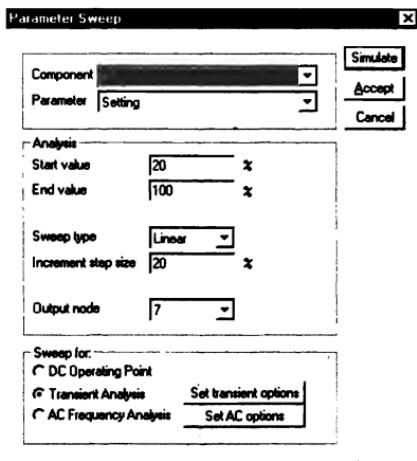


б)

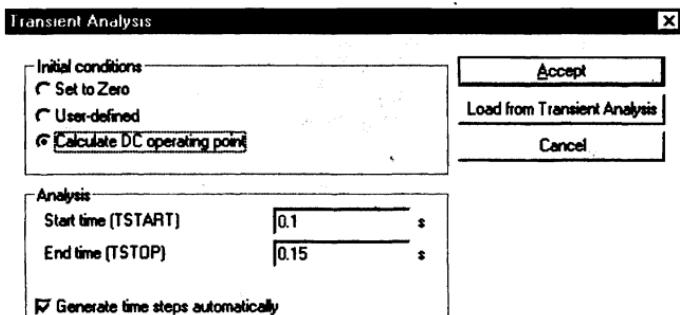
Рис. 69. Моделирование работы регулируемого источника питания КИТ NK010A (MC)



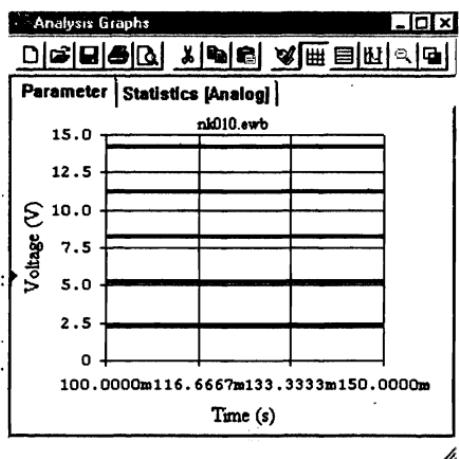
а)



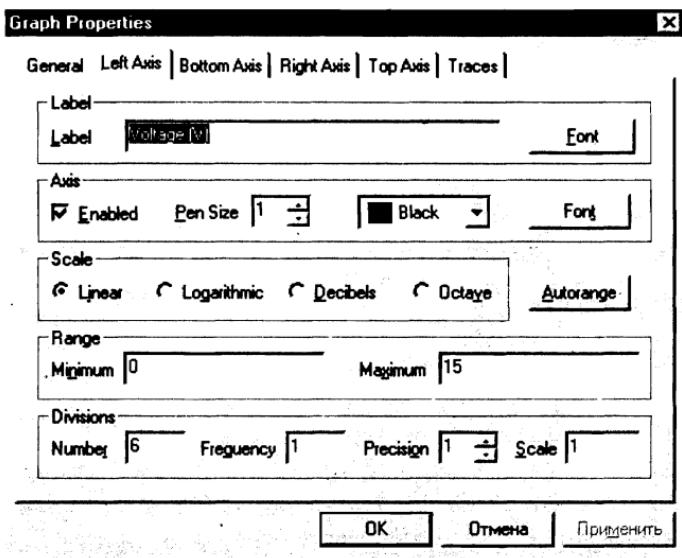
b)



c)



d)



д)

Рис. 70. Моделирование работы регулируемого источника питания КИТ NK010A (EWB)

Set transient options | (установка опций анализа переходных процессов) и в появившемся окне (рис. 70,в) произвести установку времени анализа. Выбранное время начала 0,1 с и конца 0,15 с отсекает показ начала зарядки конденсатора С1, имеющего большую емкость, а, следовательно, и большую постоянную времени зарядки. Далее надо нажать на кнопку Simulate | (моделирование) в этом окне. Появится окно с графиками (рис. 70,г), но вид их будет иным.

Для того чтобы отредактировать графики надо нажать на кнопку



и во вновь появившемся окне (рис. 70,д) выбрать редактирование левой оси Left Axis | . После этого надо выбрать диапазон (Range) минимум 0 и максимум 15 (это напряжение на выходе в вольтах). Нажав кнопку OK, получим необходимый график. Сравнивая поведение моделей источника в двух программах (рис. 69,а и 70,г) видим их идентичность.

3. ТИРИСТОРНЫЕ СХЕМЫ

Divid ut regnes (лат.) –
Разделяй, чтобы управлять.

Н. Макиавелли

3.1. Тиристоры

Развитие силовой полупроводниковой электронной техники шло по пути вытеснения электровакуумных и газоразрядных приборов из выпрямителей и преобразователей.

Тиристоры – это обширный класс полупроводниковых приборов, используемых для выпрямления и электронного переключения. Они являются полупроводниковыми устройствами с двумя устойчивыми состояниями, имеющими три или более *p-p* переходов. Поскольку в качестве полупроводника в тиристорах используется кремний, то в отечественной литературе их также называют кремниевые управляемые вентили (КУВ).

Тиристоры широко используются для регулирования мощности постоянного и переменного тока в нагрузке за счет ее включения и выключения. В частности, тиристоры применяют для регулирования, например освещенностью или скоростью вращения двигателей. Тиристоры были изобретены примерно через десять лет после изобретения биполярного транзистора, который имел трехслойную структуру (*p-p-p* или *n-p-n*). Простейший тиристор имеет четырехслойную структуру (*p-p-p-p*). На первый взгляд может показаться, что здесь нет ничего нового: просто два диода (*p-n*) перехода, соединенных последовательно. Однако, это совсем не так. Соединив два диода последовательно, получим такую цепь: проводник (анод) – *p* слой – *n* слой – проводник – *p* слой – *n* слой – проводник (катод). Отличие заключается в том, что в такой неправильной модели в средней части структуры область *n-p* перехода заменяется проводником, и... «вместе с водой выплескивается ребенок». Именно эта обратно смещенная область *разделяет* всю структуру и играет поэтому роль первой скрипки. При подаче на такую структуру напряжения – плюс к аноду, минус – к катоду, два крайних *p-p* перехода будут открыты (как прямо включенные диоды), а средний *n-p* переход будет закрыт (обратно смещенный диод), и вся структура окажется запертой (сквозной ток будет близок к нулю). Если напряжение на этом переходе превысит некоторый

предел – напряжения включения – U_{vkl} , то структура как бы открывается. Можно также дополнительно управлять этим процессом, сделав дополнительный вывод (управляющий электрод) от срединной области p и задавая определенный ток управления I_{upr} . Расчетная схема замещения тиристора имеет сложный вид, например, в программе **MC** используется шесть диодов, четыре транзистора и один резистор (см. программный файл **TRIAC.CIR**).

Тиристоры, имеющие два вывода, то есть диодные тиристоры называют динисторами, а триодные – тринисторами. Вообще же, для образования названия этого класса полупроводниковых приборов – тиристоры – был использован смешанный способ аббревиации путем сложения греческого тира (*thyra* – дверь) и части слова резистор (или транзистор). Роль открытой или запертоей «двери» играет вышеупомянутая область $n-p$ перехода, а роль «ключа» к ней – напряжение для диодной структуры и управляющий электрод – для триодной. Правда, введение этих красочных метафор в электронику было выполнено ранее для газоразрядных приборов с управляющей сеткой – тиратронов, вытесненных тиристорами.

BAX тиристоров

Исследования ВАХ тиристоров проведем аналогично диодам (см. рис. 42–49).

Соберем схему в программе **MC** согласно рис. 71,а. Сначала выберем источник постоянного тока $J1$ и введем его параметры согласно рис. 71,б. Затем выберем тиристор $VS1$ в следующем порядке: Component>Analog Primitives>Macros>SCR. В результате на рабочем поле появится изображение триодного тиристора (см. рис. 71,а). Этот тиристор носит в англоязычной литературе название *Silicon Controlled Rectifier* (SCR), то есть Кремниевый Управляемый Вентиль (КУВ). В окне SCR (см. рис. 71,в) введем параметры тиристора.

Вывод 1 тиристора $VS1$ является анодом, управляющий вывод 2 пока не задействуем, что позволяет смоделировать работу как бы диодного тиристора, третий вывод – катод – заземляем.

Совет
(MC)

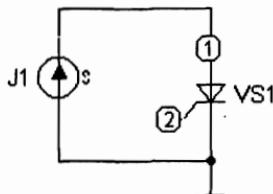
Обратите внимание на то, что выбор тиристора проводился из подраздела Macros. Для всех введенных туда компонент в программе **MC** имеются специальные файлы с макромоделями, заданными схемами замещения (впоследствии полезно просмотреть эти модели, особенно, если возникнет необходимость создания новых подобных компонент). При работе

с компонентами этого раздела они обязательно должны находиться в той же директории (папке), где исследуется схема. Если их там нет, то скопируйте необходимые файлы дополнительно в эту директорию.

Не забудьте подключить заземление (компонент – Ground) и проверить целостность собранной схемы. Если Козьма Прутков в знаменитых «Афоризмах» многократно повторял: «Нельзя объять необъятное», то для программы MC столь же актуален лозунг: «Не забывайте заземлять!» Благо этот компонент легко доступен: он размещен в середине верхней строки инструментов открытого окна.

Моделирование проводим в режиме постоянного тока (DC). Соответствующие установки параметров показаны на рис. 71,г, а получающийся график зависимости тока, протекающего через тиристор, на рис. 71,д.

Напряжение в точке А на полученном графике соответствует напряжению включения тиристора, а ток в точке В – так называемому току удержания. Вот на эти-то величины и влияет управляющий электрод. Исследуем это.



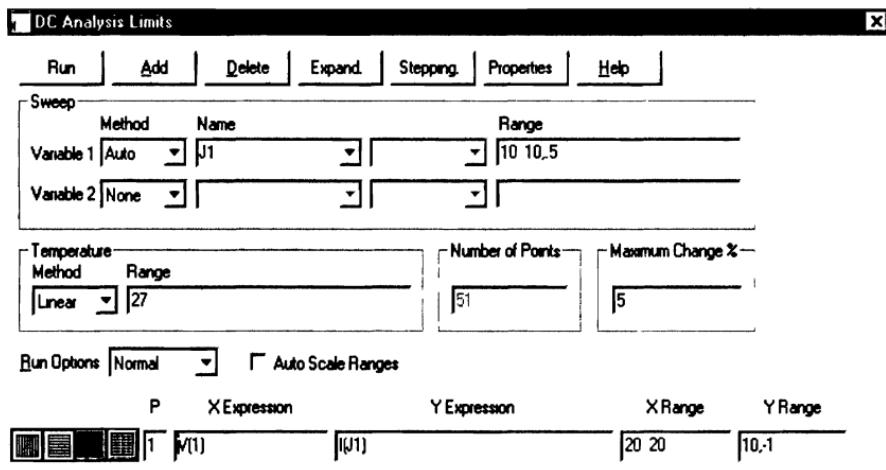
a)

Name	SLIDER_MAX	<input type="checkbox"/> D
Value	1	<input type="checkbox"/> D
PART=J1 VALUE=PULSE 15000M -150M 0.7 1 2 3 SLIDER_MIN=0 SLIDER_MAX=1		

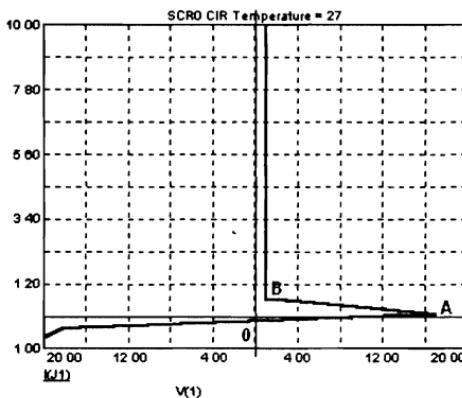
б)

Name	PACKAGE	<input type="checkbox"/> Display	<input type="checkbox"/>
Value		<input type="checkbox"/> Display	<input type="checkbox"/>
PART=VS1 VALUE=SCR(400M,50M,8U,1,15,100MEG,11U,6,8) PACKAGE=			

в)



Г)

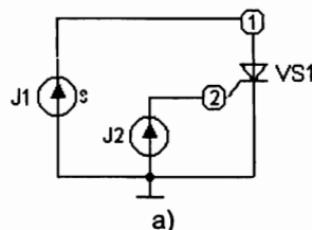


д)

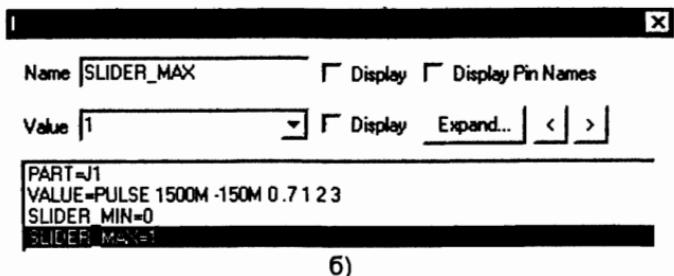
Рис. 71. Исследование ВАХ тиристора в диодном режиме (МС)

Начав с чистого листа (New), скопируем на него предыдущую схему (см. рис. 72,а). Поскольку тиристор в основном используется как электронный переключатель, то и характеристику получим при импульсном питании. Выберем источник тока J1(Pulse) и зададим его параметры в соответствующем окне (см. рис. 72,б). Характер заданного источника можно посмотреть в режиме Transient (см. рис. 72,в-д). Источник J2 зададим по окну на рис. 72,ж и проведем моделирование в режиме Transient (см. рис. 72,з). Из полученного графика (рис. 72,е) видно, что выбранный управляющий ток $J_2 = 10$ мА почти не повлиял на ВАХ тиристора. Увеличим его до

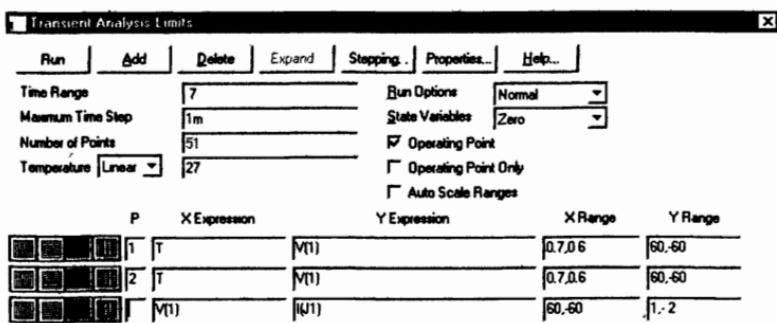
25 mA (см. рис. 72,и). Теперь тиристор открывается без задержки с подачей положительного напряжения на его анод (см. рис. 72,к).



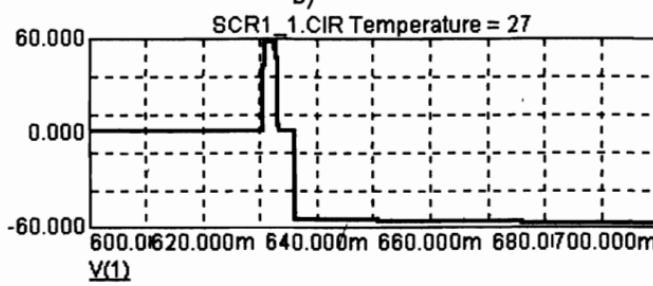
a)



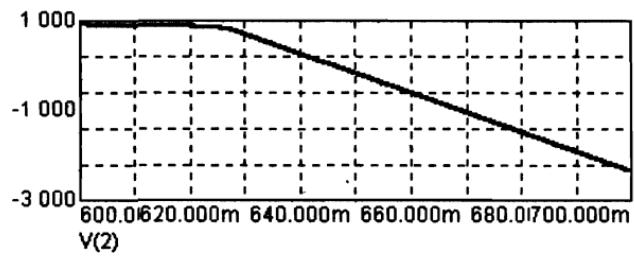
6)



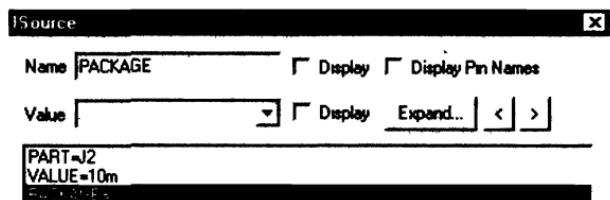
b)



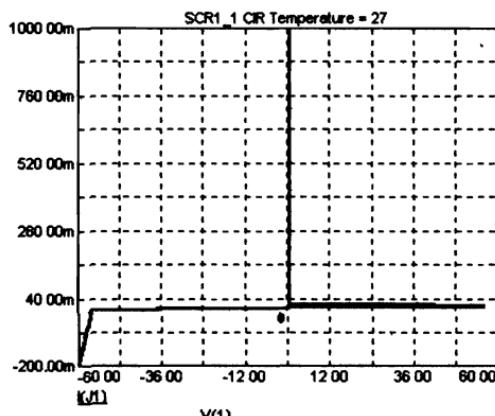
г)



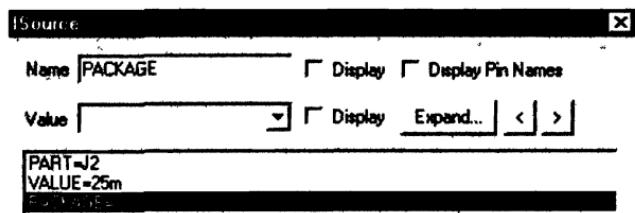
д)



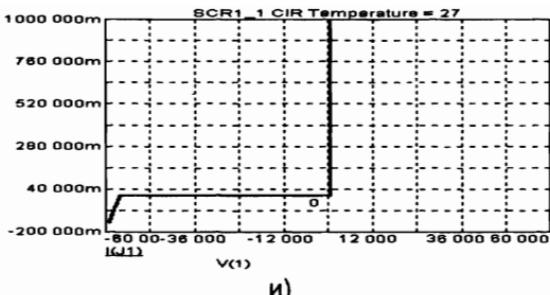
е)



ж)

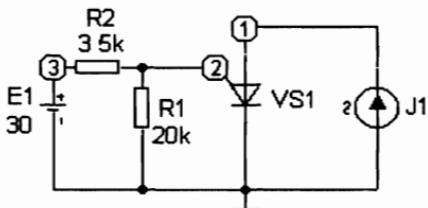


з)

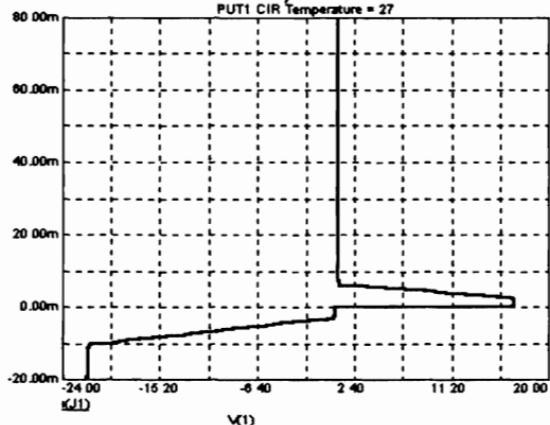


и)

Рис. 72. Снятие ВАХ тиристора, управляемого по катоду (МС)



а)



б)

Рис. 73. ВАХ тиристора, управляемого по аноду (МС)

Помимо рассмотренных выше триодных тиристоров, управляемых по катоду, существуют аналогичные приборы, но управляемые по аноду. Соответствующий компонент имеется в программе **МС** и называется «PUT», там же имеется и соответствующая макромодель, отличающаяся от модели SCR отсутствием резистора в схеме замещения. Больше того, в библиотеке примеров, прилагаемых к программе, имеется файл со схемой, иллюстрирующей его характеристики. Поэтому без комментариев приведем эту схему и результат моделирования (см. рис. 73, а, б).

Симисторы

В вышеописанных тиристорах рабочий ток протекал только при положительной полярности приложенного напряжения, т. е. их ВАХ не симметрична, что с успехом используется в управляемых выпрямителях. Потребность в управляемых источниках переменного тока привела вначале к использованию встречновключенных пар тиристоров, а затем к созданию приборов с симметричными характеристиками. Эти тиристоры были названы американской фирмой «General Electric» диак (DIAC – Diode AC semiconductor switch) и триак (TRIAC – Triode AC semiconductor switch). В отечественной литературе симметричные тиристоры называют симисторами. Эти приборы имеют многослойную полупроводниковую структуру из чередующихся типов проводимости: *n-p-n-p-p*, что и приводит к своеобразию их ВАХ. В программе МС имеется соответствующий пример, приводимый ниже.

На рис. 74,а показана схема включения триака в режиме диака, а его ВАХ показана на рис. 74,б. Пометы $I_H = \pm 10 \text{ mA}$ и $V_{DRM} = \pm 100 \text{ V}$ на графике соответствуют токам удержания и напряжениям включения при положительной и отрицательной полярности приложенного напряжения.

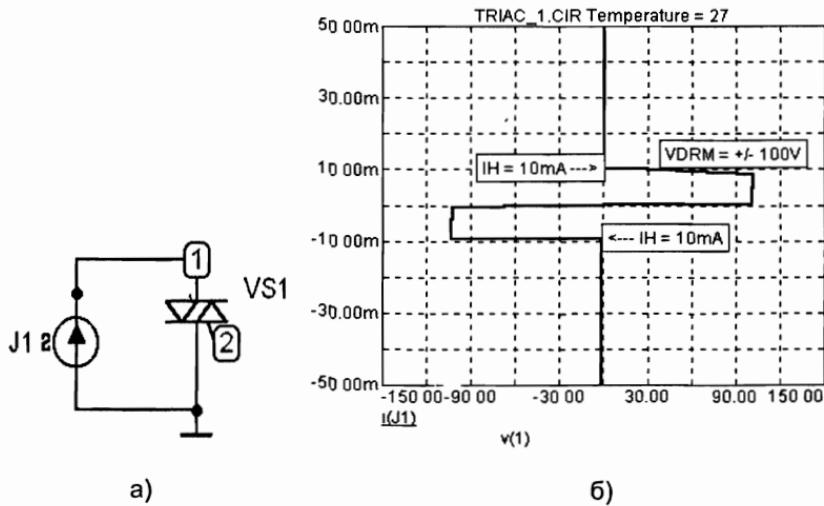
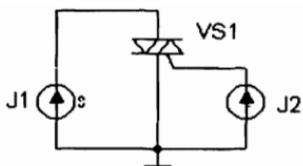
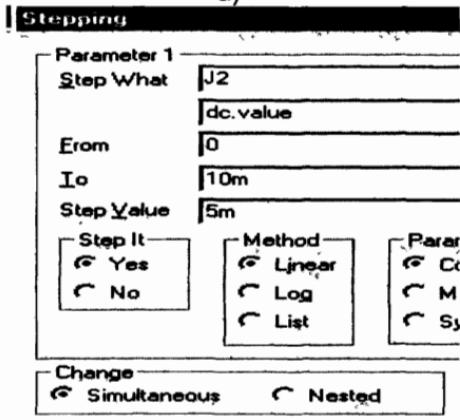


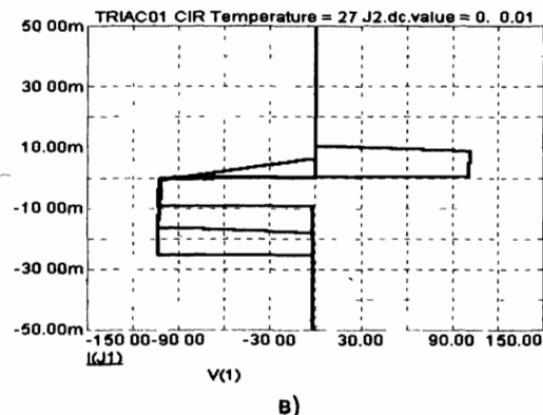
Рис. 74. ВАХ симметричного динистора (МС)



a)



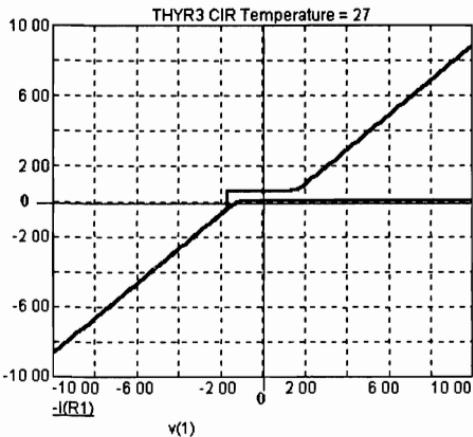
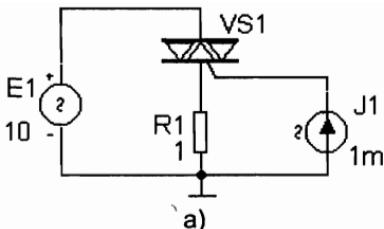
b)



c)

Рис. 75. Первый вариант ВАХ симистора (МС)

Добавим к этой схеме источник тока в цепи управляющего электрода J2 (см. рис. 75,а). Параметры этого источника будем варьировать, задав пределы и шаг в окне Stepping (см. рис. 75,б). В результате моделирования получим ВАХ (по первому варианту), показанную на рис. 75,в. Во втором варианте (рис. 76,а) заменим источники и получим ВАХ, показанную на рис. 76,б.



б)

Рис. 76. Второй вариант ВАХ симистора (MC)

Моделирование тиристоров в программе EWB

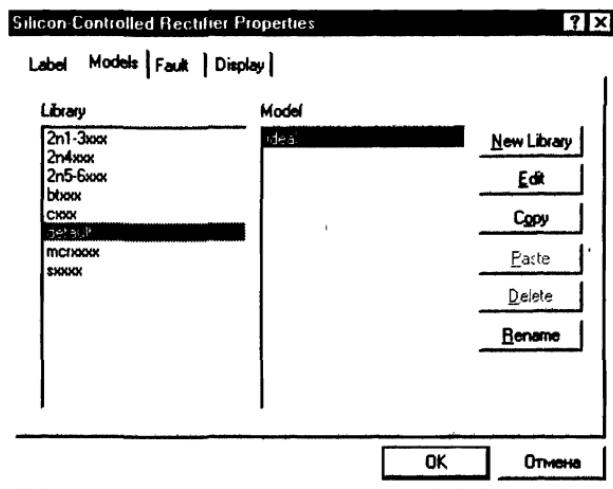
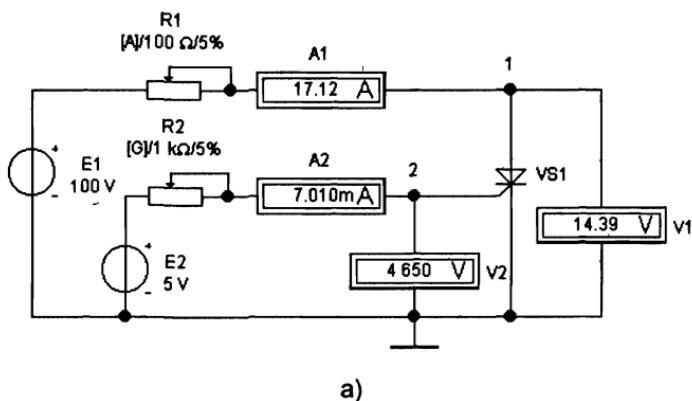
В программе **EWB** также можно провести исследование ВАХ тиристоров. Стандартный прием заключается в сборке схемы (рис. 77), содержащей тиристор VS1, два источника постоянного напряжения (E_1 и E_2), два токоограничивающих и одновременно регулирующих резистора (R_1 и R_2), два вольтметра (V_1 и V_2) и два амперметра (A_1 и A_2). Напряжение на аноде тиристора (узел 1) регулируется нажатием на клавишу [A] или [Shift]+[A], а ток управления (узел 2) – регулируется нажатием на клавишу [G] или [Shift]+[G]. Задав некоторый ток A_2 или напряжение V_2 и регулируя R_1 , можно получить зависимость $A_1(V_1)$, то есть прямую ветвь ВАХ. Изменив полярность включения E_1 , аналогично можно снять и обратную ветвь ВАХ. Описанная схема моделирует работу натурного стенда по не автоматизированному испытанию тиристора.

Параметры исследуемого тиристора можно выбрать из библиотеки для конкретной модели. Для этого, нажав дважды ЛКМ на

графическом изображении тиристора, войдем в окно Silicon Controlled Rectifier Properties (свойства кремниевых управляемых вентилей), показанное на рис. 77,б. По умолчанию в этом окне выставлены параметры идеального тиристора (Ideal), чтобы их увидеть, надо последовательно нажать в этом окне кнопки: Model и Edit. Приведенные параметры (см. рис.77,в) можно при необходимости, например в связи с отсутствием подходящих тиристоров в прилагаемой библиотеке, переопределить, воспользовавшись справочными данными.

Совет (EWB)

При каждом новом открытии подобных файлов после их сохранения требуется подтверждать внесенные изменения.



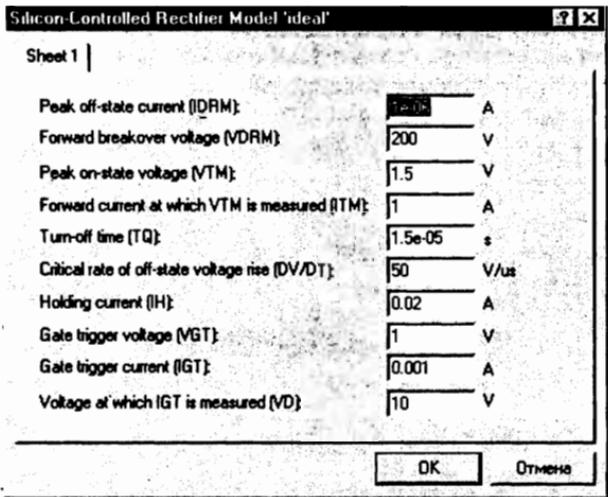


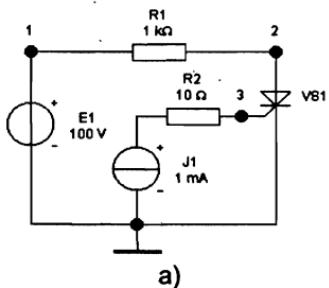
Рис. 77. Схема для исследования ВАХ тиристора (EWB)

Более изящно можно получить ВАХ тиристора в программе EWB, собрав схему по рис. 78,а и воспользовавшись моделированием в режиме DC Sweep (рис. 78,б) аналогично исследованию стабилизатора (см. рис. 64). Результат, показанный на рис. 74,в, сходен с результатом на рис. 71,д, хотя координаты графиков повернуты на 90°.

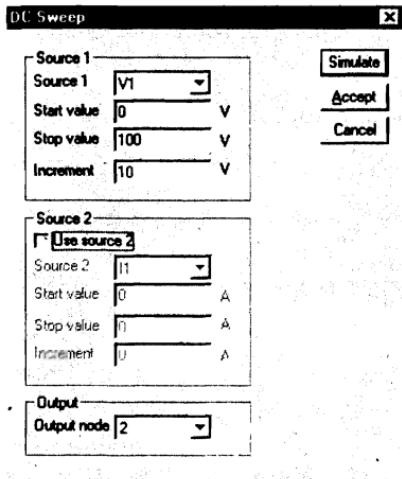
И наконец, можно также провести исследования тиристора аналогично тому, как был исследован стабилитрон (см. рис. 63). Для этого соберем схему согласно рис. 79,а. Задающий генератор (рис. 79,б) установлен в режим пилообразного напряжения. Диод VD1 носит подсобный характер: детектирует отрицательные полуволны и устраниет «засорение» графика их разверткой. Результат показан на рис. 79,в.

**Совет
(EWB)**

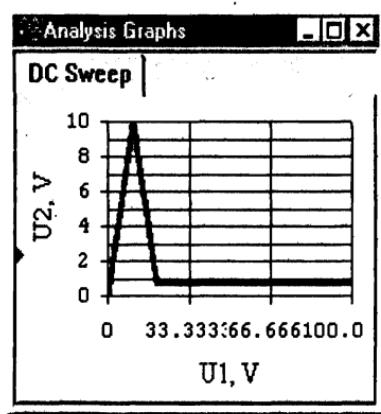
Не забывайте переключать на осциллографе режим горизонтальной развертки утапливая соответствующую кнопку: 1) при развертке во времени; 2) при развертке сигналом канала А по горизонтали и сигналом канала В по вертикали для снятии ВАХ или наблюдения фигур Лиссажу (взаимно-перпендикулярных колебаний)



a)



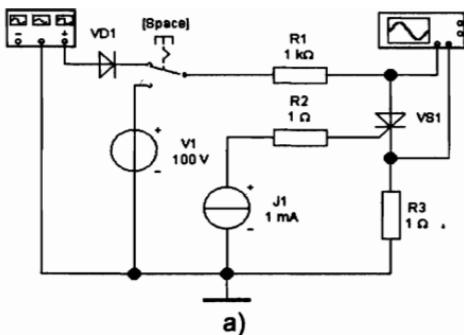
б)



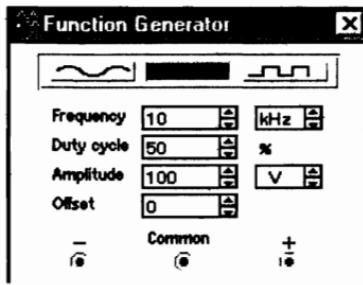
в)

Рис. 78. Включение тиристора (EWB):

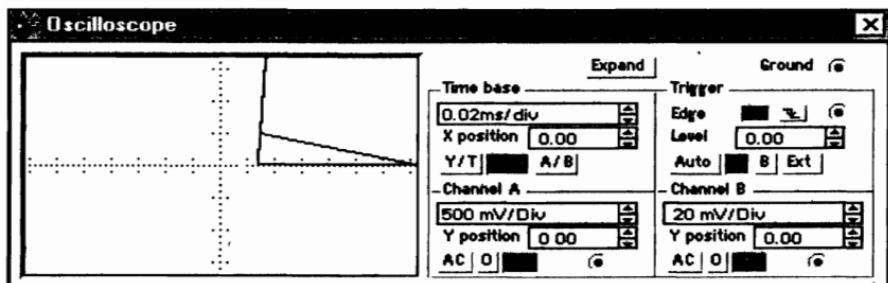
а – схема; б – окно установки параметров моделирования; в – график



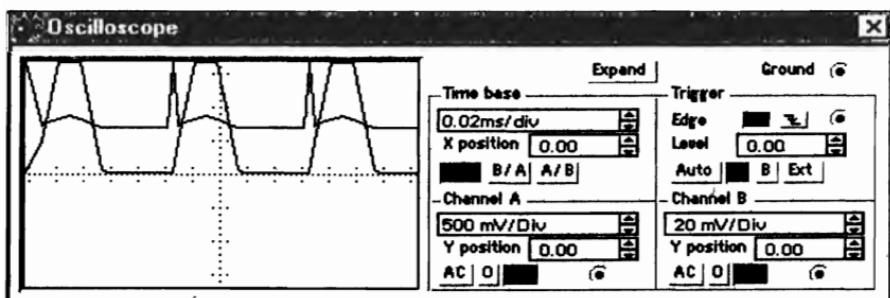
a)



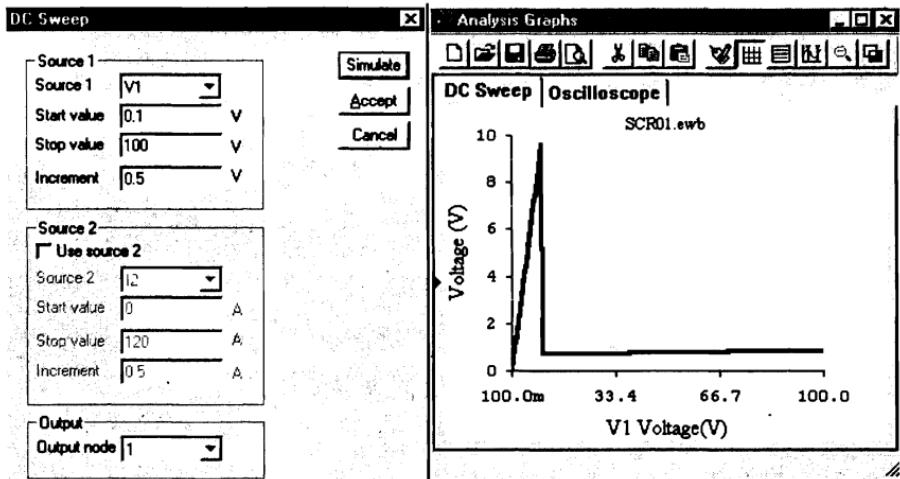
b)



c)



d)



д)

е)

Рис. 79. Исследование ВАХ тиристора (EWB)

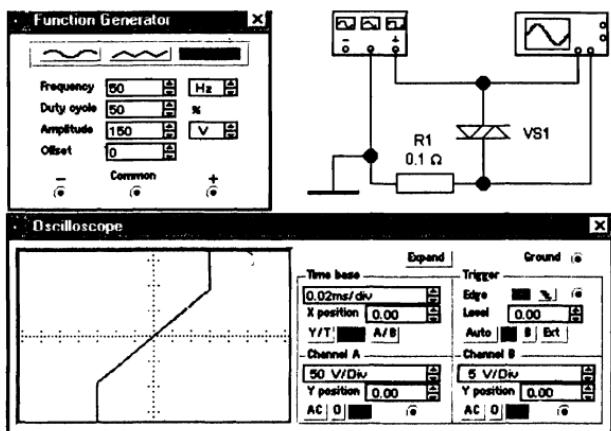


Рис. 80. Получение ВАХ диака (EWB)

Дополнительно можно посмотреть и временную картину напряжения на аноде тиристора и тока, протекающего через него (рис. 79,г). Далее, нажав на клавишу [Space], получаем возможность исследований аналогичных рис. 79. Соответствующее окно и характеристики показаны на рис. 79,д,е. Схема исследования и получающаяся ВАХ для симметричного диодного тиристора (диака) в программе EWB показаны на рис. 80.

3.2. Регуляторы напряжения

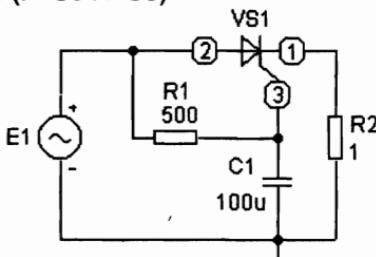
Поскольку тиристоры открываются при вполне определенном значении тока управляющего электрода, то это используется для управления моментом их включения. Наиболее распространенным является фазовый (горизонтальный) способ управления.

Соберем простейшую схему в программе MC (рис. 81,а), используя тиристор SCR. На аноде тиристора действует переменное напряжение, заданное источником E1.

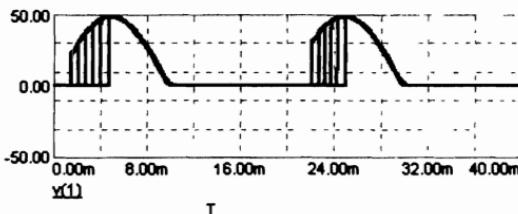
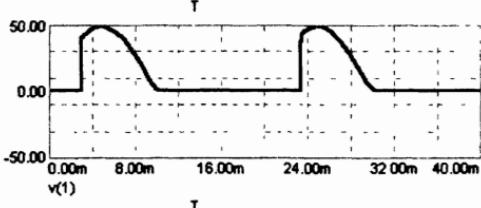
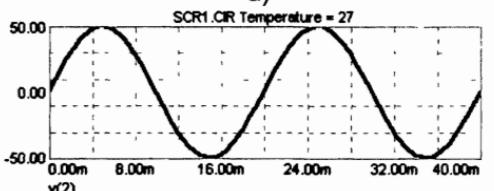
Параметры этих компонентов в окне Text таковы:

.MODEL SCR (50m,40m,1u,55,50MEG,30u,105,1)

.MODEL 50 SIN (F=50 A=50)



a)



б)

Рис. 81. Фазовое управление открытием тиристора (MC)

Сигнал на управляющем электроде 3 имеет фазовый сдвиг, зависящий от постоянной времени цепи R1C1, по сравнению с сигналом на аноде 2 (аналогично рис. 37,г). В результате этого момент открытия тиристора смещается во времени и он зависит от величины R1 (рис. 81,б). «Отсекая» часть полуволн напряжения, уменьшают среднее его значение на нагрузке R2, а, следовательно, ток и мощность в ней.

Тиристором можно также управлять, подавая в определенные моменты открывающие его импульсы (рис. 82). Аналогично можно управлять и симистором (рис. 83).

Фазовое управление симистором (триаком) VS1 показано на схеме рис. 84,а. Здесь сложная фазосдвигающая цепь R2R3R4C1C2 управляет открыванием диака (симистор VS2, управляющий электрод 7 которого не задействован), что и приводит к открыванию тиристора VS1.

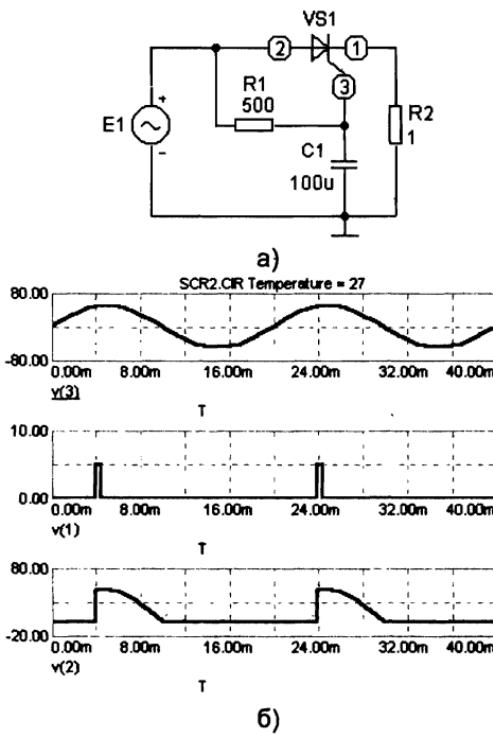
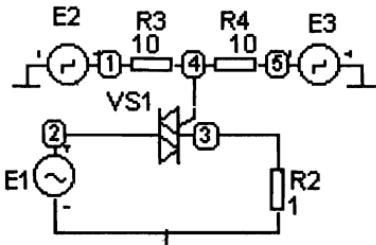
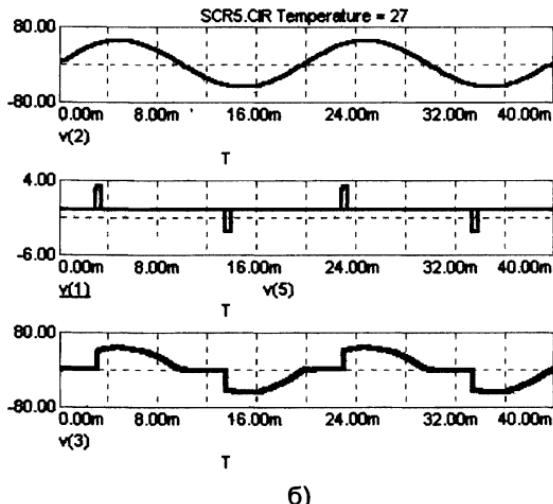


Рис. 82. Импульсное управление тиристором (MC)



a)



б)

Рис. 83. Импульсное управление симистором (МС)

Напряжение $V(1)$ источника E_1 и ток $I(R_1)$ в нагрузке R_1 , при различных значениях R_3 , в виде соответствующих осциллограмм показаны на рис. 84, б. Использование пары динистор – тиристор или диак – триак является вообще широко употребительным. Ряд фирм даже выпускает в готовом виде соответствующие приборы, называемые quadrac, имеющие четыре вывода.

Практическое применение управления тиристорами проиллюстрируем в программе **EWB** на ряде устройств из наборов **КИТ**.

Сетевой регулятор мощности 2200Вт/220В (**КИТ NK008**) позволяет в широком диапазоне изменять яркость осветительных приборов, температуру ТЭНов (Трубчатых Нагревательных Элементов или Трубчатых Электро Нагревателей) и электрорадиаторов, а также скорость вращения электродвигателей.

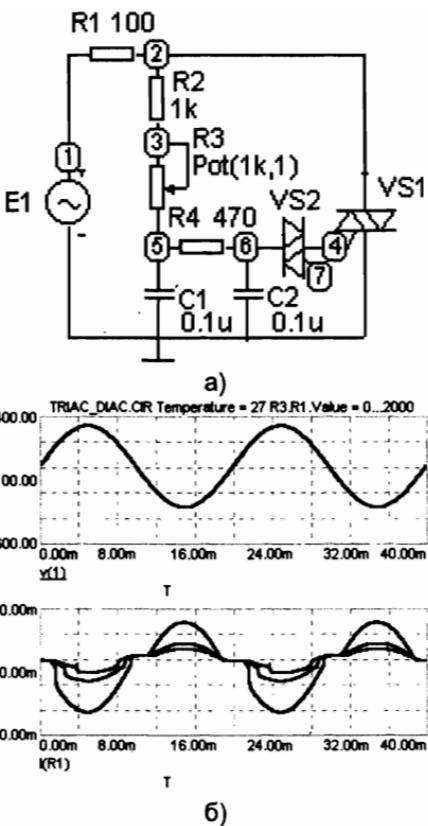


Рис. 84. Фазовое управление симистором (MC)

Соберем схему согласно рис. 85; по своей структуре она аналогична предыдущей (рис. 84,а). Здесь использована пара диак VS2 – триак VS1, нагрузкой служит в качестве примера лампа накаливания EL1. Цепь R4C3 является демпфером, предотвращающим ошибочные переключения тиристора, которые могут возникнуть вследствие ЭДС индукции в нагрузке, содержащей обмотки (двигателях, дросселях люминесцентных ламп). Для наглядности моделирования в схему добавлен амперметр, показывающий действующий ток в лампе при различных положениях переменного резистора [R]. Номинальная величина резистора R2* подбирается в зависимости от характеристик VS2.

Аналогична предыдущим также и схема устройства управления освещением КИТ NS164, представленная на рис. 86. Она несколько отличается только тем, что в ней имеется фильтр L1C1, защищающий питающую сеть от коммутационных помех, возникающих при переключениях тиристора.

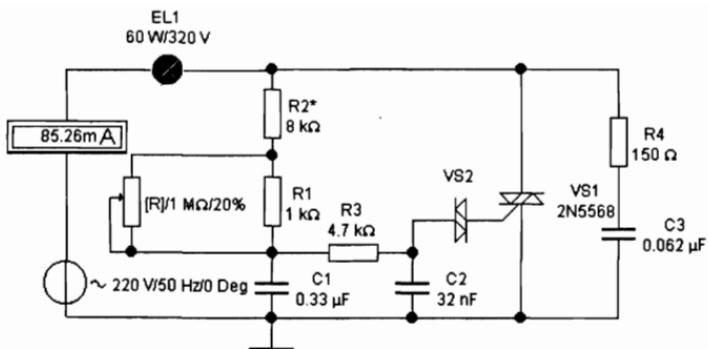


Рис. 85. Регулятор мощности КИТ NK008 (EWB)

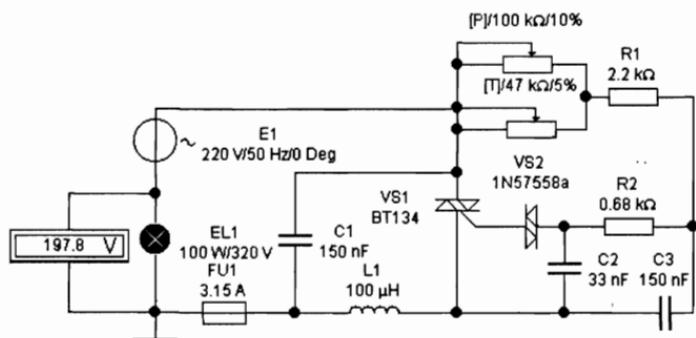
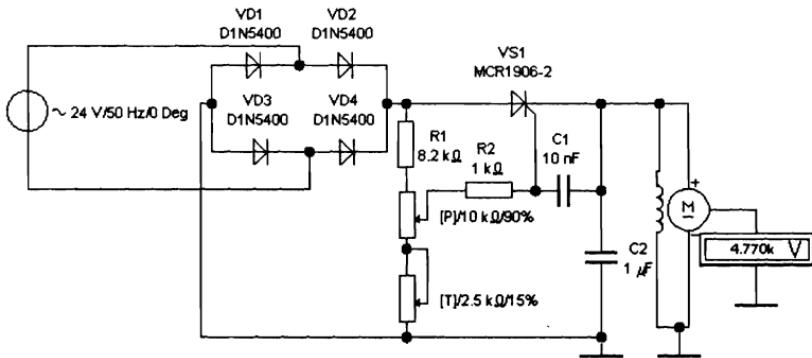


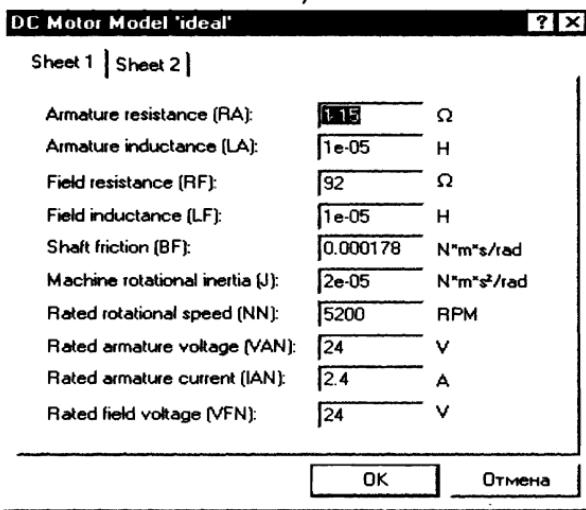
Рис. 86. Устройство управления освещением КИТ NS164 (EWB)

Еще одним подобным устройством является регулятор скорости вращения мини-дрели КИТ NK050. Это устройство позволяет регулировать частоту вращения вала двигателя постоянного тока, за счет изменения напряжения от 12 до 24 В, при токе потребления до 3 А. Схема регулятора (рис. 87) представляет собой регулируемый мостовой выпрямитель VD1–VD4, к выходу которого через тиристор VS1 подключен двигатель М. Резистивно-емкостная цепь с переменными сопротивлениями обеспечивает фазовое управление переключением тиристора, приводящее к регулированию выходного напряжения и, следовательно, частоты вращения якоря двигателя.

Для полного моделирования работы устройства необходимо сделать установки параметров модели конкретного двигателя. При отсутствии подробных паспортных данных это может быть и проблематичным и потребовать специальных измерений, прикальчочных расчетов или их подбора. В программе EWB не ниже пятой



a)



б)

Рис. 87. Моделирование регулятора мини-дрели КИТ NK050 (EWB)

версии есть специальный компонент DC Motor (двигатель постоянного тока), уже продемонстрированный ранее (см. рис. 11). Для

вывода его на экран необходимо нажать на кнопку (Miscellaneous – смешанный), а затем на пиктограмму с изображением двигателя .

Далее, открыв окно DC Motors Properties (свойства двигателя постоянного тока и нажав в нем на кнопку , откроем окно для его редактирования (рис. 87,б). Здесь имеется следующий набор параметров:

Sheet 1 (лист1)

Armature resistance (RA): 1.15 Ohm (сопротивление якоря)

Armature inductance (LA): 1e-05 H (индуктивность якоря)

Field resistance (RF): 92 Ohm (сопротивление обмотки возбуждения)

Field inductance (LA): 1e-05 H (индуктивность обмотки возбуждения)

Shaft friction (BF): 0.000178 N*m*s/rad (трение на валу)

Machine rotational inertia (J): 2e-05 N*m*s²/rad (момент инерции)

Rated rotational speed (NN): 5200 RPM (ном. частота об/мин)

Rated armature voltage (VAN): 24 V (ном. напряжение якоря)

Rated armature current (IAN): 2.4 A (номинальный ток якоря)

Rated field voltage (VFN): 24 V (ном. напряжение возбуждения)

Sheet 2 (лист2)

Load torque (TL): 0 N*m (момент нагрузки)

Силовые параметры, установленные по умолчанию, были изменены на пересчитанные паспортные данные для двигателя постоянного тока с электромагнитным возбуждением и барабанным якорем типа СЛ-281.

Вольтметр, соединенный с валом условно моделирует тахометр, измеряющий частоту вращения якоря в оборотах в минуту (см. ранее обсуждение к рис. 11). На рис. 87,а тахометр показывает 4,770 к, значит, якорь вращается, делая 4770 об/мин. Нажимая на клавиши [P] и [T], регулирующие величины соответствующих переменных сопротивлений, можно наблюдать за изменением показаний тахометра.

Совет (EWB)

Управляющим клавишам (Key) для потенциометров, конденсаторов, индуктивных катушек и ключей можно задать любое имя в виде одной буквы (при APK) или одной цифры, например, [A] или [1]. При буквенном обозначении нажатие на соответствующую клавишу уменьшает параметр, а при одновременном нажатии на [Shift] увеличивает его. При цифровой индексации нажатие на соответствующую клавишу увеличивает параметр, а при одновременном нажатии на [Control] уменьшает его; аналогично действует и обозначение в виде пробела [Space]. Все варьируемые компоненты, имеющие одно и то же имя управляющей клавиши, управляются одновременно.

4. ТРАНЗИСТОРНЫЕ СХЕМЫ

*Чем дальше эксперимент от теории,
тем ближе он к Нобелевской премии.*

Жиоло-Кюри

4.1. Транзисторы

Биполярные транзисторы

Перенесемся мысленно на полстолетия назад в лабораторию известной телефонной компании «Белл», где группа физиков возобновила прерванные войной исследования в области полупроводниковых материалов. Руководит группой физик-теоретик Уильям Шокли, вместе с ним работает физик-теоретик Джон Бардин и физик-экспериментатор Уолтер Браттейн.

Еще на заре развития радиоэлектроники для детектирования колебаний использовался контакт тонкой проволочки («кошачьих усов») с полупроводниковым минералом галенитом. В 1921–1922 годах сотрудник Нижегородской радиолаборатории О.В. Лосев на основе полупроводникового диода создает знаменитый «Кристадин», где впервые используется особый режим усиления высокочастотных колебаний. Однако эти исследования были оставлены без должного внимания и несправедливо забыты. Господство электронных ламп продолжалось.

Изучая полупроводники, Шокли намеривался в соответствии с разработанной им теорией воздействовать на ток, протекающий в них электрическим полем. Этот эксперимент, как бы повторяющий идею электронно-вакуумного триода, не дал положительных результатов. Тогда Бардин и Браттейн, пытаясь разобраться в причинах постигшей их неудачи, решили провести более детальные исследования с точечными контактами металла и поверхности полупроводника. Пластина кристалла германия n-типа была припаяна к заземленному металлическому диску-основанию (отсюда впоследствии появилось понятие базы). Сверху к кристаллу на расстоянии долей миллиметра были прижаты кончики двух золотых волосков (те же «кошачьи усы»). Однажды, в конце декабря 1947 г., Бардин и Браттейн подвели к одному из золотых контактов (который играл роль эмиттера) электрический сигнал звуковой частоты с небольшим положительным смещением, а на другой золотой контакт (служивший коллектором) подали значительно

большее отрицательное напряжение. Исследователи с изумлением обнаружили, что сигнал на коллекторе оказался в 50 раз больше исходного.

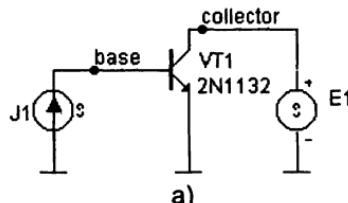
Так был рожден точечный транзистор. Это был своеобразный запл «Авроры», предвещавшей начало «транзисторной революции», с неизбежностью несущей на своих богатырских плечах революцию информационную. Шокли тут же разработал совершенную теорию его работы и вдобавок, в развитие своих первоначальных идей, предложил конструкцию плоскостного транзистора. Десять лет спустя все трое за эти работы были удостоены Нобелевской премии.

Вначале, описывая изобретенное устройство как элемент электрической цепи, исследователи назвали его Transresistor от Transfer resistor (передающий резистор), а уж затем сократили до современного Transistor (транзистор).

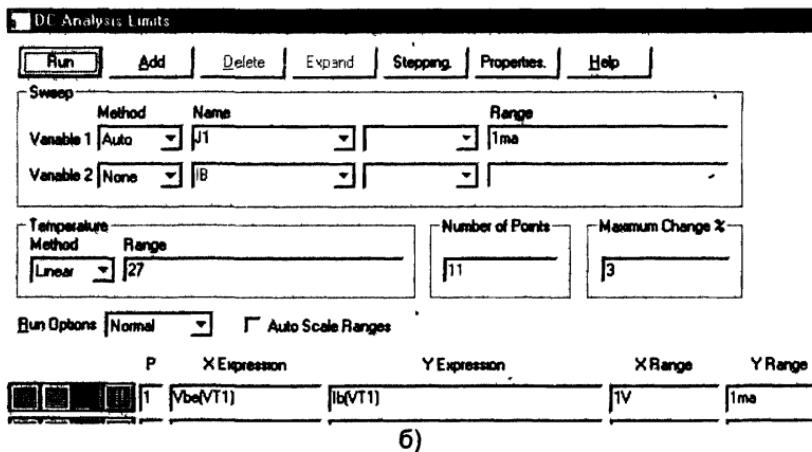
Рассматриваемые транзисторы имеют трехслойную структуру с чередующимися типами проводимости электронной (*n*) и дырочной (*p*), то есть *n-p-n* или *p-n-p*. Наличие двух видов носителей зарядов обусловило их название биполярные транзисторы. Современные транзисторы изготавливают совсем по другим технологиям, и они совсем не похожи на своих предтечей. Однако условное графическое обозначение биполярных транзисторов несет на себе исторические черты их рождения: толстая средняя черта – пластиинка-основание, символизирует базу, а две косые тонкие черточки, контактирующие с ней два других электрода (бывшие «кошачьи усы») – это коллектор и эмиттер. Для того чтобы отличать транзисторы двух типов эмиттер изображают в виде стрелки, направленной к базе для *p-n-p* типа и от нее для *n-p-n* типа. Таким образом, и здесь, как и в диоде за основу взято условно-положительное направление тока в цепи: «от плюса к минусу» или в данном случае от *p*-области к *n*-области. Помня это не хитрое правило, не трудно по графическому изображению транзистора на схеме указать его тип, а это позволяет, по крайней мере, сразу разобраться с включением полярности источников питания.

Как уже указывалось выше, транзистор, представляющий собой электрический трехполюсник, включается в каскады в качестве четырехполюсника, поэтому один вывод с неизбежностью становится общим, что и дает название схеме включения. Наиболее распространенной является схема с общим эмиттером. Схемотехника транзисторных цепей с общим эмиттером аналогична схемотехнике ламповых цепей с триодами: эмиттер – катод, база – сетка, а коллектор – анод.

Для грамотного использования транзисторов необходимо знать их вольтамперные характеристики. Получим ВАХ транзистора в программе МС. Скопируем схему рис. 45,а и устраним в ней проводник, замыкающий накоротко коллектор и базу. Получим транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис. 88,а). Различают входные, переходные и выходные ВАХ. Входные ВАХ, дают зависимость тока базы I_b от напряжения на базе относительно эмиттера V_{be} при постоянном напряжении на коллекторе относительно эмиттера V_{ce} . Зададим режим моделирования по постоянному току (рис. 88,б) и, дав команду на моделирование (нажав кнопку ► или Run, или клавишу F2), получим входные ВАХ транзистора (рис. 88,в). Далее, переустановим в окне моделирования параметры согласно рис. 88,г, и получим соответственно проходную (переходную) ВАХ, в которой ток коллектора I_c зависит от тока базы I_b (рис. 88,д). Наконец, сделав установки по рис. 88,е, получим семейство выходных ВАХ (рис. 88,ж), выражающих зависимость тока коллектора I_c от напряжения на коллекторе относительно эмиттера V_{ce} при различных токах базы. На выходных ВАХ, наиболее важных для анализа работы усилительного каскада, показаны линии нагрузки ВС и рабочая точка А, о которых речь пойдет дальше.



a)



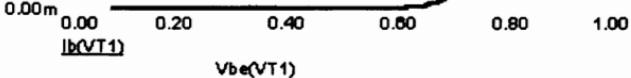
6)

1.00m

CURVES1.CIR Temperature = 27

0.50m

0.00m



в)

Sweep

Method

Name

Range

Variable 1 Auto J1 [] 10ma

Variable 2 None J1 [] []

P

X Expression

Y Expression

X Range

Y Range

1 I_b(VT1) I_c(VT1) 0.012 0.4

г)

400.00m

320.00m

240.00m

160.00m

80.00m



д)

Sweep

Method

Name

Range

Variable 1 Auto E1 [] 15v,0,0.1

Variable 2 Linear J1 [] 1.2ma,0,0.2ma

P

X Expression

Y Expression

X Range

Y Range

1 V_{ce}(VT1) I_c(VT1) 15 0.04

е)

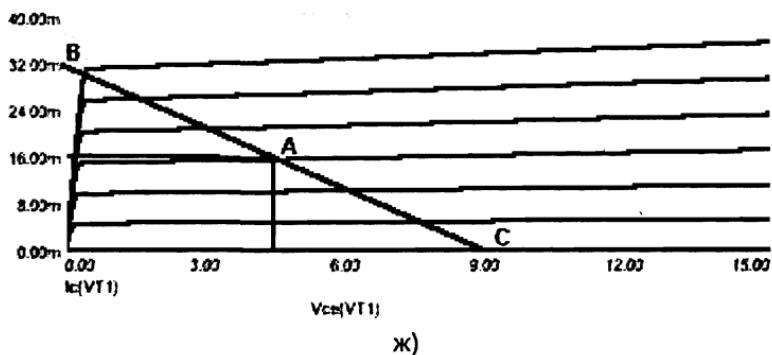
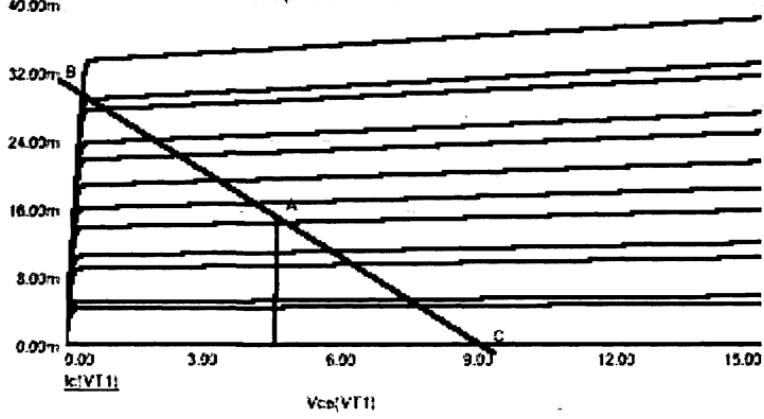


РИС 84 ГЕ СИР Temperature = 27 J1 = 0...0.0012 VT1.IB = 9e-015...1.2e-014

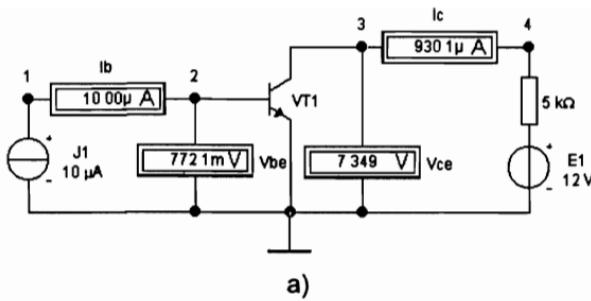


з)

Рис. 88. ВАХ биполярного транзистора (МС)

В программе **EWB** можно исследовать характеристики транзисторов, собрав виртуальную лабораторную установку по рис. 89,а. Задавая с помощью источника тока J_1 различные значения тока базы I_b и измеряя напряжение на базе V_{be} , а также задавая напряжение на коллекторе V_{ce} источником напряжения E_1 и измеряя ток коллектора I_c , можно вручную построить все необходимые ВАХ. Можно также варьируя параметры источников E_1 и J_1 (рис. 89,б), автоматически получить (несколько деформированные) выходные ВАХ (рис. 89,в).

Из двух транзисторов можно сделать один составной прибор (рис. 90,а) по схеме Дарлингтона, названной по фамилии американского ученого Сиднея Дарлингтона – одного из основоположников теории электрических фильтров. Выполнив моделирование для этой схемы получим ВАХ (рис. 90,б), на которых заметно уве-



a)

DC Sweep

Source 1

Source 1: V1
Start value: 0 V
Stop value: 15 V
Increment: 1 V

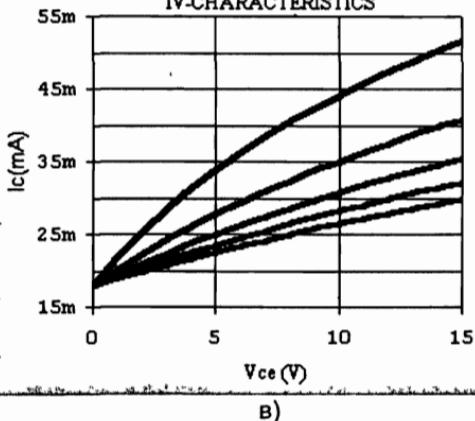
Source 2

Use source 2
Source 2: I1
Start value: 0.0006 A
Stop value: 0.003 A
Increment: 0.0005 A

Output
Output node: 3

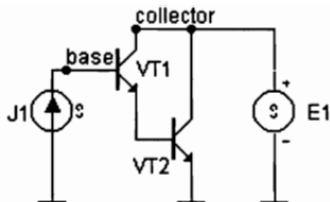
b)

IV-CHARACTERISTICS

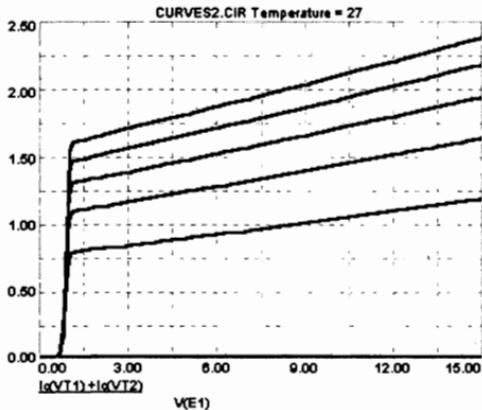


b)

Рис. 89. ВАХ биполярного транзистора (EWB)



a)



б)

Рис. 90. ВАХ составного транзистора (МС)

личение коллекторного тока на порядок. Возможно также объединение по схеме рис. 91,а двух различных по типу проводимости транзисторов (VT1 – *n-p-n* и VT2 – *p-n-p*) с близкими электрическими характеристиками, так называемая комплементарная схема.

Прилагательное «комплементарный» происходит от английского слова *complement*, которое в свою очередь происходит от латинского *complementum*, означающего пополнение, дополнение. Не путайте это слово со словом-паронимом: «комплимент», которое происходит от французского *compliment*. Последнее имеет иной, хотя возможно, и более приятный смысл. ВАХ для комплементарной схемы показаны на рис. 91,б. Здесь выходной ток возрастает еще на один порядок.

Схемы (пары) Дарлингтона и комплементарная широко используется в интегральной схемотехнике.

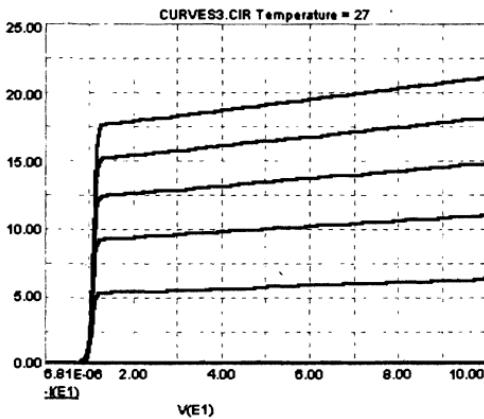
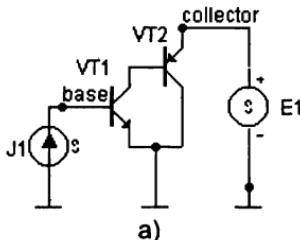


Рис. 91. ВАХ составного (комплементарного) транзистора (МС)

Полевые транзисторы

История изобретения и создания этого класса полупроводниковых приборов достаточно тумана: в разных источниках скромно упоминаются различные люди и даты. Возможно, что это связано с большой разновидностью подобных устройств. Поэтому, не анализируя, перечислим все известные нам факты в хронологическом порядке. В 1925 г. Юлиус Лилленфельд изобрел полевой транзистор с р-п переходом и полевой транзистор с изолированным затвором. В 1939 г. английский ученый О. Хейл получил патент на устройство, в котором электрическое поле изолированного электрода управляло током, протекающим в тонком слое полупроводника. В 1952 г., упомянутый выше Шокли дал теоретическое описание унипольярного полевого транзистора. Такие транзисторы, получившие название полевых с управляемым р-п переходом были впоследствии изготовлены Дейси и Россом, которые в 1955 г. также дали аналитическое описание их характеристик.

В 1956 г. С. Тешнер (Франция) изобрел одну из разновидностей полевых транзисторов. В 1960 г. М. Атала и Д. Канг предложили использовать структуру металл-окисел-полупроводник в качестве основы для создания особого вида полевых транзисторов. Очевидно, что именно с этих транзисторов, которые стали широко использоваться в интегральных микросхемах, и по-настоящему началась эра полевых транзисторов. Полевые транзисторы не вытеснили биполярные, а лишь удачно дополнили их, так как обладали рядом уникальных особенностей, с которыми можно легко ознакомиться в виртуальных моделях.

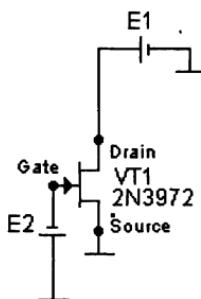
В начале дадим некоторые пояснения терминов и обозначений. Названия этого класса полупроводниковых приборов связаны с их принципом действия. В некоторой области полупроводника (канале отсюда одно из названий – канальные) протекает ток основных носителей заряда одного знака отсюда – униполярные транзисторы. Управление величиной тока осуществляется поперечным электрическим полем отсюда другое название – полевые транзисторы (в английской транслитерации – Field Effect Transistor, сокращенно FET). Все эти названия с разных сторон характеризуют один и тот же прибор и являются общеупотребительными.

Все разновидности полевых транзисторов можно по существу разделить на два больших класса: полевые транзисторы с управляющим *p-n* переходом – Junction (плоскостной) FET или JFET и полевые транзисторы с изолированным затвором – Insulated (изолированный) Gate (затвор), то есть Insulated Gate FET или сокращенно IJFET. Транзисторы последнего типа содержат в своей структуре металл-оксид-полупроводник отсюда, сокращенно, МОП или, на английском, Metall-Oxide-Semiconductor FET (MOSFET). Поскольку используемые оксиды (диоксид кремния SiO_2) являются частным случаем диэлектрика, то в русском наименовании слово оксид меняют на диэлектрик и тогда аббревиатура превращается в МДП (соответственно в английском это Insulator и сокращенно MISFET). Выделяют также полевые транзисторы с каналом *n*-типа на основе арсенида галлия GaAsFET.

Использование комплементарных структур добавляет в русской аббревиатуре в их названии префикс «К»: КМОП или в английском «С» (от Complementary): CMOS. Именно последний акроним используется для обозначения энергонезависящей памяти компьютера, выполненной в виде интегральной микросхемы по соответствующей технологии. Данная микросхема хранит все начальные установки конфигурации компьютера и, обладая малым потреблением энергии, работает годами без выключения, питаясь от миниатюрного аккумулятора.

В символике условных графических обозначений полевых транзисторов присутствует все та же направляющая стрелка, обозначающая электрод, называемый затвором (Gate), два других электрода имеют очевидные названия: исток (Source) – аналог эмиттера, сток (Drain) – аналог коллектора.

Включение полевого транзистора NJFET с каналом п-типа для исследований ВАХ в схеме с общим истоком показано в программе MC на рис. 92,а. Выполнив в режиме DC Analysis установки в соответствии с окном рис. 92,б и проведя моделирование, получим семейство выходных характеристик в координатах ток стока Id – напряжение на стоке относительно истока Vd (рис. 92,в). Здесь управляющим параметром является напряжение на затворе Vg, изменяющееся в интервале 0... -4 В через 0,5 В. Обратите внимание на полярность включения управляющего источника E2. Верхняя кривая на графике (рис. 92,в) с максимальным током стока Id соответствует $V_g = 0$ В, а нижняя $V_g = -4$ В. Это связано с тем, что канал п-типа сужается по мере роста отрицательного потенциала затвора по отношению к истоку.



а)

Sweep				
	Method	Name	Range	
Variable 1	Auto	E1	20v,0,1	
Variable 2	Linear	E2	4v,0,5	
P	X Expression	Y Expression	X Range	Y Range
1	$Vd(VT1)$	$Id(VT1)$	20	0 03,0

б)

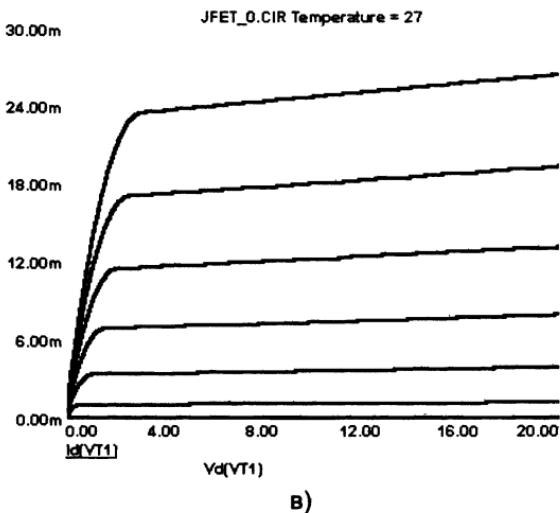


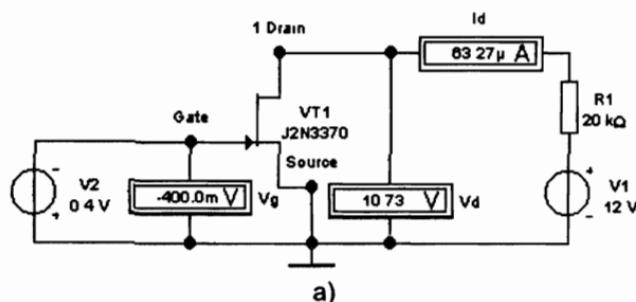
Рис. 92. ВАХ полевого транзистора NJFET (**МС**)

Аналогичное моделирование можно провести и в программе **EWB**. Схема соответствующей виртуальной лабораторной установки показана на рис. 93,а. Изменяя напряжения источников V_1 и V_2 и фиксируя показания приборов можно вручную получить все необходимые ВАХ для выбранного транзистора. Резистор R_1 в схеме играет подсобную роль и необходим при автоматическом снятии ВАХ, который можно выполнить воспользовавшись вариантым анализом по постоянному току (рис. 93,б). Результат показан на рис. 93,в. К сожалению, сервисные возможности программы **EWB** (в плане построения графиков), уступают таковым в **МС**, поэтому и полученные ВАХ опять имеют не совсем обычный вид.

В полевом транзисторе с каналом р-типа полярности источников обратны. Поскольку входное сопротивление полевого транзистора составляет сотни мегаом, то не трудно сообразить, что ток, протекающий через затвор очень мал (составляет единицы наноампер, а для МОП транзисторов даже единицы пикоампер). В отсутствие напряжения на затворе ток через него практически равен нулю. В этом собственно и заключается основная особенность полевых транзисторов по сравнению с биполярными, обусловившая их широкое распространение в микроэлектронике.

В качестве примера получим также выходные ВАХ полевого МОП-транзистора со встроенным п-каналом (NMOS), работающим в режиме обеднения. Условное графическое обозначение такого транзистора отличается от предыдущего: здесь (рис. 94,а) дополнительно появляется обозначение вывода от подложки (Body), ко-

торую обычно соединяют с истоком (Source). Собрав показанную схему и задав параметры моделирования согласно рис. 94,б, можно получить семейство выходных характеристик (см. рис. 94,в).



DC Sweep

Source 1	
Source 1	V1
Start value	0
Stop value	12
Increment	1

Source 2

<input checked="" type="checkbox"/> Use source 2	
Source 2	V2
Start value	0
Stop value	0.1
Increment	0.05

Output

Output node	1
-------------	---

б)

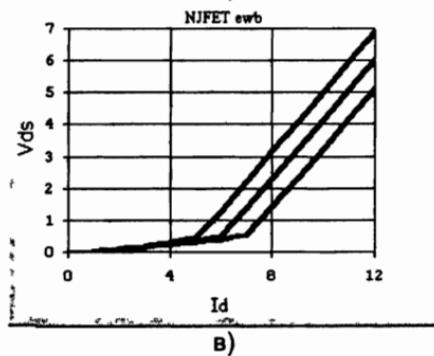
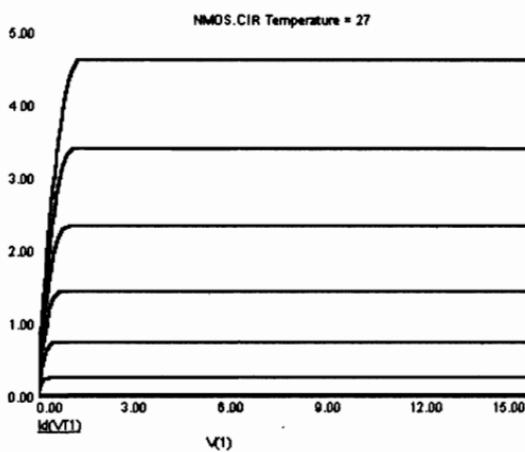
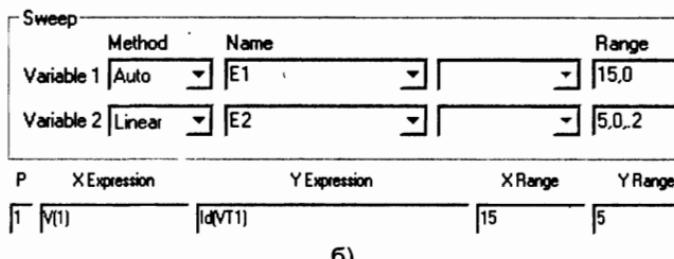
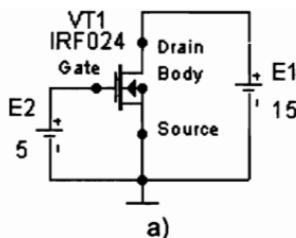


Рис. 93. Выходные ВАХ полевого транзистора NJFET (EWB)



в)

Рис. 94. Выходные ВАХ полевого транзистора NMOS (MC)

В отличие от виртуальной электроники в реальной обращение с МОП- и МДП-транзисторами требует большой осторожности. Дело в том, что большая рабочая чувствительность транзисторов связана с использованием тончайших пленок окислов или диэлектрика. Подобные пленки могут быть разрушены даже такими небольшими статическими зарядами, которые возникают на теле человека. Это приносит массу неприятностей при работе с полевыми транзисторами. Для того чтобы избежать повреждения, МОП-

транзисторы обычно поставляются с соединенными вместе выводами с использованием специальной упаковки. Особые меры предосторожности принимаются при их монтаже (заземление рабочего инструмента и руки с помощью металлического браслета на запястье и т. п.). К счастью, новейшие МОП-транзисторы теперь частично защищены с помощью стабилитронов, включенных внутри транзистора между затвором и истоком.

Тем не менее, положительные свойства полевых транзисторов таковы, что именно широкое использование МОП-транзисторов в интегральных микросхемах в свое время революционизировало всю цифровую электронику.

4.2. Усилители переменного тока

Электронные усилители являются широко распространенными устройствами, находящими как самостоятельное применение, так и в составе многих других устройств. Как правило, источники полезных сигналов изначально формируют слабые сигналы, недостаточные для выполнения тех или иных функций. В усилителях мощность, напряжение или ток сигнала, подведенные к входу, увеличиваются на выходе (в нагрузке, подключенной к выходу) за счет управляемого использования источника питания.

Принято классифицировать усилители по различным признакам: роду тока или напряжения сигнала, мощности, частотному диапазону, элементной базе, схемному решению, прикладным функциям и тому подобное. Первый классификационный признак разделяет все типы усилителей на устройства двух типов: усилители постоянного тока, усиливающие сигналы, не зависящие от времени и усилители переменных токов, усиливающие сигналы, так или иначе зависящие от времени.

Усилительные каскады

В основе любого транзисторного усилителя лежит элементарный каскад усиления, выполненный на одном или нескольких (не обязательно одинаковых) транзисторах. Каскад – это такая минимальная часть усилителя, которая сохраняет при ее выделении все свои функции. С необходимостью такой каскад по отношению к полезному сигналу представляет собой четырехполюсник типа вход-выход, а по отношению к источнику питания – двухполюсник.

Существование различных типов транзисторов (биполярных *p-n-p* и *n-p-n*, разнообразных полевых с *p-n* переходом и МОП-транзисторов), трех возможных схем включения (ОБ, ОЭ и ОК для биполярных и, соответственно, ОЗ, ОИ и ОС для полевых), а также необходимость разделения входных и выходных цепей с источником питания, цепей обратных связей, цепей управления и защиты, приводит к большому разнообразию используемых схем. Еще больше число этих вариантов для усилителей с двумя и более каскадами усиления.

Наибольшее распространение среди однокаскадных усилителей на биполярных транзисторах занимают усилители, собранные по схеме с общим эмиттером. Схема простейшего усилителя в программе **MC** показана на рис. 95,а. Здесь резистор R_1 задает начальное значение (постоянную составляющую тока) базы, а с резистора R_2 снимается напряжение на нагрузку R_3 . Конденсатор C_1 разделяет транзистор и источник постоянного напряжения (питания) E_2 с источником переменного напряжения (сигнала) E_1 , а конденсатор C_2 аналогично разделяет нагрузку или последующий каскад. Здесь и далее, если только не оговаривается особо, сигнал принимается гармоническим с частотой 50 Гц и амплитудой 14 мВ (действующим значением приближенно 10 мВ) и начальной фазой равной нулю. От выбора сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и ЭДС E_2 зависит положение рабочей точки А и линии нагрузки ВС на выходных характеристиках транзистора (см. рис. 89,б) и, следовательно, свойства усилителя при данном транзисторе. Выбор положения точки А это как бы выбор этажа проживания в многоэтажном доме. Отсюда возможны перемещения вверх – до крыши (напряжение источника питания) и вниз до земли. Если выбрать начальное положение посередине, то максимальная амплитуда возможных колебаний будет равна половине питающего напряжения. Работа усилителя в этом случае происходит без отсечки и называется режимом «класса А».

Проведя моделирование переходных процессов (Transient Analysis), получим виртуальные осциллограммы входного и выходного сигналов (рис. 95,б), из которых видно усиление сигнала и его фазовый сдвиг на этой частоте. Перейдя в режим AC Analysis, получим АЧХ и ФЧХ данного каскада (рис. 95,в).

Совет
(MC)

При задании директив на моделирование и проведении анализа получающихся графиков внимательно выбирайте номера узлов и соответствующие переменные, а также диапазоны их изменения.

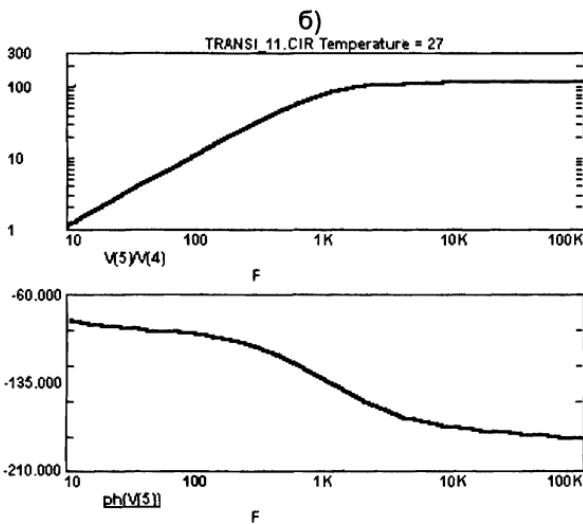
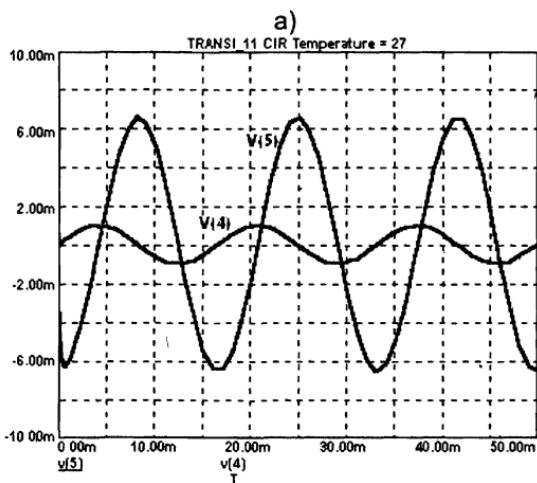
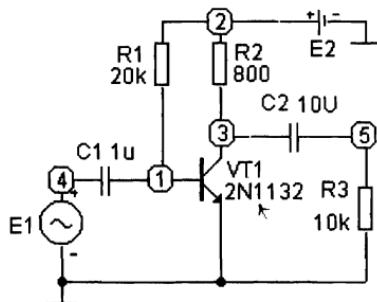


Рис. 95. Простейший каскад на транзисторе NPN с ОЭ без ОС (МС)

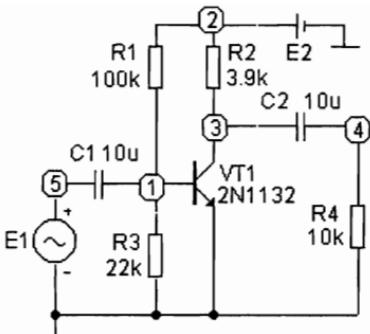
Другим способом задания режима работы транзистора по постоянному току служит использование делителя напряжения питания на двух резисторах, обеспечивающего фиксацию начального тока базы. В схеме на рис. 96,а это резисторы R1 и R3. Проведя моделирование аналогично предыдущему, получаем осциллограммы (рис. 96,б) и частотные характеристики каскада (рис. 96,в).

В реальных еще условиях на работу усилителя влияет температура, технологический разброс параметров компонентов, наводки и другие дестабилизирующие факторы. Свойства каскада в этом отношении могут быть отчасти изменены путем введения обратных связей. Кроме того, целенаправленное введение обратных связей в принципе позволяет управлять режимом работы каскада и даже коренным образом изменить его свойства, например, превратить усилитель в генератор (см. далее подраздел 4.3).

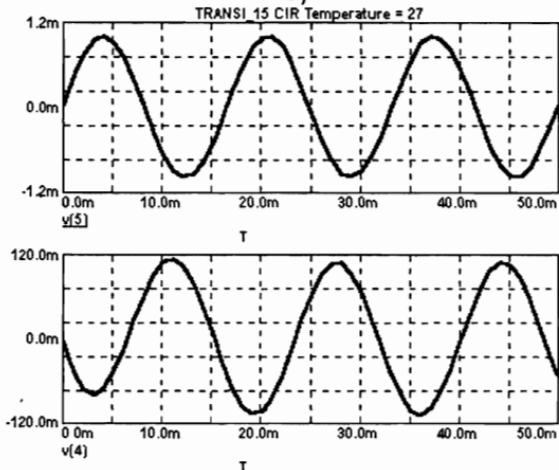
Под обратной связью (ОС) подразумевают передачу сигнала от последующих элементов системы к предыдущим (по отношению к направлению распространения полезного сигнала). Для простейшего каскада усиления ОС – это выходной сигнал (с измененными параметрами), поданный обратно на вход. При положительной обратной связи (ПОС) этот сигнал находится в одной фазе (сдвиг фаз – 0°) с входным и усиливает его. При отрицательной обратной связи (ООС) этот сигнал, находясь в противофазе (сдвиг фаз – 180°) по отношению к начальному входному, напротив, ослабляет последний. В усилителях используется в основном ООС.

Обратная связь является одним из фундаментальных понятий в жизни вообще. Значение обратных связей трудно переоценить, поскольку они существуют в системах самой различной природы: биологических, механических, экономических и других. По сути дела из анализа обратных связей родилась «Кибернетика», которую один из ее отцов-основателей Н. Винер определил как науку об «управлении и связи в животном и машине». В свою очередь в недрах кибернетики сформировалась «Информатика» – такова обратная связь наук.

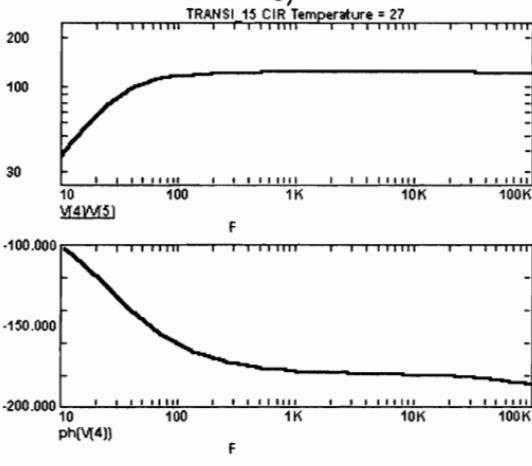
В электронных усилителях помимо знака обратной связи (ПОС или ООС) их классифицируют по способу подключения цепи ОС к входу на последовательные и параллельные, а также по виду снимаемого для управления сигнала: тока, напряжения или комбинированные. Кроме того, различают ОС, смысл которых очевиден: внешние и внутренние, полезные и «паразитные».



a)



б)

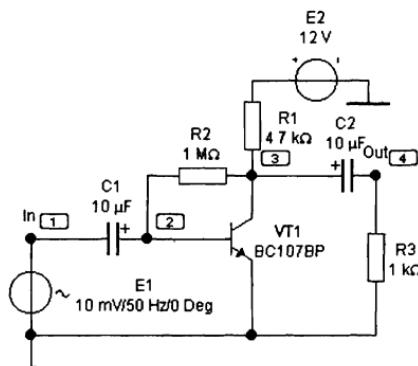


в)

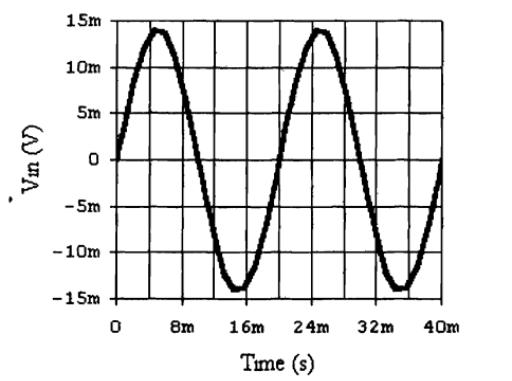
Рис. 96. Транзисторный каскад с фиксацией тока базы (МС)

В схеме усилительного каскада на рис. 97,а в программе **EWB**, резистор R2 играет роль параллельной по напряжению цепи ООС. Результаты стандартного моделирования в режиме исследования переходных процессов (Analysis > Transient) показаны в виде виртуальных осциллографов на рис. 97,б,в.

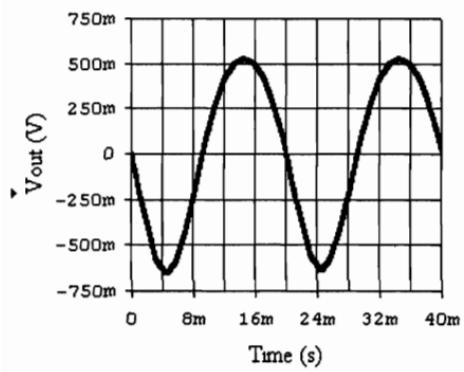
Частотные характеристики (рис. 97,г,д,е) получены в режиме моделирования на переменном токе (Analysis>AC Frequency). Толщина линии первой АЧХ (рис. 97,г) связана с тем, что она размыта дополнительно за счет вариации параметра (Parameter sweep). В качестве параметра, изменяемого на порядок, взят обратный ток коллекторного перехода (Saturation current) в модели транзистора. Следующие характеристики получены при варьировании емкости C1 от 1 до 11 мкФ (рис. 97,д) и повышении температуры до 127 °С (рис. 97,е).



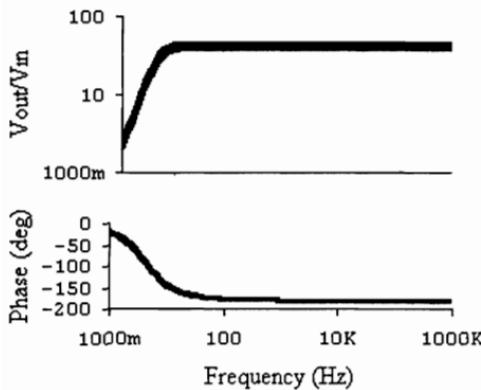
а)



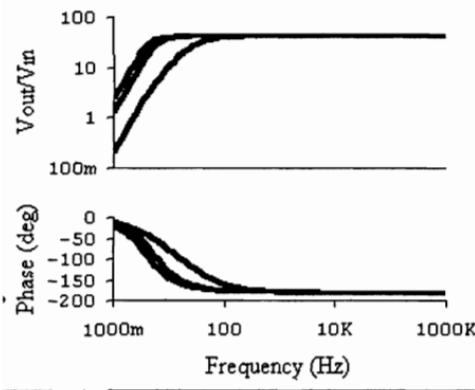
б)



B)



C)



D)

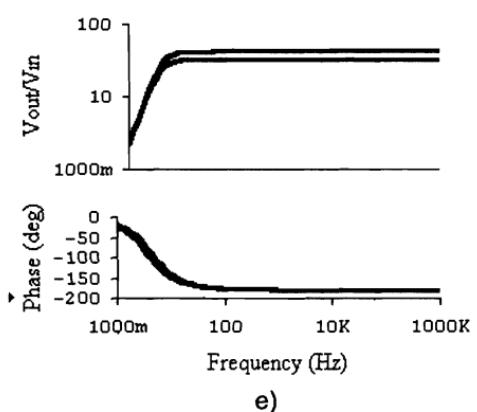
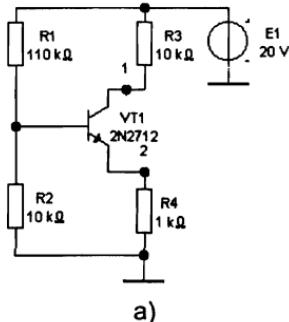


Рис. 97. Усилительный каскад с NPN транзистором с параллельной ООС по напряжению (EWB)

Более эффективную стабилизацию работы каскада по постоянному току обеспечивает включение в цепь эмиттера резистора (R_4 на рис. 98,а). В данном случае этот резистор осуществляет последовательную ООС по току.

Выполнив установки анализа в режиме пошагового увеличения температуры Temperature Sweep (рис. 98,б), получим зависимость уменьшения напряжения на коллекторе V_1 от температуры (рис. 98,в). Физически это уменьшение связано с увеличением коллекторного тока за счет температурного роста числа неосновных носителей заряда. Подобный рост приводит к увеличению падения напряжения на сопротивлении в цепи коллектора R_3 . Поскольку ток коллектора приближенно равен току эмиттера, то одновременно, происходит и рост падения напряжения V_2 на сопротивлении R_4 . За счет этого возрастает потенциал эмиттера, что автоматически частично компенсирует уменьшение потенциала коллектора относительно эмиттера. Характер роста V_2 (рис. 94,г) получен в том же режиме, но при замене выходного узла Output node в окне Temperature Sweep с 1 на 2. Расположение резисторов R_1 – R_4 на схеме рис.98,а напоминает букву «Н», поэтому подобную схему стабилизации называют также «Н-смещением».

В режиме работы каскадов на переменном токе введение резисторов в цепи ОС приводит к изменениям по переменной составляющей. Для устранения этого фактора используют соответствующее включение корректирующих конденсаторов. В схеме с Н-смещением эмиттерный резистор просто шунтируют конденсатор-



a)

Temperature Sweep

Analysis

Start temperature °C

End temperature °C

Sweep type

Increment step size °C

Output node

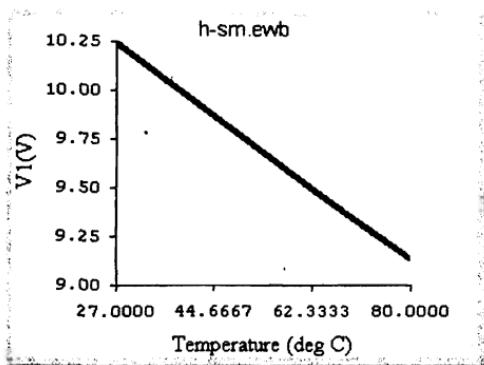
Sweep for:

DC Operating Point

Transient Analysis

AC Frequency Analysis

b)



b)

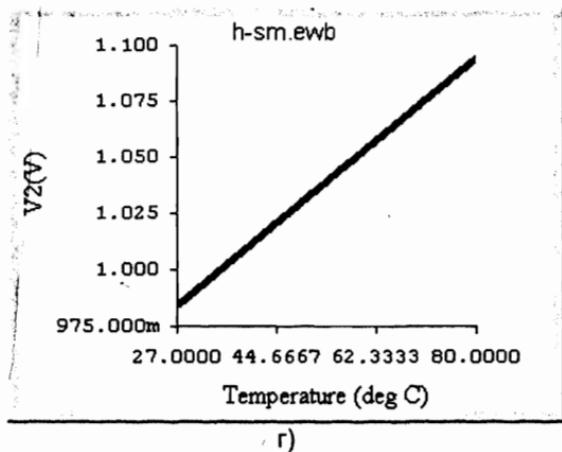


Рис. 98. Температурная стабилизация каскада последовательной ООС по току (**EWB**)

ром, подбирая его емкость в зависимости от требуемой АЧХ. На рис. 99,а эту роль играет конденсатор С3. Исследование работы каскада иллюстрируется осциллограммами входного V5 и выходного сигнала V6 на рис. 99,б. Здесь сигналу V5 соответствует график, выполненный тонкой линией с масштабом на левой оси ординат, а сигналу V6 – график, выполненный толстой линией с масштабом на правой оси ординат. Соответственно АЧХ и ФЧХ каскада приведены на рис. 99,в.

Схема подобного же усилительного каскада в программе **MC** показана на рис. 100,а. Проведем детальное исследование его работы. В режиме *Transient Analysis*, получим виртуальные осциллограммы входного v(5) и выходного v(6) сигналов (рис. 100,б). Из этих осциллограмм видно усиление сигнала и фазовый сдвиг почти на 180° . АЧХ и ФЧХ каскада, полученные в режиме АС показаны на рис. 100,в. Из характера АЧХ видно, что каскад имеет равномерную характеристику в полосе частот $100 \text{ Гц} \dots 100 \text{ кГц}$.

Влияние изменения емкости входного разделительного конденсатора С1 на завал АЧХ в области низких частот показан на графике рис. 96,г, полученном в режиме *Sweeping* по этому параметру. Аналогично смоделировано влияние изменения резистора ОС R4 при двух температурах 27°C (рис. 100,д) и 127°C (рис. 100,е). Для получения последнего графика использованы установки, показанные на рис. 100,ж,з.

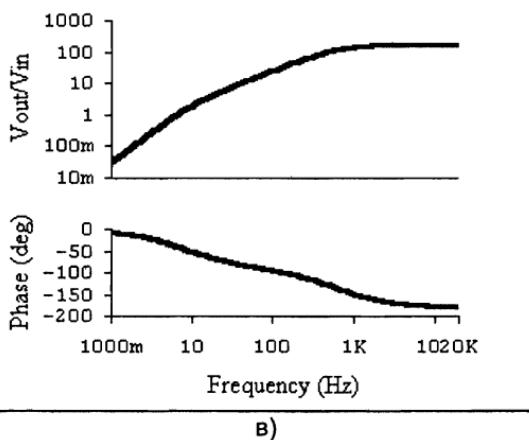
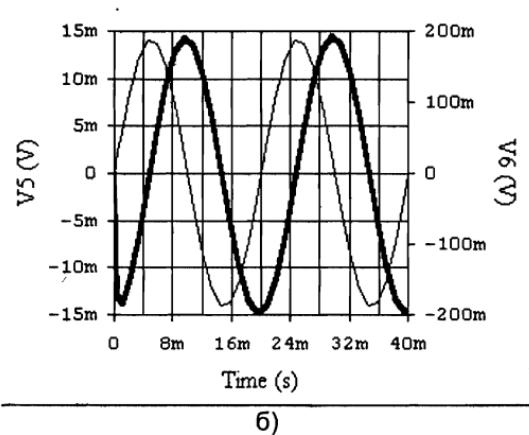
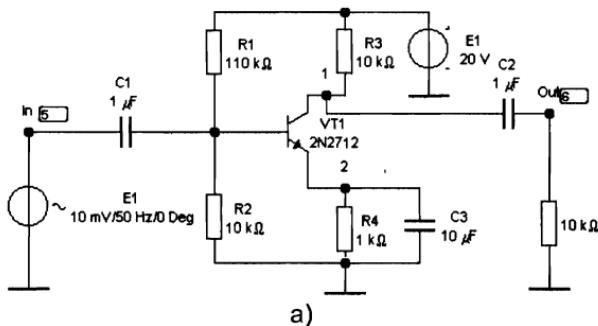
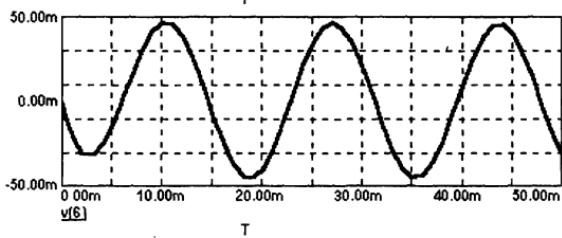
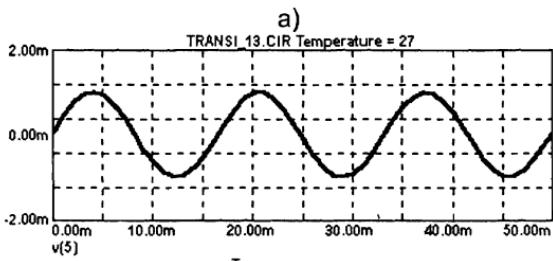
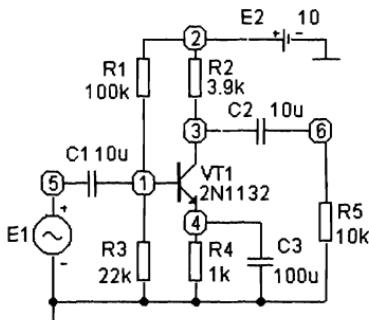
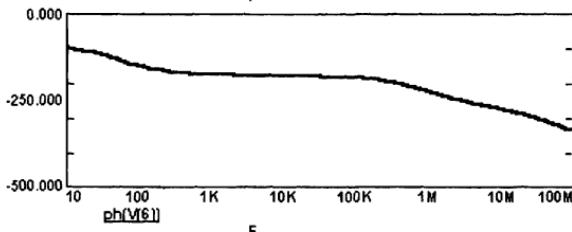
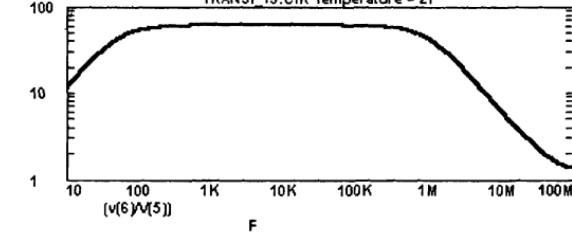


Рис. 99. Транзисторный каскад NPN с ОЭ с Н-смещением (EWB)

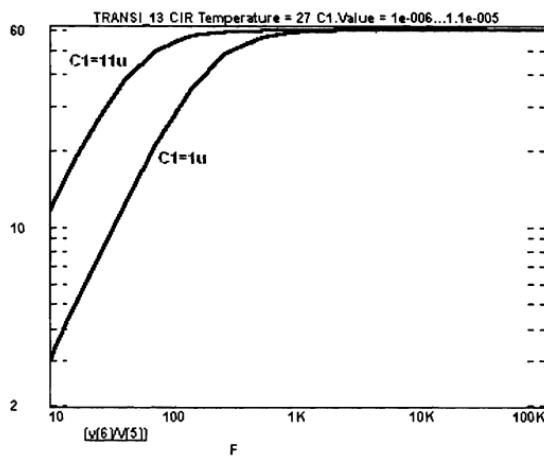


b)

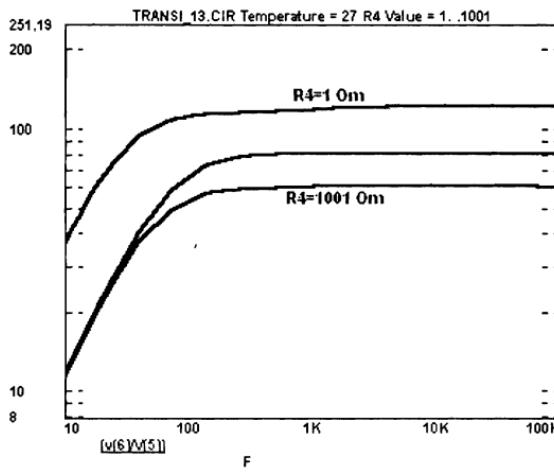
TRANSI_13.CIR Temperature = 27



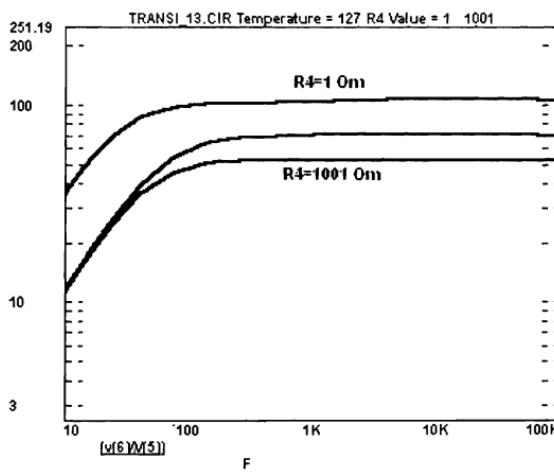
b)



г)



д)



е)

AC Analysis Limits

<u>Run</u>	<u>Add</u>	<u>Delete</u>	<u>Expand</u>	<u>Stepping...</u>	<u>Properties...</u>
Frequency Range	[100k,10]			Run Options	
Number of Points	51			State Variables	
Temperature [Linear ▾]	127			Frequency Step	
Maximum Change %	5			<input checked="" type="checkbox"/> Operating Point	
Noise Input	NONE			<input checked="" type="checkbox"/> Auto Scale Rat	
Noise Output	2				
P	X Expression			Y Expression	
[Icon Row]	1	F	[(v(6)/V(5))]		
ж)					

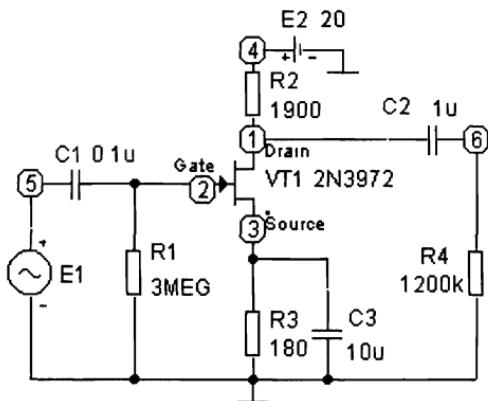
Stepping

Parameter 1	
Step What	R4
From	1
To	1001
Step Value	500
Step It	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Method	<input checked="" type="radio"/> Linear <input type="radio"/> Log
Parameter Type	<input checked="" type="radio"/> Component <input type="radio"/> Model

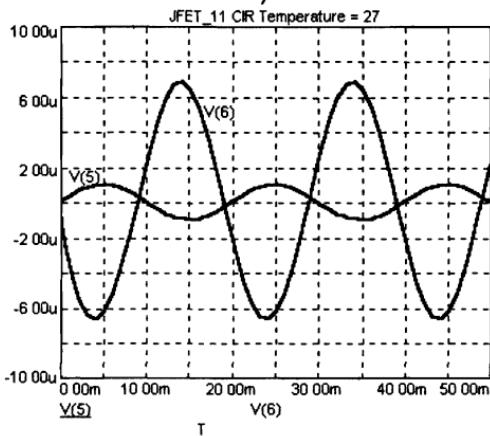
3)

Рис. 100. Транзисторный каскад NPN с ОЭ с Н-смещением (МС)

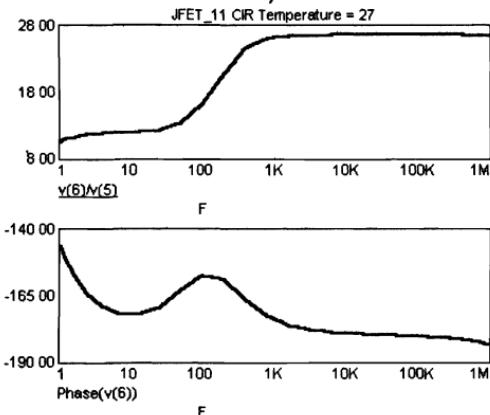
Усилительные каскады на полевых транзисторах, собранные по схеме с общим истоком в схемотехническом отношении во многом повторяют каскады на биполярных транзисторах с общим эмиттером. В тоже время, особенности полевых транзисторов приводят и к особенностям построения каскадов. Во-первых, поскольку токи затворов пренебрежимо малы, то конкретные значения резисторов в цепях смещения выбираются из требований заданной величины входного сопротивления. Во-вторых, знак напряжения смещения на затворе может быть противоположен знаку напряжения, приложенного к стоку.



a)



б)



в)

Рис. 101. Простейший каскад на полевом транзисторе NJFET с общим истоком (МС)

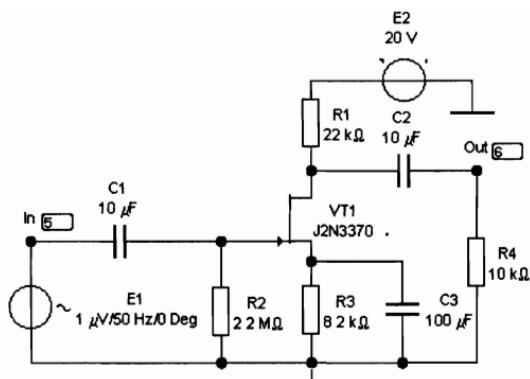
Схема простейшего каскада на полевом транзисторе (в программе **МС**) на рис. 101,а по сути отличается от аналогичной схемы номиналами на рис. 95,а (в том числе повышенным напряжением питания) и тем, что резистор R1, задающий смещение затвора (аналог базы) включен на землю. Осциллограммы входного переменного напряжения амплитудой 1 мкВ и частотой 50 Гц и выходного напряжения показаны на рис. 101,б, а частотные характеристики – на рис. 101,в. Аналогично в программе **EWB** на рис. 102,а–в показана схема и результат ее моделирования.

Каскад на полевом транзисторе может быть собран и с использованием Н-смещения (рис. 103,а и 104,а). Моделирование работы каскада, выполненное стандартным образом показано на рис. 103,б,в и 104,б,в.

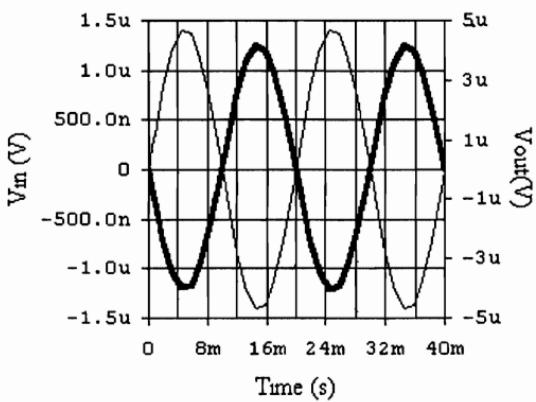
В многокаскадных усилителях используют различные схемы их включения. На рис. 105 в программе **EWB** приведена схема двухкаскадного усилителя на биполярных транзисторах п-р-п типа, включенных по схеме с общим эмиттером (см. также рис. 97,а). Источник входного сигнала Е1 – гармонический с частотой 1 кГц и действующим значением напряжения 10 мВ. Вольтметры V1, V2 и V3, установленные на Mode АС, измеряют соответственно напряжение входного сигнала (10 мВ), напряжение после первого каскада (644,0 мВ) и напряжение на выходе усилителя (3,315 В). Отсюда виден рост сигнала по мере прохождения через усилитель.

Схема двухкаскадного усилителя на полевых транзисторах в программе **МС** показана на рис. 106,а. Здесь каждый каскад собран по схеме с общим истоком аналогично схеме рис. 101,а. Из осциллограмм рис. 106,б, снятых соответственно в точках входа (V2), после первого каскада (V5) и на выходе усилителя (V8) видно усиление сигнала и изменение его фазы на частоте 1 кГц. АЧХ для коэффициента усиления, равного отношению напряжения сигнала на выходе усилителя к напряжению на его входе (V8/V5) и ФЧХ в диапазоне 100 Гц ... 100 кГц показаны на рис. 106,в.

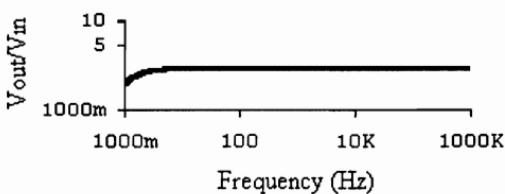
Когда-то два ламповых триода соединялись непосредственно по схеме общий катод – общая сетка, причем сетка второго каскада заземлялась. Подобная схема называлась «каскод» – от слов «каскад» и «триод». В каскодных схемах на транзисторах также осуществляется такое их включение, при котором выход и вход каскадов соединены непосредственно. Каскодные схемы не симметричны: первый каскад имеет входную проводимость, значительно меньшую, чем второй.



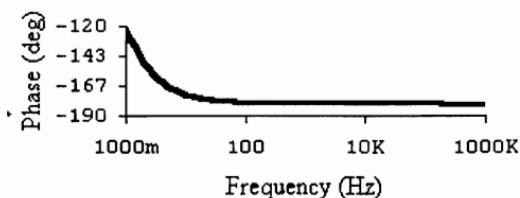
a)



б)

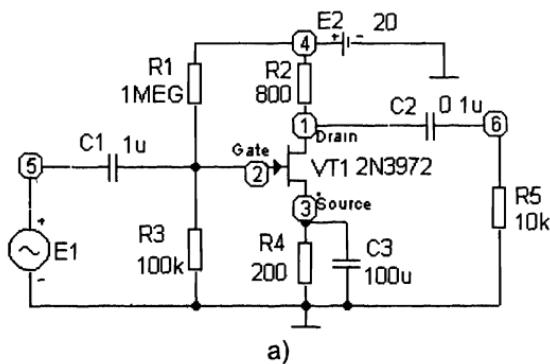


Frequency (Hz)

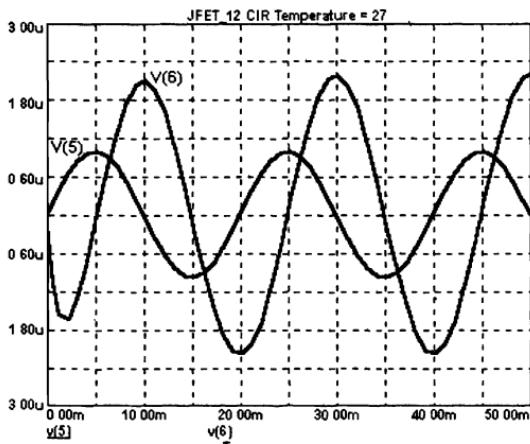


в)

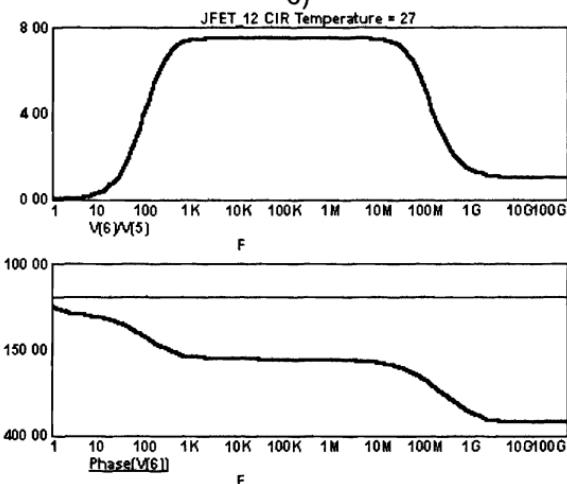
Рис. 102. Простейший каскад на полевом транзисторе NJFET с общим истоком (EWB)



a)

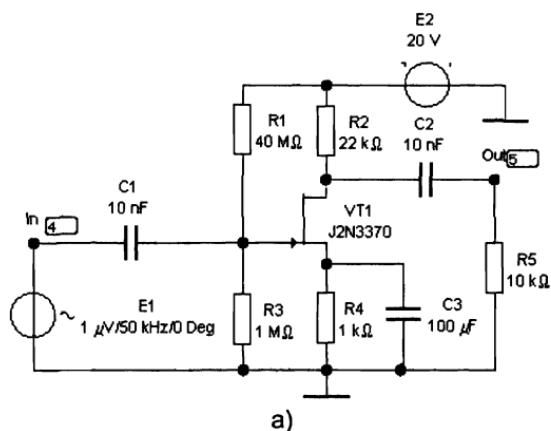


б)

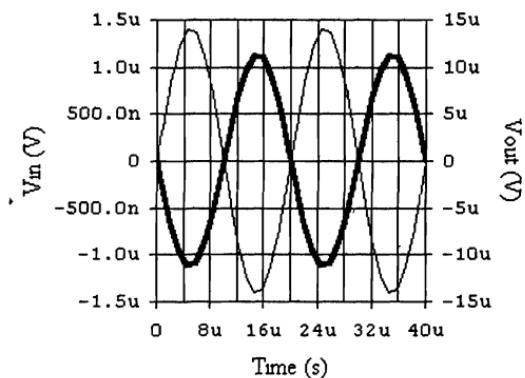


в)

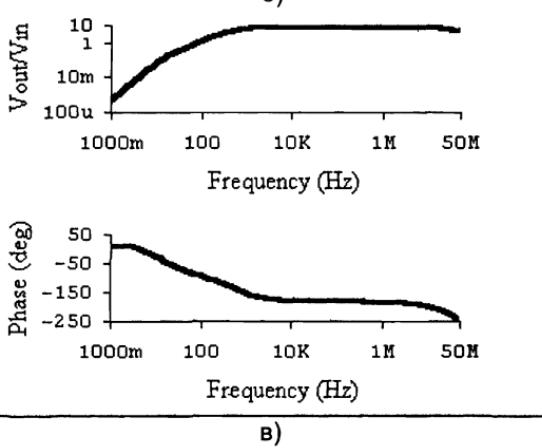
Рис. 103. Н-каскад на полевом транзисторе NJFET с общим истоком (МС)
160



a)



б)



в)

Рис. 104. Н-каскад на транзисторе NJFET с общим истоком (EWB)

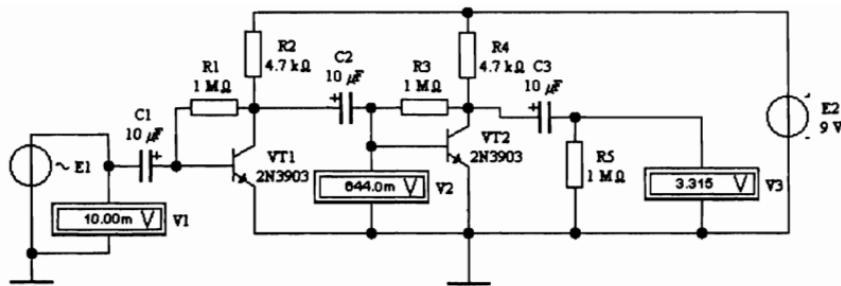
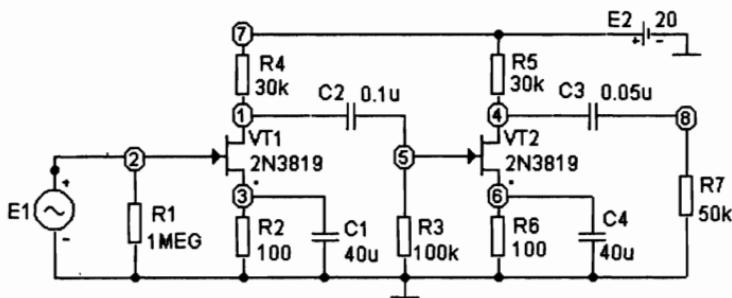
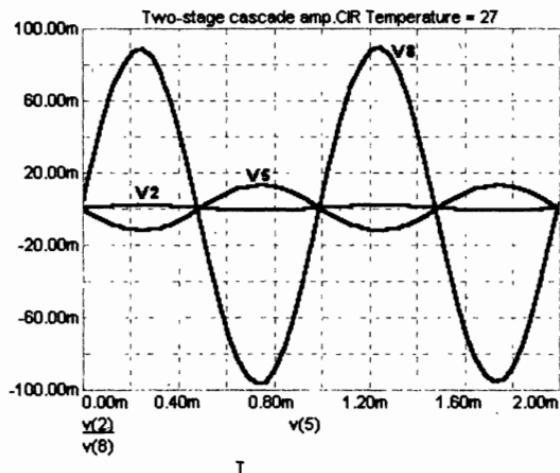


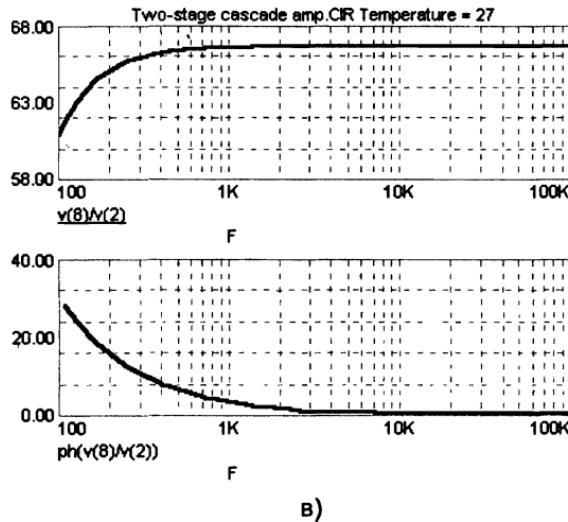
Рис. 105. Двухкаскадный усилитель (EWB)



a)



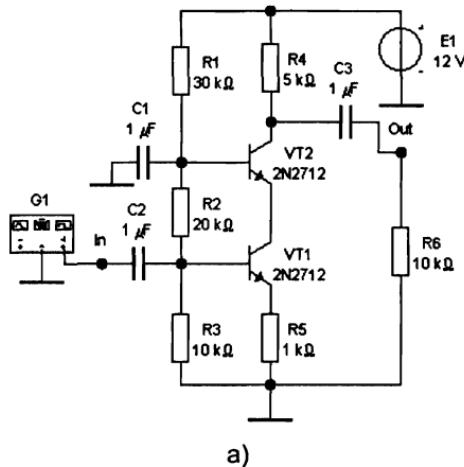
б)



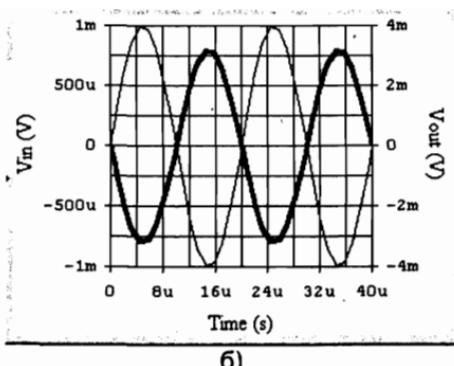
б)

Рис. 106. Двухкаскадный усилитель (МС)

Наиболее распространены каскодные схемы общий эмиттер – общая база и общий исток – общий затвор. Эти две схемы, соответственно, показаны на рис. 107,а и 108,а. Осциллографмы напряжений: входного V_{in} и выходного V_{out} показаны на рис. 107,б (более толстая линия и правая ось ординат) и на рис. 108,б.

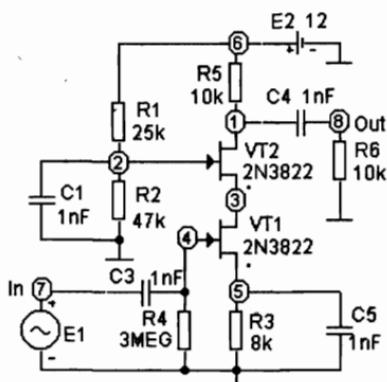


а)

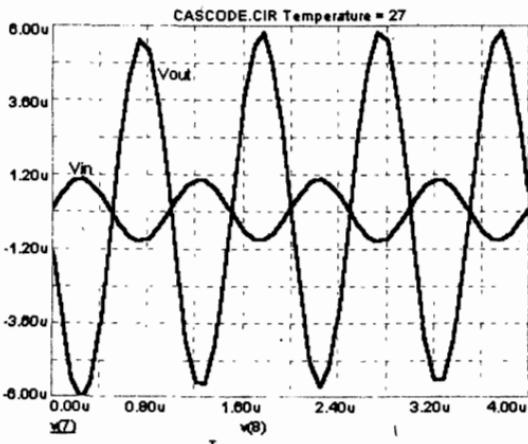


б)

Рис. 107. Каскод (EWB)



а)



б)

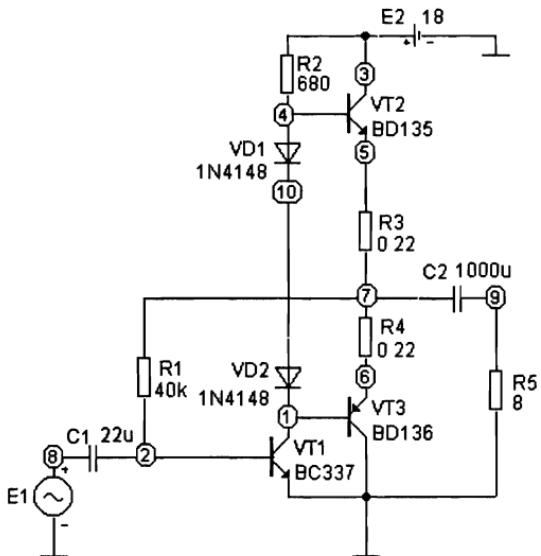
Рис. 108. Каскод (MC)

В усилителях мощности, работающих на низкоомную нагрузку (звуковая катушка громкоговорителя), в качестве выходного каскада часто используют двухтактные схемы. В бестрансформаторных каскадах применяют два комплементарных транзистора, включенных по схеме с общим коллектором (эмиттерные повторители).

В схеме усилителя мощности на рис. 109,а в программе **MC** двухтактный выход образован транзисторами VT2 (типа *n-p-n*) и VT3 (типа *p-n-p*). На базы транзисторов воздействует одно и тоже переменное напряжение (см. осциллограмму V(1) на рис. 109,б). В силу того, что транзисторы имеют противоположные структуры, протекающие в них токи также противоположны (см. осциллограммы токов эмиттера на рис. 109,б). Верхний транзистор пропускает положительную полуволну (первый такт-полупериод), а нижний – отрицательную (второй такт-полупериод). Эти токи складываются в нагрузке [см. осциллограмму I(R6) на рис. 109,б] подобно тому, как складывались полуволны в двухполупериодном выпрямителе. В ламповой технике похожая схема называлась пушпульной от английских слов *push* (толкать) и *pull* (тянуть). Термин «*push-pull*», переводимый в технической литературе как двухтактный, соответствует по смыслу образному русскому «тяни-толкаю». В результате такого согласованного действия ток в нагрузке удваивается. Схема подобного каскада в программе **EWB** показана на рис. 110,а. Моделирование работы каскада представлено осциллограммами входного *Vin* и выходного *Vout* напряжений, которые показаны на рис. 110,б (здесь более толстая линия и правая ось ординат соответствуют выходному напряжению).

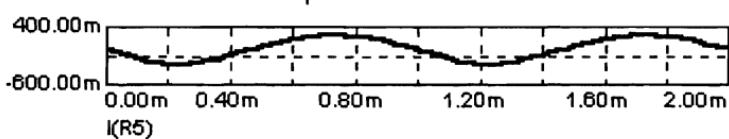
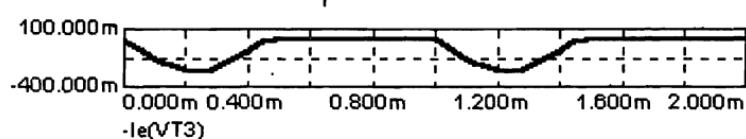
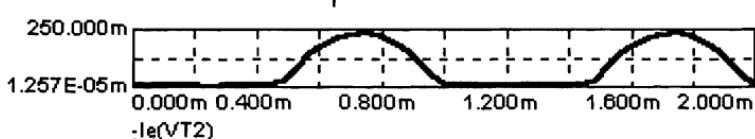
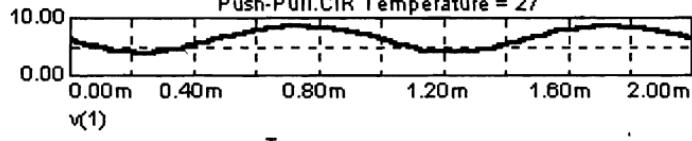
В заключение этого раздела смоделируем работу микрофонного усилителя, предназначенного для работы с динамическими микрофонами, из каталога **KIT NS018**. Принципиальная схема усилителя показана в программе **EWB** на рис. 111,а, а в программе **MC** соответственно на рис. 112,а (графика схемы и позиционные обозначения компонентов несколько изменены по сравнению с каталогом).

Усилитель содержит два биполярных *n-p-n* транзистора VT1 и VT2 с непосредственной связью и ряд частотно-зависимых цепей ООС. Из приведенных на рис. 111,б,в и 112,б,в осциллограмм, АЧХ и ФЧХ видно, что усилитель обладает равномерной частотной характеристикой в полосе частот от 100 Гц до 10 кГц с коэффициентом усиления по напряжению 150.



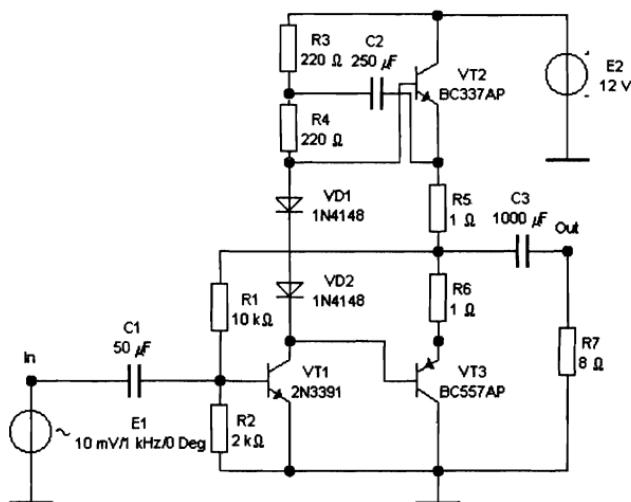
a)

Push-Pull.CIR Temperature = 27

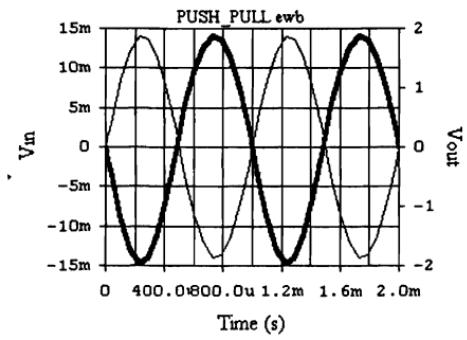


б)

Рис. 109. Двухтактный выходной каскад (МС)

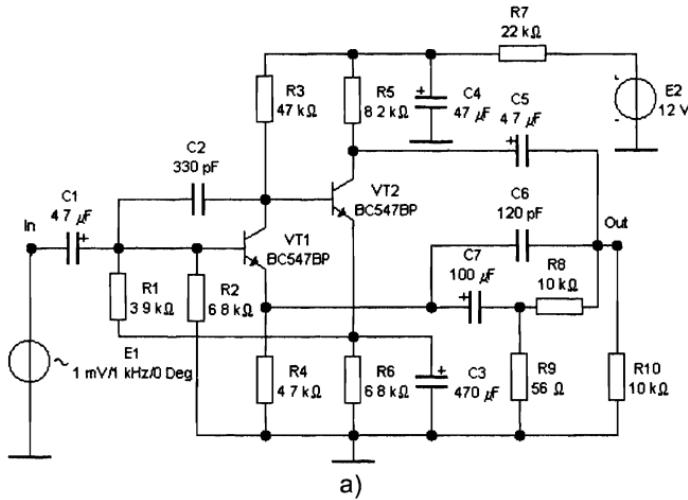


a)

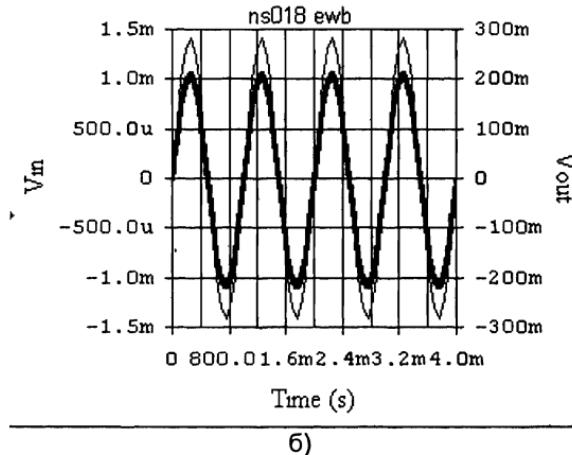


б)

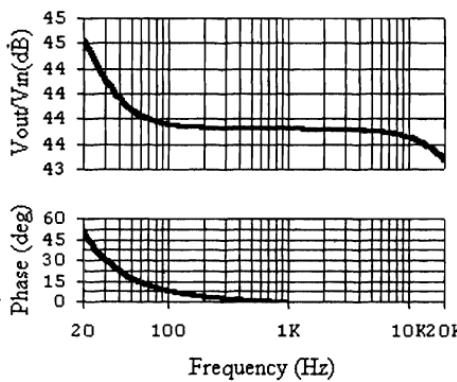
Рис. 110. Двухтактный выходной каскад (EWB)



a)

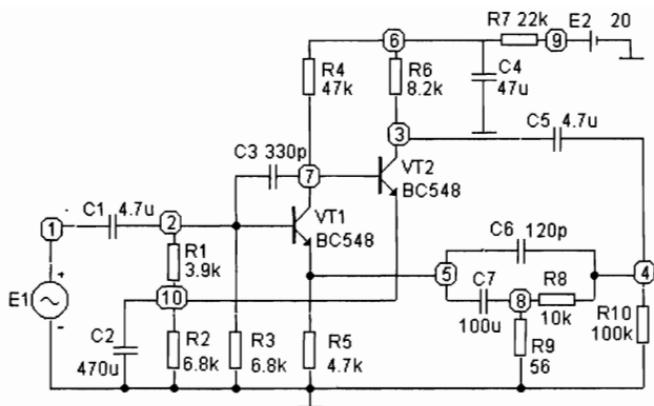


b)

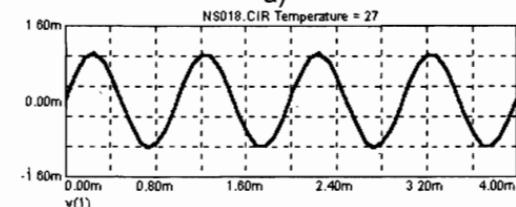


c)

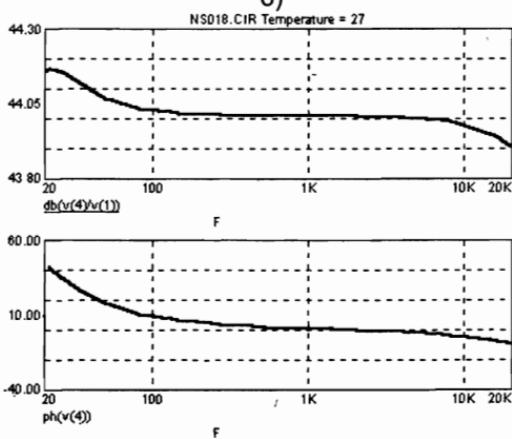
Рис. 111. Микрофонный усилитель КИТ NS018 (EWB)



a)



b)



b)

Рис. 112. Микрофонный усилитель КИТ NS018 (МС)

4.3. Генераторы

Устройство без генератора либо вообще ни на что не способно, либо предназначено для подключения к другому (которое, скорее всего, содержит генератор).

П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники

Разнообразные по принципу действия, характеристикам и форме выходного сигнала генераторы действительно широко распространены в электронике. Генераторы применяются как самостоятельные устройства, так и в виде многочисленных функциональных узлов, являющихся основой промышленной и бытовой аппаратуры. Различают генераторы гармонических и негармонических колебаний. Рассмотрим в плане схемотехнического моделирования транзисторные генераторы гармонических колебаний и мультивибраторы.

Научно-технический термин «генератор» имеет вполне житейское латинское происхождение: «generator» по-латыни означает родитель, производитель. Электронные генераторы «рождают» электрические колебания, а точнее преобразуют энергию источников в энергию колебаний с заданными характеристиками.

Переход от усилителя к автогенератору (самовозбуждающемуся генератору) происходит при выполнении двух условий: обратная связь, охватывающая усилитель, является положительной на частоте генерации, и усиление достаточно для компенсации потерь в цепи обратной связи. При наличии частотно-избирательных элементов в цепи ОС и выходной цепи формируются гармонические колебания определенной частоты. Процесс самовозбуждения генератора заключается в том, что в спектре электрических колебаниях на уровне теплового шума присутствуют гармоники всех частот и фаз. Колебания одной из этих гармоник, удовлетворяющей перечисленным выше условиям, многократно проходя по кольцу усилитель – цепь ОС, увеличиваются по амплитуде до тех пор, пока рост не ограничится потерями.

В зависимости от характера элементов, формирующих колебания можно выделить LC-, RC- и кварцевые генераторы.

LC-генераторы

В LC-генераторах в качестве частотно-задающих элементов используются индуктивности и конденсаторы, на основе которых выполняются последовательные или параллельные резонансные колебательные контуры.

Соберем в программе **EWB** простейший автогенератор с трансформаторной ОС на основе усилительного каскада на полевом транзисторе (рис. 113, а). Индуктивность L1 первичной обмотки трансформатора T1 образует с конденсатором C1 параллельный контур, включенный в цепь стока. Резистор R1 добавлен для моделирования потерь и исследования амплитудных соотношений (в реальном устройстве подобный элемент появляется вследствие потерь в проводнике и магнитопроводе индуктивной

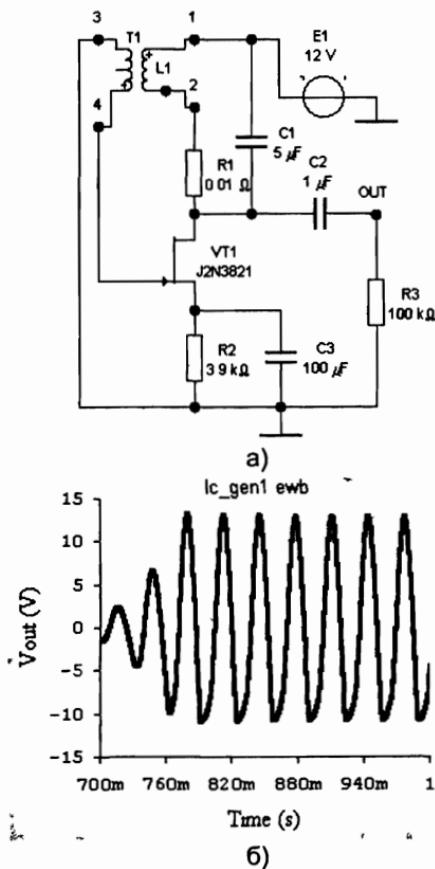


Рис. 113. Генератор с LC-контуром (**EWB**)

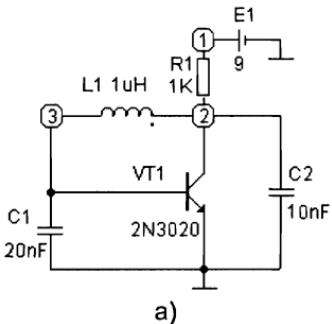
катушки). Рабочая точка полевого транзистора выбирается схемой смещения R2C3 так же, как для обычного линейного усилителя. Сигнал ОС снимается с выводов 3, 4 вторичной обмотки трансформатора T1 и подается на затвор полевого транзистора. Фаза этого сигнала зависит от фазировки включения обмоток трансформатора. При соблюдении показанного на схеме включения «генераторных выводов обмоток» (отмечены условным знаком +) сигнал ОС будет синфазен сигналу на выходе на частоте генерации, т. е. ОС будет положительной.

Включив режим анализа на переменном токе, получим осциллограммы выходного напряжения (рис. 113,б). Самый начальный участок переходного режима к установившимся автоколебаниям 0 – 700 мс на осциллограмме не представлен.

Здесь трансформатор осуществляет необходимый поворот фазы на 180°. Поэтому для проверки первого (фазового) условия самовозбуждения достаточно поменять местами соединения 1, 2 или 3, 4 обмоток T1 и генерация прекращается (если одновременно поменять обе пары, то ничего не изменится). Подобный метод используется на практике: при настройке генераторов добиваются генерации, подбирая переключением необходимую фазировку обмоток. Изменяя сопротивление R1, можно пронаблюдать выполнение второго (амплитудного) условия самовозбуждения. Управлять частотой генерируемых колебаний можно путем изменения параметров основного контура L1C1.

Наличие трансформаторной ОС является основным недостатком LC-автогенераторов, поэтому более популярны схемы так называемых «трехточек». В этих генераторах LC-контуры соединяются с транзистором (а ранее соединялись с электровакуумным триодом) в трех точках. Соберем в программе МС простейший автогенератор по схеме емкостной трехточки (в зарубежной литературе называемый по фамилии изобретателя генератором Колпитца – Colpitts Oscillator). Сложный контур L1C1C2 (см. рис. 114,а), включенный в точках 2, 3 и «земля», определяет форму генерируемого сигнала и основную частоту, а также необходимое условие для поворота фазы.

Проведя стандартное моделирование переходных процессов, получим осциллограммы напряжения на входе каскада V(3) и его выходе V(2) (см. рис. 114,б). На приведенных осциллограммах видны необходимые амплитудно-фазовые соотношения. Для устранения постоянной составляющей в выходном сигнале можно воспользоваться стандартными разделительными элементами связи, выбираемыми в зависимости от сопротивления нагрузки: индуктивными для низких величин и емкостными – для больших.



a)

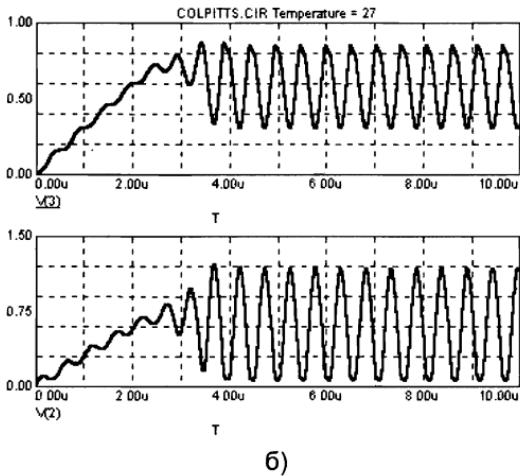


Рис. 114. Генератор с емкостной ОС (МС)

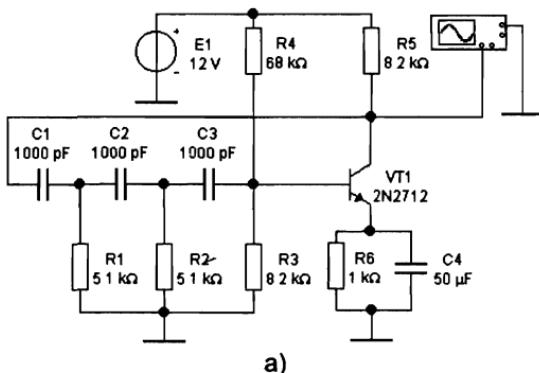
RC-генераторы

Стремление уменьшить габариты и массу генераторов привели к тому, что вместо катушек индуктивностей в сочетании с емкостями стали использовать резисторы. Такая замена вполне допустима в диапазоне звуковых частот и при не слишком высоких требованиях к генератору.

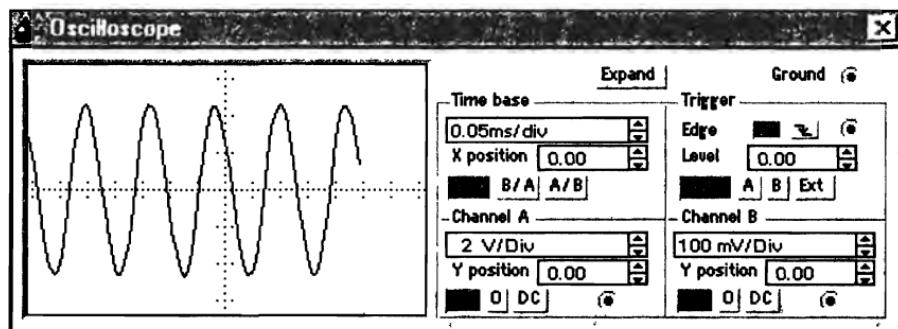
В RC-автогенераторах в полной мере используется принцип частотно-зависимой обратной связи. Идеальный емкостной элемент создает в цепи сдвиг фаз между током и напряжением в 90° , а в сочетании с резистивным $< 90^\circ$. Поэтому простейший двухэлементный Г-образный четырехполюсник типа дифференцирующей RC-цепи сдвигает фазу сигнала примерно на 90° . Соединив последовательно три подобных четырехполюсника, получаем возможность сдвига фазы на 180° . Один каскад усиления на транзи-

сторе с общим эмиттером создает сдвиг фаз между входным и выходным сигналом также в 180° . Соединив коллектор транзистора с его базой через RC-цепь, обеспечивающую изменение фазы на 180° , получим усилитель, охваченный ПОС. Этим будет удовлетворено первое условие самовозбуждения. Для того чтобы удовлетворялось и второе условие, необходимо, чтобы усилитель восполнял те потери в сигнале ОС, которые происходят в ее цепи на частоте генерации.

Описанная идея реализована в схеме RC-генератора, показанного на рис. 115, а в программе **EWB** и на рис. 116 в программе **MC**. Включив моделирование в программе **EWB**, получим при указанных на осциллографе настройках, осциллограмму выходного напряжения. Из осциллограммы видно, что генератор вырабатывает гармонические колебания с периодом около 0,1 мс, т. е. с частотой примерно 10 кГц (более точный отсчет можно сделать, нажав на клавишу *Expand* панели виртуального осциллографа и воспользовавшись электронными курсорами).

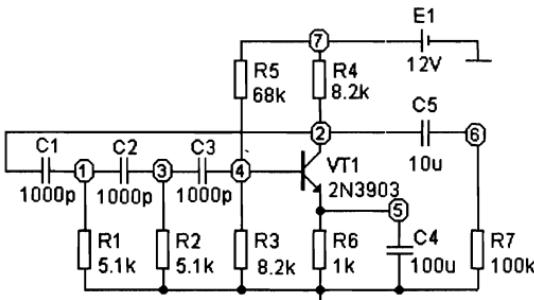


a)

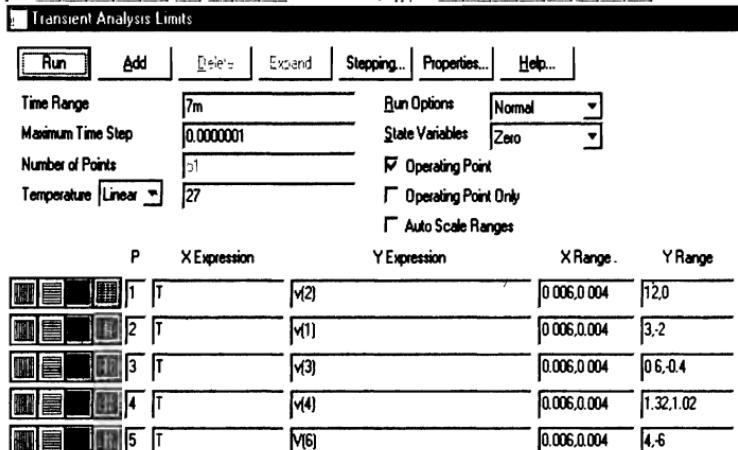


b)

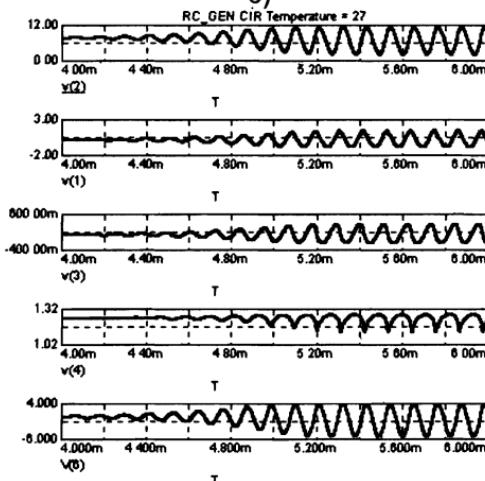
Рис. 115. RC-генератор (**EWB**)



a)



b)



b)

Рис. 116. RC-генератор (МС)

Аналогично, в программе **MC**, сделав установки на моделирование в соответствие с показанными на рис. 116,б, получим осцилограммы рис. 116,в. Здесь дополнительно можно проследить фазовые соотношения в разных узлах схемы, отмеченных цифрами на схеме и на осцилограммах.

**Совет
(MC)** Не спешите сразу выключать процесс моделирования, если на экране не появляются характерные колебания: возможно, затянулся переходный процесс их нарастания и амплитуда пока еще мала для наблюдения. Если все же генерация отсутствует, то внимательно проверьте собранную схему и номиналы компонентов, а также режимы моделирования.
Обратите внимание на то, что в приведенном выше примере начальная часть переходного процесса (от 0 до 4 мс) отсечена и для «прорисовки» синусоидальной формы сигнала подобран очень маленький временной шаг: Maximum Time Step=0.0000001.

Частота колебаний RC-генераторов может легко регулироваться посредством изменения параметров RC-цепи, в чем не трудно убедиться изменяя величины С1,С2,С3 и R1,R2,R3 в схемах рис. 115,а и 116,а. На практике в качестве частотно-зависимой ОС в автогенераторах используют также и более сложные, например мостовые RC-цепи.

Кварцевые генераторы

LC- и RC-генераторы имеют один существенный недостаток, связанный с температурной нестабильностью генерируемого сигнала. Для стабилизации используют различные решения, в том числе используют замечательное свойство кварца: ничтожную температурную зависимость изменения его размеров, от которых зависит частота собственных колебаний. Включая кварцевый резонатор в контур или цепь ОС, получают так называемый кварцевый (правильнее, очевидно, кварцованный) генератор.

На рис. 117 и 118 показана схема одного из вариантов кварцевого генератора, собранного по схеме Колпитца. Рядом с позиционным обозначением кварца ZQ показан его тип (НС-49/U) и рабочая частота (11 МГц). Приведенные ниже осцилограммы иллюстрируют колебания на базе транзистора и выходе генератора. Регулировку частоты колебаний в некоторых пределах можно осуществить, изменяя индуктивность контура L1.

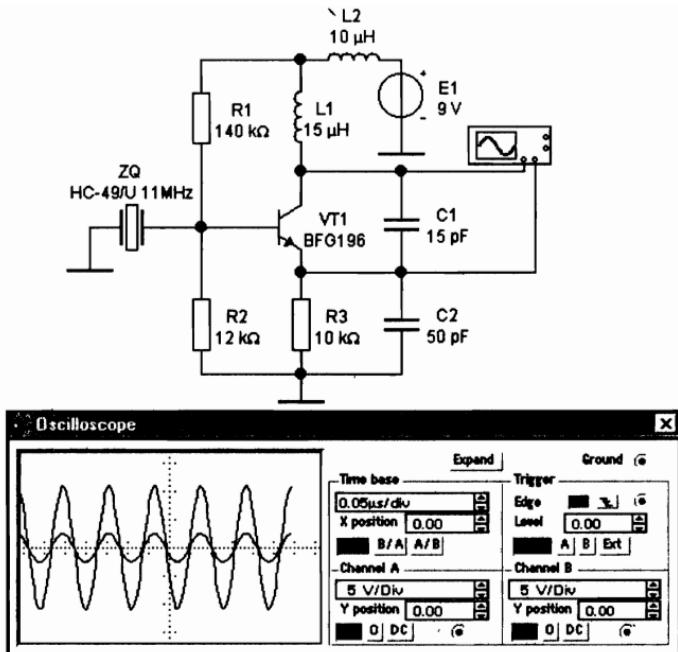
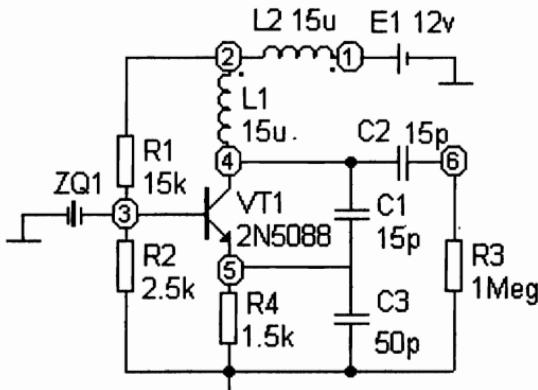
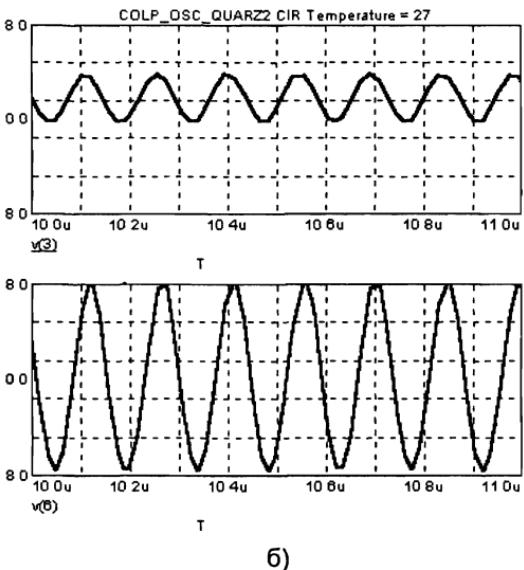


Рис. 117. Кварцевый генератор (EWB)



a)



б)

Рис. 118. Кварцевый генератор (МС)

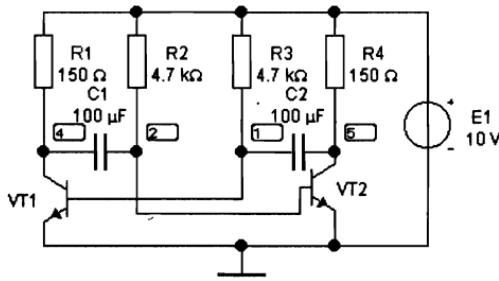
Мультивибраторы

Мультивибраторы генерируют периодические колебания несинусоидальной формы. Термин «мультивибратор» происходит от двух латинских слов: *multum* – много и *vibrare* – колебать. Импульсы, создаваемые мультивибратором при периодическом заряде и разряде конденсаторов, представляют одновременное множество колебаний разных частот, что и объясняет приведенное название.

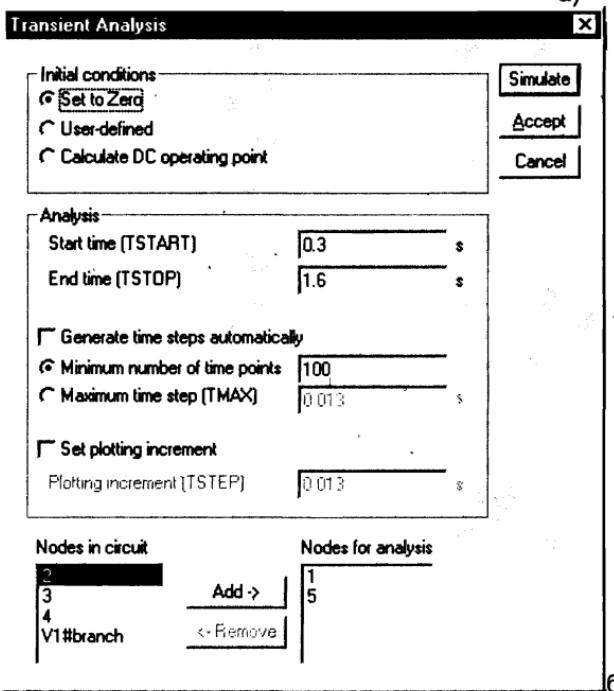
В автоколебательных мультивибраторах условия баланса амплитуд и фаз выполняются не для одной, а сразу для многих частот, из которых и складываются результирующие колебания.

Простейший мультивибратор представляет собой двухкаскадный усилитель, в котором выходы и входы каскадов соединены перекрестными RC-цепями ПОС.

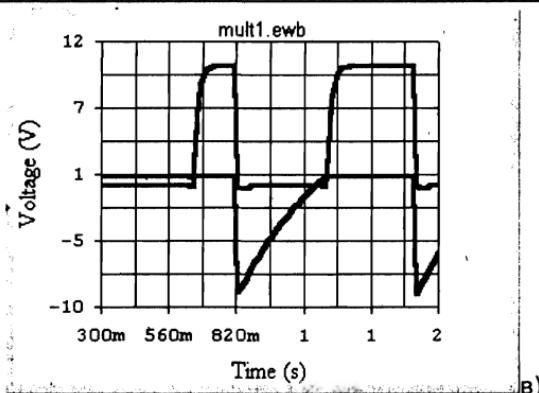
На рис. 119,а показана схема мультивибратора в программе EWB. Для исследования работы мультивибратора выполним установки моделирования в режиме Transient согласно рис. 119,б. Результат анализа показан на рис. 119,в в виде колебаний напряжения в узле 1 (верхняя кривая), т. е. на базе транзистора VT1, и узле 5 (нижняя кривая) на коллекторе транзистора VT2. Нетрудно видеть, что это типичные экспоненциальные кривые заряда и разряда конденсатора через резистор.



a)

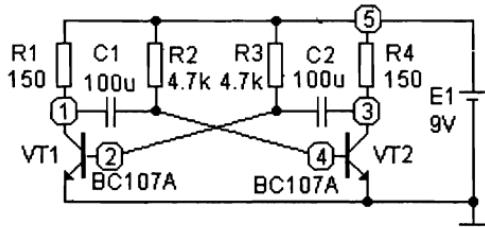


b)

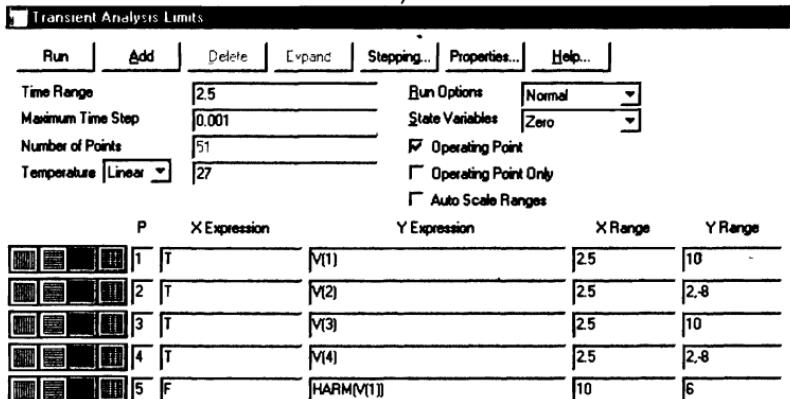


c)

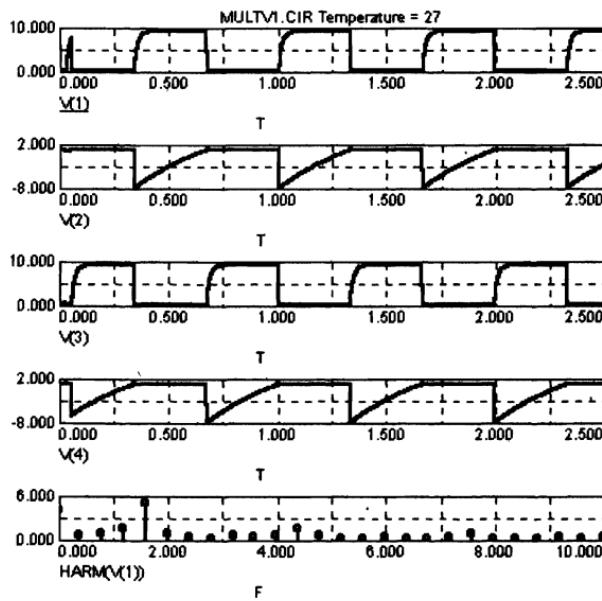
Рис.119. Мультивибратор (EWB)



a)



б)



в)

Рис. 120. Мультивибратор (МС)

Подобная же схема смоделирована в программе **MC** на рис. 120,а. Задание на моделирование представлено на рис. 120,б. Здесь надо обратить внимание на выбранный шаг по времени (Maximum Time Step) 0,001 s и последнюю строку для гармонического анализа напряжения на коллекторе транзистора VT1: HARM(V(1)). Осцилограммы в узлах 1–4 и амплитудный спектр в полосе частот 0 – 10 Гц показаны на рис. 121,в.

Совет Страйтесь подобрать временной шаг и отрезок наблюдения, а также масштабы по оси ординат так, чтобы выявлялись характерные колебательные процессы. Установки в обеих программах по умолчанию или в авторежиме могут быть не самыми удачными, а иногда и совсем не удачными.

Практические схемы

Развитие различных средств беспроводной связи (пейджинговой, сотовой и т. п.) не сняло потребности в средствах общения в виде традиционной личной радиосвязи. В США, начиная с 1958 г., для гражданской радиосвязи был открыт диапазон 27 МГц, названный по-английски CB (Си-Би) от Citizen Band (гражданский поддиапазон). В России соответствующее решение опоздало на 30 лет. Теперь наши граждане тоже могут свободно приобретать трансиверы (приемопередатчики) Си-Би и пользоваться ими, ну а радиолюбители заняться их совершенствованием, конструированием и изготовлением.

В отличие от этих реальных устройств на виртуальные в принципе не было, да и не может быть никаких ограничений. Отдавая дань научной фантастике отметим, что здесь полностью открыт простор для самой буйной фантазии, вплоть до собственной телерадиопортации (перемещение материальных объектов посредством радиоволн). Этот неосуществленный акт не нарушает, кстати, закона сохранения вещества и энергии, так как в полном соответствии с теорией относительности, например, часть вещества батарей, питающих передающую сигнал радиостанцию переходит с радиоволнами в приемную станцию... К сожалению, эта часть ничтожна и форма организации материи при этом утрачивается. Да и вряд ли было бы разумным трансформироваться для такого путешествия сначала в источники питания!

Увы, по виртуальному устройству нельзя даже послать сообщение своему реальному другу. Зато сделать самому радиостанцию – это как бы пройти путь первооткрывателей радио. Приемник

на первых порах можно использовать и стандартный. Вначале посмотрим на эту диковинку изнутри.

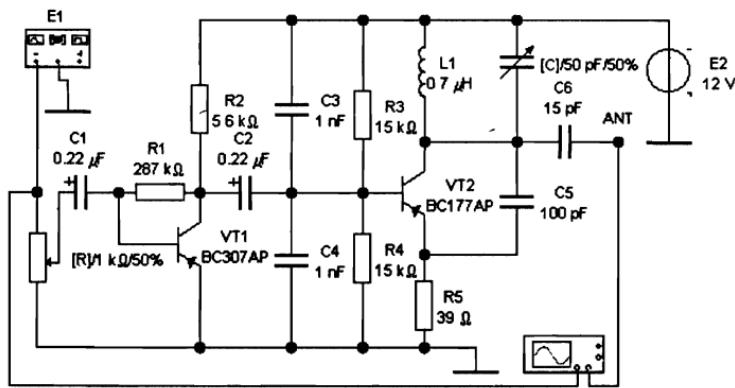
В наборах КИТ радиопередатчики Си-Би встречаются весьма часто. Схема одного из вариантов показана в программе **EWB** на рис. 121,а и на рис. 122,а в программе **MC**. Передатчик состоит из двух каскадов, собранных на биполярных транзисторах. Реальный источник входного сигнала (микрофон) в схемной модели заменен генератором прямоугольных импульсов E1. Первый каскад, выполненный на транзисторе VT1, является предварительным усилителем этого модулирующего сигнала. Второй – на транзисторе VT2 – является LC-генератором колебаний высокой (несущей) частоты, равной 27 МГц. Установки генераторов E1 показаны соответственно на рис. 121,б и 122,б.

Колебания на несущей частоте без модуляции в программе **EWB**, полученные в режиме Transient, представлены на рис. 121,в. Картина модулирующих прямоугольных импульсов и колебания на антенном выводе даны на экране осциллографа (см. рис. 121,г).

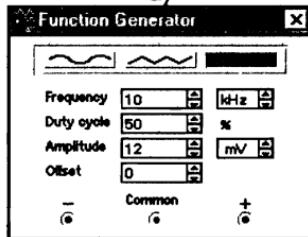
Аналогично, в программе **MC** на рис. 122,в в режиме Transient показаны осциллограммы модулирующих и промодулированных колебаний. Здесь, в связи с особенностями работы программы, узел 9, являющийся антенным (ANT), заземлен через высокоомный резистор R6, отсутствующий в реальном передатчике.

Если собрать такой реальный передатчик, то согласно приложенным инструкциям, он имеет выходную мощность до 6 Вт. Это может при четверть длинноволновом излучающем антенном диполе и чувствительности УКВ-приемника 10 мкВ обеспечить дальность устойчивой связи около 100 м (лиха беда начало!).

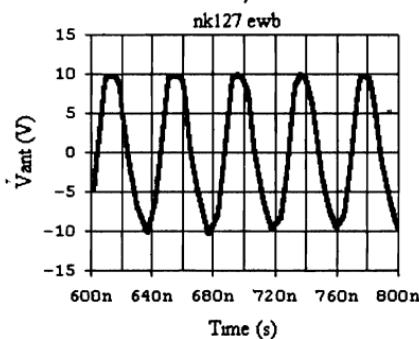
Другим реальным устройством, в котором использован генератор, но типа мультивибратора, является светодиодный проблесковый маячок. Схема маячка в программе **EWB** показана на рис. 123. В коллекторных цепях транзисторов VT1 и VT2 включены светодиоды LED1 и LED2 (LED – аббревиатура от английского названия светоизлучающего диода «Light Emitted Diode»). При включении устройства генерируются противофазные колебания коллекторных токов транзисторов. В результате светодиоды попеременно вспыхивают с частотой, зависящей от параметров RC-цепей. В программе **EWB** после включения моделирования можно наблюдать, как за счет встроенной анимации периодически меняется вид стрелок на экране. Изменяя величину резистора [R], можно в некоторых пределах регулировать частоту следования вспышек.



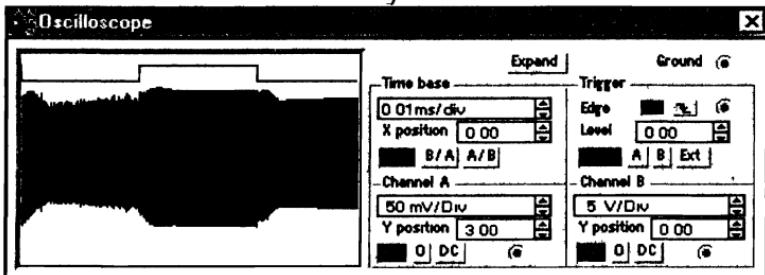
a)



б)

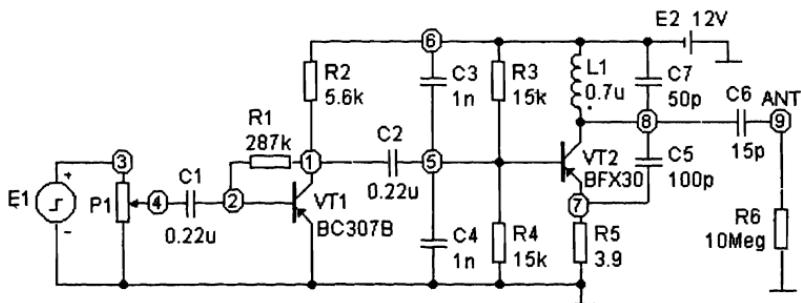


в)



г)

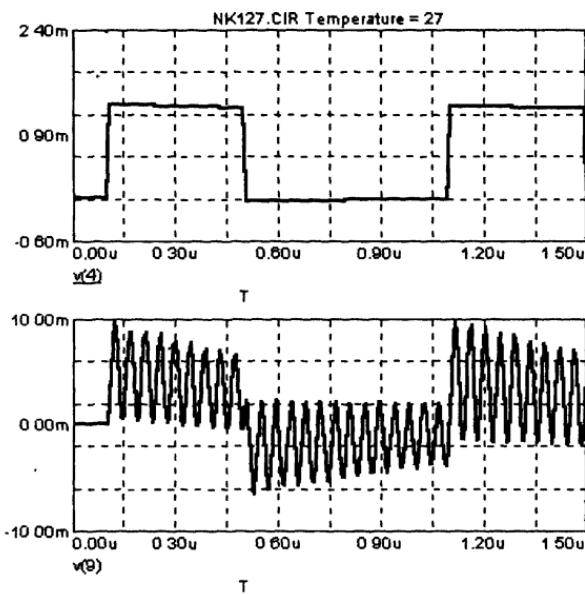
Рис. 121. Радиопередатчик на 27 МГц КИТ NK 127 (EWB)



a)

VZERO [0]	VONE [10M]	P1 [100N]
P2 [110N]	P3 [500N]	P4 [510N]
P5 [1U]		

б)



в)

Рис. 122. Радиопередатчик на 27 МГц КИТ NK 127 (МС)

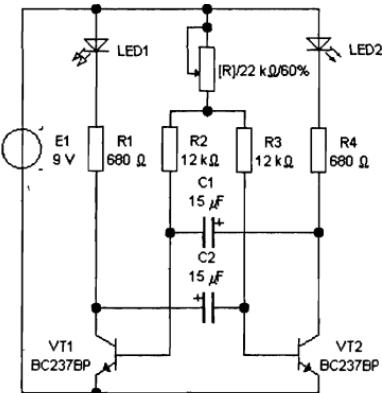


Рис. 123. Светодиодный проблесковый маячок КИТ NK024 (EWB)

4.4. Усилители постоянного тока

Казалось бы, что в сигналах всегда должна быть переменная составляющая, несущая ту или иную информацию, и обрабатывать постоянные напряжения и токи вообще не требуется. Однако это не совсем так. Для того чтобы разобраться в этом, попробуем решить одну практическую задачу.

Проектирование электронного термометра

Постановка задачи.

Необходимо разработать термометр для духовки (жарочного шкафа) бытовой плиты, показывающий температуру с погрешностью ± 5 градусов в диапазоне $0\ldots 500^{\circ}\text{C}$ и обладающий электрическим выходом для возможного последующего подключения к системе автоматики.

Выбор варианта.

(Нетерпеливые читатели могут пропустить этот раздел; те же, кто хочет поразмыслить самостоятельно, могут закрыть книгу, найти свое решение, а затем прочитать аргументацию автора).

Во-первых, необходимо преобразовать температуру воздуха внутри духовки в зависящий от нее (желательно линейно) электрический сигнал. В простейшем случае при таких температурах первичным термоэлектрическим преобразователем (на техническом жargonе – «датчиком» температуры) является термопара.

Термопара представляет собой «спай» двух разнородных металлов: железо-константан, железо-медь и т. п. В «спае» возника-

ет термоэдс, величина которой тем больше, чем больше температура. Пусть для выбранной термопары изменению температуры на 1 градус соответствует изменение термо-ЭДС на 0,04 мВ, тогда изменению на 500 градусов будет соответствовать 20 мВ.

Таким образом, поставленная задача сводится к подбору подходящего вольтметра и тарировке изготовленного устройства. (Вопросы изготовления и размещения термопары здесь не рассматриваются.)

Во-вторых, надо измерить малое изменение постоянного напряжения. Конкретно, для данной задачи, термометр должен иметь 50 делений по 10 градусов (удвоенная абсолютная погрешность), что с учетом измеряемой термоэдс может выполнить вольтметр с диапазоном 20 мВ и 50 делениями с ценой по 0,4 мВ. Оказывается, что простыми средствами здесь не обойдешься. Действительно, простейшие переносные мультиметры (тестеры) имеют такие типичные диапазоны измерения: аналоговый – 10 В, а цифровой – 200 мВ. «Цифровик» можно было бы использовать, если к нему подключить не одну термопару, а термобатарею из 10 последовательно соединенных термопар. Так их еще надо сделать! Вряд ли этоrationально.

Таким образом, необходимо усилить сигнал с термопары. Обычный усилитель, используемый в аудио аппаратуре, здесь также не подойдет (если только не провести предварительного периодического прерывания сигнала – импульсную модуляцию). Проверим наши рассуждения моделированием.

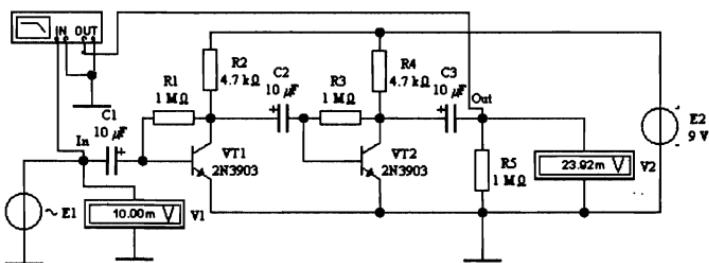
Моделирование работы усилителя переменного тока с входом сигнала от термопары

Попробуем вначале использовать стандартный двухкаскадный транзисторный усилитель. Воспользуемся схемой усилителя в программе EWB, показанной на рис. 105. Термопару в моделирующей схеме можно представить в виде подключенного к входу усилителя идеального источника постоянного напряжения, ЭДС которого является линейной функцией температуры.

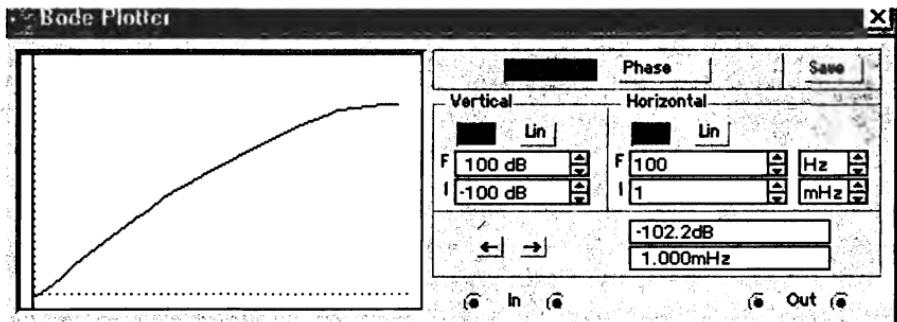
Посмотрим, как ведет себя усилитель при приближении частоты входного сигнала к нулю, т. е. к постоянному напряжению, моделирующему сигнал термопары. Для этого используем источник переменного напряжения E1 (рис. 124,а) с действующим значением напряжения $V1=10$ мВ и, начиная со 100 Гц, будем уменьшать в 10 раз частоту сигнала и фиксировать показания вольтметра V2, подключенного к выходу усилителя. Оба вольтметра должны быть переключены на измерения переменного напряжения (AC). Вначале показания вольтметра V2 существенно меняться не будут

(надо только выждать некоторое время для установления показаний и не забывать производить перезапуск моделирования), но, пройдя «герцовый» диапазон, мы заметим, что начнется резкий спад выходного сигнала. Если вначале при 10 мВ на входе напряжение на выходе равно около 3,3 В, то при 0,1 Гц оно составляет всего лишь 24 мВ (чтобы получить эти показания надо не прерывать режима моделирования почти 6 мин). При частоте 0,001 Гц на выходе фиксируются микровольты.

Этот характерный срез АЧХ в инфразвуковой области частот можно также зафиксировать на Боде-плоттере (см. рис. 124,б). Здесь наглядно видно как усилитель ослабляет входной сигнал и превращается в аттенюатор.



a)



b)

Рис. 124. Моделирование работы усилителя на низких частотах

Ну и, наконец, как бы включим термопару. Для этого вместо источника переменного напряжения подключим к входу усилителя идеальный источник постоянного напряжения с ЭДС, равной 10 мВ. После окончания переходного процесса включения усилителя на вольтметре V2 устанавливается 0,001 мкВ, при смене рода измеряемого напряжения на постоянное (DC) показания становят-

ся равными 0,000 мкВ. Как и следовало ожидать, УЗЧ не работает на постоянном токе. Достаточно посмотреть на схему усилителя, чтобы увидеть, что сигнал передается от источника к выходу проходя через разделительные конденсаторы С1, С2, С3. Реактивное емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте и, при переходе к частоте равной 0 (постоянному напряжению), становится равным бесконечности. Еще раз посмотрим на схему рис. 124,а. Мысленно представим себе вместо конденсаторов как бы мостики над ущельями для сигнала переменного напряжения звуковых частот. По мере уменьшения частоты наши воображаемые мостики сужаются. И вот, частота равна нулю – мостиков нет: они рухнули, зияют пропасти! Надо переходить к другой конструкции.

Схемотехника усилителей постоянного тока (УПТ)

На первый взгляд может показаться, что достаточно заменить в схеме усилителя конденсаторы проводниками и все будет в порядке. Увы, не тут то было. Проделав подобную операцию со схемой УЗЧ и проведя моделирование, мы быстро придем к обескураживающему результату: усилитель вообще не работает ни на каких частотах, включая 0.

Различные схемотехнические решения возникшей проблемы известны. Вот одно из них – двухкаскадный усилитель постоянного тока в программе EWB (рис. 125). Для того чтобы задать необходимые режимы работы транзисторов пришлось использовать два раздельных и разнополярных источника питания $V_{cc} = +9$ В и $V_{ee} = -9$ В. (Подстрочные индексы в этих обозначениях соответствуют международным стандартам и взяты из начальных букв английских слов collector и emitter.) Кроме того, пришлось использовать комплементарные транзисторы (VT1 *n-p-n* типа, а VT2 *p-n-p* типа). Такова цена за удаленные конденсаторы, но нет, худа без добра. При интегральной технологии изготовления микросхем выполнить конденсаторы с емкостью больше десятка пикофарад становится проблематично. Кроме того, на инфразионных частотах конденсаторы приводят к фазовому сдвигу сигналов, и их становится невозможным отличить от пульсаций напряжения питания.

Проведем моделирование работы УПТ. Поставив ключи 1 и 2 в положение вниз, отключим вход усилителя от источников сигнала. Активизируем переменный резистор [R] и, установив его начальное значение 250 Ом и меняя его сопротивление, произведем установку нуля на выходе (узел 11 Out) по вольтметру V при нуле на входе. Необязательно добиваться точного нуля: достаточно попадания микровольтовую область.

Далее можно подключить источник E_1 , моделирующий термопару. Вольтметр на выходе надо установить на «DC» и перезапустить кнопкой «0-I» моделирование. Показания вольтметра будут порядка 1 В при 10 мВ на входе, следовательно, коэффициент усиления по напряжению составляет 100.

Дополнительно исследуем амплитудно-частотные характеристики усилителя. Ключами [1] и [2] Выключим источник E_1 и включим E_2 . Если Боде-плоттер подключен то, подав команду на моделирование, можно наблюдать АЧХ и ФЧХ на его экране. Более детальную картину характеристик можно увидеть, проведя AC Analysis (рис. 125,б). Из АЧХ (верхний график) видно, что коэффициент усиления (V_{out}/V_{in}) УПТ в диапазоне 0...100 кГц не зависит от частоты, не меняется в этом же диапазоне и фаза (Phase).

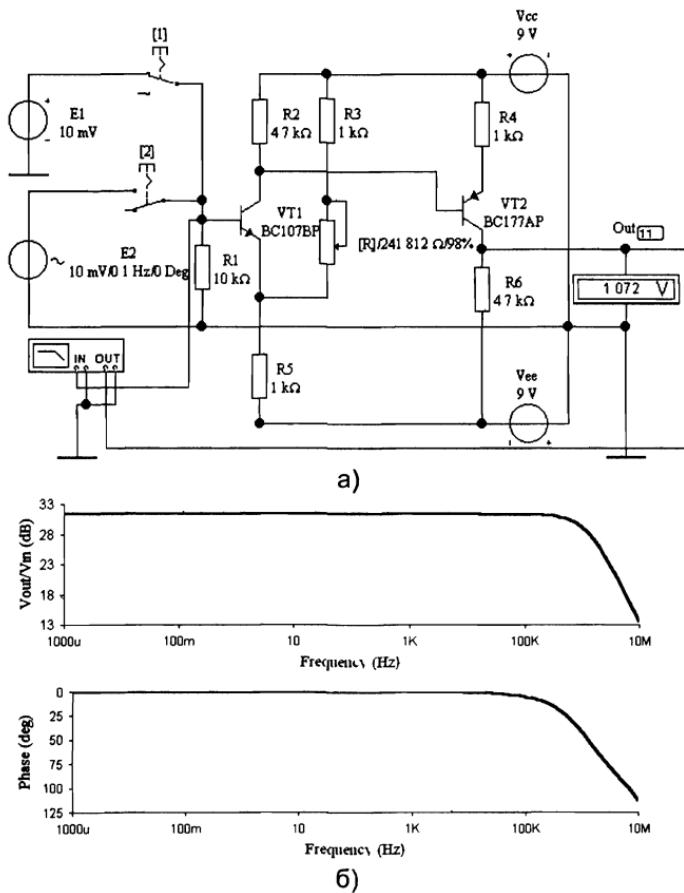


Рис. 125. Двухкаскадный усилитель постоянного тока (EWB)

Особо обратим внимание на то, что АЧХ начинается с 0 (на графике со $1000 \text{ uHz} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}$), т. е., в пределах ошибок, с постоянного напряжения. В этом собственно и заключено основное различие усилителей постоянных и переменных токов.

В принципе задачу с термопарой можно считать решенной, теперь, добавляя подобные усилительные каскады, можно подстроиться под любой измерительный прибор.

Однако на практике, особенно при более точных измерениях, сталкиваются с так называемым «дрейфом нуля». В реальном усилителе, обладающем большим коэффициентом усиления, можно наблюдать, как после установки нуля при нулевом сигнале на входе показания медленно увеличиваются («плывут», «дрейфуют») совершая одновременно колебания по случайному закону. Дело в том, что изменения теплового режима элементов во входных цепях, а также источников питания воспринимаются УПТ как сигнал, который им усиливается. «Дрейф нуля» перепортил много крови инженерам и ученым. В данной программе моделирования он не учитывается, что еще раз показывает принципиальную ограниченность любого моделирования, необходимость экспериментальной проверки и вдумчивого отношения к получаемым результатам и в том и в другом случае. (Впрочем, особо любознательные читатели могут дополнительно провести исследования поведения модели при различных температурах.)

Кардинальные сдвиги проблем УПТ были достигнуты разработкой дифференциальных схем со специальными стабилизаторами и переходом к интегральной технологии.

5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Стали все подходить и смотреть: блоха действительно была на все ноги подкована на настоящие подковы, а левша доложил, что и это еще не все удивительное. — Если бы, — говорит лучше мелкоскоп, который в пять миллионов увеличивает, так вы изволили бы — говорит, — увидать, что на каждой подковинке мастерово имя выставлено: какой русский мастер ту подковку делал.

Н.С. Лесков. Левша

5.1. Операционные усилители

Всего лишь два-три десятка лет тому назад практически на равных существовали два вида электронных вычислительных машин: аналоговые (АВМ) и цифровые (ЦВМ). Для решения особо сложных задач создавались гибридные вычислительные комплексы из АВМ и ЦВМ.

В отличие от цифровой машины в аналоговой для выполнения каждой математической операции существовал свой специализированный операционный блок: сумматор, перемножитель, интегратор и т. д. Число таких блоков в одной машине доходило до нескольких сотен. Основу операционного блока составлял сначала ламповый, а потом транзисторный усилитель, получивший название операционного. Операционный усилитель (сокращенно – ОУ) на английском языке называется Operational Amplifier (сокращенно – Op Amp), а радиолюбители ласково окрестили его как «операционник». Поскольку в математических операциях встречаются не только переменные величины, но и константы, представляющие на языке сигналов постоянные напряжения и токи, то ОУ принципиально должен быть усилителем постоянного тока. Значит, его АЧХ должна начинаться с нуля и быть равномерной в широкой полосе частот. Стабильность работы ОУ должна быть очень высокой, иначе не минуемы ошибки и сбои. Существенный прорыв в улучшении характеристик ОУ и других устройств был достигнут в микросхемотехнике при использовании интегральных технологий.

Создание интегральной микросхемы

Двухметровый уроженец Канзаса Джек Килби был тихим, замкнутым человеком. В свое время он не добрал на вступительных экзаменах по математике трех баллов и не смог поступить в Массачусетский технологический институт. Позже он поступил в Иллинойский университет и, окончив его, 10 лет проработал в малоизвестной фирме, выпускавшей радио и телевизионные детали.

В мае 1958 г. ему представилась счастливая возможность перейти в знаменитую фирму «Texas Instruments». Здесь в то время выполнялся военный заказ по миниатюризации электронных схем на основе микромодулей: электронные элементы печатались на тончайших керамических пластинках, которые затем спаивали в виде стопки, получая нужную схему. В июле сотрудники компании отправились в двухнедельный летний отпуск. Килби же, как новичку, отпуск еще не полагался. Он остался в лаборатории практически один и вынужден был выполнять сам почти все технологические операции. Сняв по лаборатории от резака к вакуумному посту, от него к микроскопу, от микроскопа к рабочему столу, Килби упорно спаивал стопки пластинок, но работа не клеилась: ему явно не хватало навыков по операциям, в которых набили руку его отдыхавшие коллеги. И тогда его буквально осенило: «Ведь резисторы и конденсаторы можно не только делать порознь из того же полупроводникового материала, что и транзисторы, но и изготавливать все компоненты одновременно, на одной и той же полупроводниковой пластине». Это был путь к интегральной технологии.

По прошествии несколько месяцев он убедил в правильности своей идеи скептически настроенного шефа, изготовив первый грубый опытный образец.

Первая в мире интегральная схема (от латинского «integer» – цельный, неразрывно связанный, единый) еще не отличалась особым изяществом. Она представляла собой сантиметровую германьевую пластинку, на которой размещались всего пять компонентов. Отдельные части схемы были изолированы друг от друга благодаря своей форме в виде букв U, L и т. п. Крошечные проволочки, соединяющие компоненты схемы друг с другом и с источником питания, просто припаивались. Вся конструкция скреплялась воском в лучшем духе сургучно-веревочной техники физического эксперимента времен Майкла Фарадея. Тем не менее, схема работала. Фирма сообщила о рождении принципиально нового устройства в январе 1959 г. Для демонстрации потенциальных возможностей новой технологии, компания построила на ее основе компьютер для BBC США.

Прошло более 40 лет, и вот в 2000 году Джек Килби вместе с Хербертом Кроемером и Российским ученым Жоресом Алферовым были номинированы на Нобелевскую премию по физике за работы «по получению полупроводниковых структур, которые могут быть использованы для сверхбыстрых компьютеров».

По функциональному назначению различают интегральные микросхемы (ИМС) аналоговые и цифровые. Существуют и смешанные микросхемы, такие, как аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, таймер серии 555 и др. В классе аналоговых ИМС (АИС) выделяют микросхемы с линейными характеристиками – линейные микросхемы (ЛИС), к которым и относятся микросхемы ОУ.

Широкое распространение интегральных монолитных ОУ началось с выпуска в 1964 г. фирмой «Fairchild» первого крупносерийного ОУ типа μ A702 (аналог – К140УД1); здесь символ μ происходит от микро, А от Amplifier. В 1965 г. появился знаменитый ОУ типа μ A709 (аналог – К153УД3). Это была настолько удачная микросхема, что ее ежегодный выпуск достиг 30 млн. Все последующие микросхемы ОУ в той или иной степени генетически несут ее черты. Не случайно ее прозвали дедушкой (granddaddy) операционных усилителей! Стандарт следующего поколения определил ОУ типа μ A741. Ниже будут приведены некоторые классические схемы интегральных ОУ. Аналоговые микросхемы выпускают, как правило, функционально незавершенными, что открывает широкий простор для радиолюбительского творчества.

Микросхемотехника ОУ

Различные типы ОУ имеют как различные схемотехнические особенности, например использование защиты по напряжению входных цепей и по току выходных, так и применение разнообразных специальных интегральных компонент. В тоже время, независимо от сложности принципиальной схемы интегральный ОУ состоит из ряда общих функциональных частей: входного дифференциального УПТ, усилителя напряжения, схемы сдвига постоянного уровня напряжения и выходного усилителя мощности.

Входной каскад, во многом определяющий работу ОУ, выполняется по дифференциальной схеме (см. рис. 126). Здесь выходной сигнал, снимаемый между коллекторами транзисторов ($U_{out} = V_{c2} - V_{c1}$), пропорционален разности двух входных сигналов, подаваемых на их базы: $U_{out} = K^*(V_{in1} - V_{in2})$. Последнее выражение справедливо, если коэффициент усиления по напряжению K одинаков для обоих входов. Само название подобных каскадов

(или усилителей) происходит от латинского слова «differentia», означающего разность.

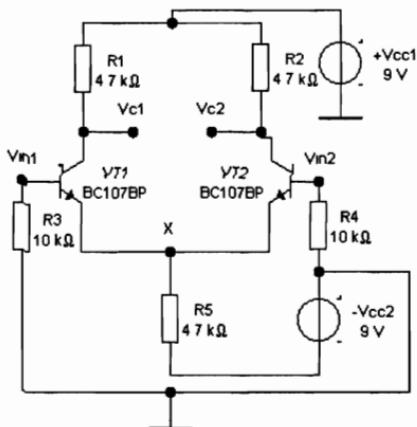
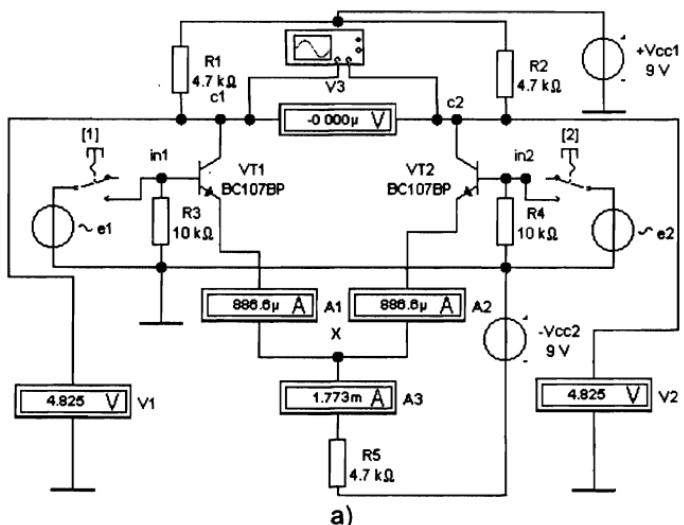


Рис. 126. Дифференциальный усилитель постоянного тока (EWB)

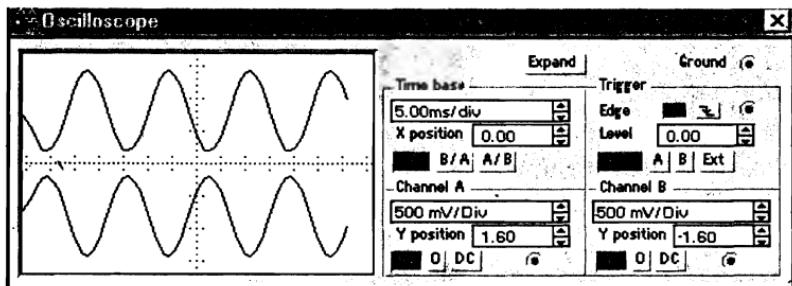
Конфигурация приведенной схемы (см. рис. 126) содержит внутри себя мост, к одной из диагоналей которого и подключается нагрузка. При тщательном подборе идентичных компонентов (транзисторов и резисторов) и условий их работы, схема будет сбалансирована и влияние вышеперечисленных дестабилизирующих факторов сведено к минимуму. Отсюда происходит другое название подобных усилителей – балансные. В многокаскадных усилителях отдельный каскад, собранный по подобной схеме, называют дифференциальным каскадом (ДК).

Для исследования ДК в программе EWB дополним схему измерительными приборами и источниками сигналов (см. рис. 127, а). При отсутствии сигналов на входах (ключи [1] и [2] разомкнуты) схема сбалансирована и выходное дифференциальное напряжение U_{out} , регистрируемое вольтметром V_3 равно нулю.

Установив, например, на источнике сигнала e_1 напряжение 10 mV, частоту 60 Hz и фазу 0 Deg, замкнув ключ [1] и включив моделирование, получим осциллограммы сигналов на выходах c_1 и c_2 (см. рис. 127, б). Задавая различные сигналы на входы in_1 и in_2 , и изменяя соответственно установки электроизмерительных приборов и осциллографа, можно провести детальные исследования поведения ДК, в том числе по отношению к синфазным и дифференциальным сигналам.



a)



b)

Рис. 127. Исследование дифференциального каскада (EWB)

Работа ДК во многом зависит от стабилизации суммарного тока складывающегося в узле X и протекающего через резистор R_5 , изменение параметров которого под действием температуры может привести к уходу рабочей точки транзисторов. Поэтому в реальных устройствах используют те или иные генераторы стабильного тока (ГСТ). Схема одного из распространенных вариантов ГСТ на биполярном транзисторе показана в программе EWB на рис. 128. В стабилизаторе использован стандартный каскад с ОЭ и ООС по току. В цепи базы использован высокоомный делитель напряжения с диодом VD_1 , обеспечивающим необходимую температурную компенсацию. Работу стабилизатора можно проанализировать, изменения величину резистора $[R]$. Токи, протекающие через коллектор и резистор R_2 , пропорциональны друг другу, что послужило основанием называть данную схему токовым зеркалом.

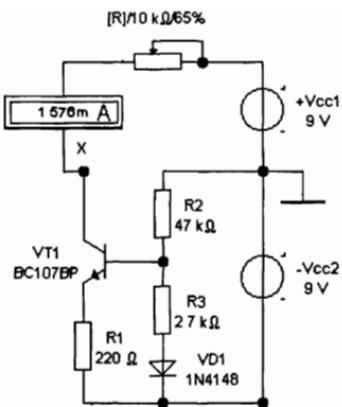


Рис. 128. Генератор стабильного тока (EWB)

В интегральных микросхемах вместо диода, как правило, используют транзистор в диодном включении. Кроме того, при использовании ДК в многокаскадных усилителях обычно используют несимметричный выход с коллектора второго транзистора. Скопировав в программе **EWB** схемы, показанные на рис. 127 и рис. 128, на новый лист и введя соответствующие изменения, получим подобный входной каскад усилителя (см. рис. 129).

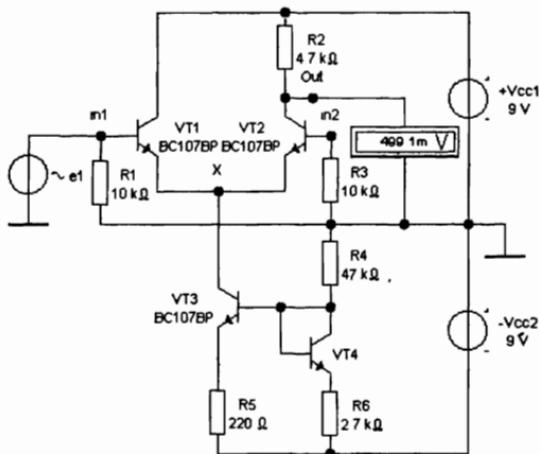
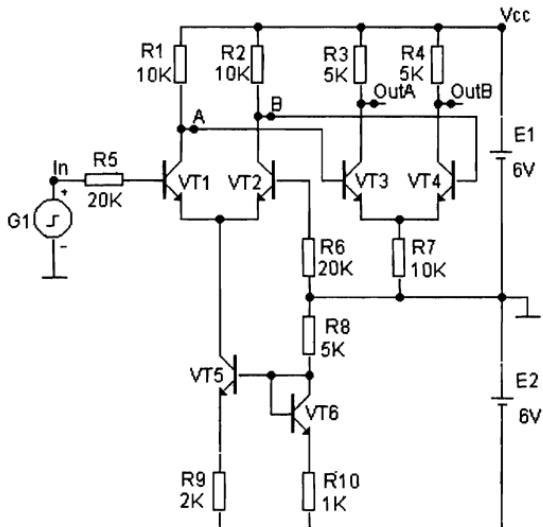
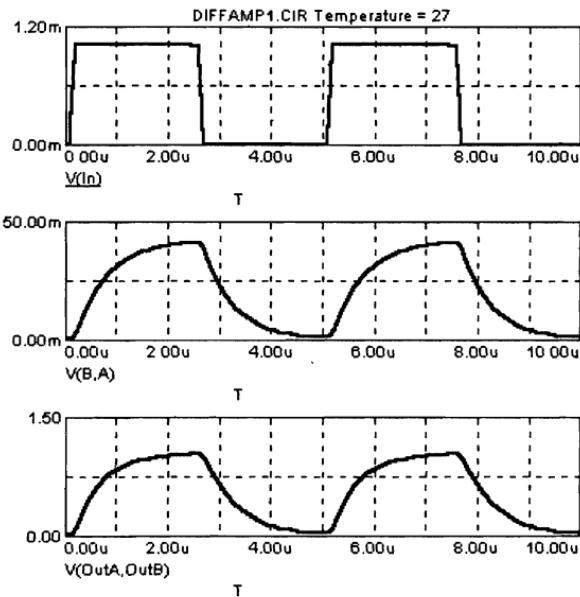


Рис. 129. Дифференциальный каскад со стабилизатором тока (EWB)

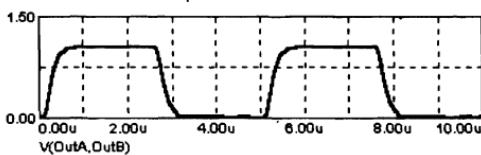
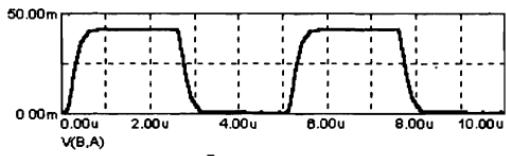
Вариант схемы двухкаскадного дифференциального усилителя постоянного тока в программе **MC** показан на рис.130,а. Здесь имеется два ДК, причем в первом выполнена стабилизация тока.



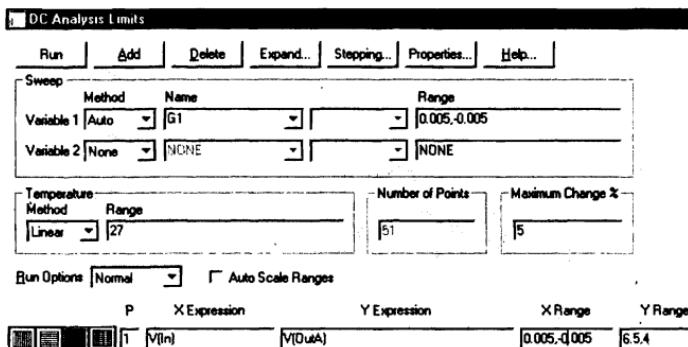
a)



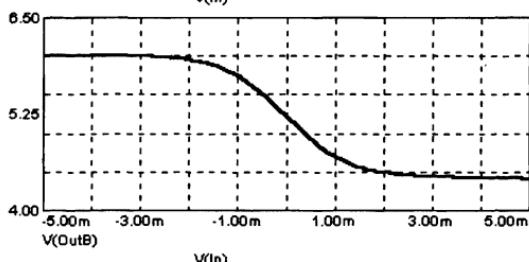
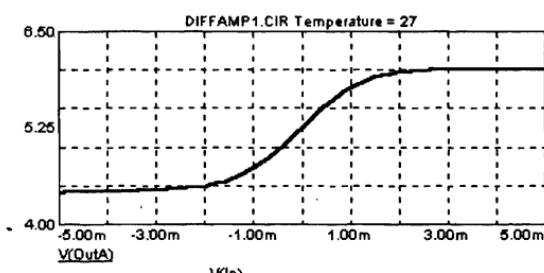
b)



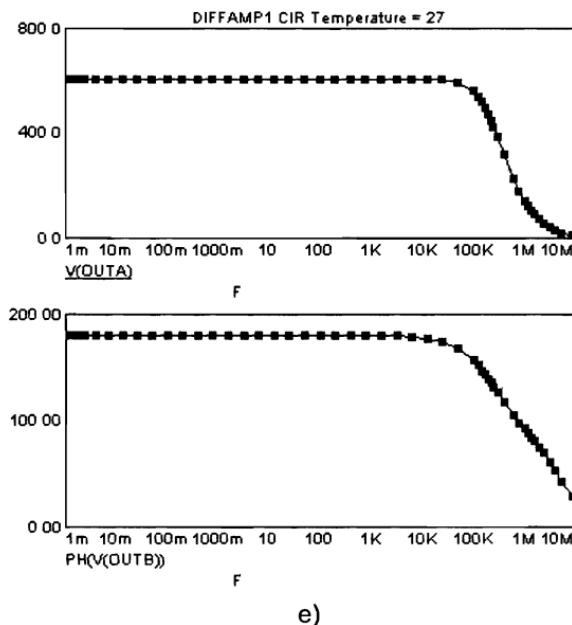
B)



Г)



Д)



e)

Рис.130. Двухкаскадный дифференциальный УПТ (МС)

Транзисторы VT1 – VT4 имеют модель:

.MODEL N1 NPN (BF=250 CJC=0.8P CJE=1.8P TF=.5N TR=1N).

Соответственно, транзисторы VT5 и VT6 имеют модель:

.MODEL N2 NPN (BF=50 CJC=1P CJE=2P TF=1N TR=6N).

Работа усилителя иллюстрируется в динамике путем подачи на его вход (In) последовательности прямоугольных импульсов от генератора (G), заданного моделью:

.MODEL G1 PUL (VONE=0.001 P2=.2U P3=2.6U P4=2.7U P5=5U).

Приведенные модели вводятся в окнах редактирования компонент или в текстовом окне.

На рис. 130,б показаны осциллограммы напряжений входного сигнала V(In), дифференциального выхода первого каскада V(B,A) и второго каскада V(OutA,OutB). Наблюдающийся экспоненциальный подъем и спад импульсов на выходах усилителя объясняется частотными характеристиками использованных моделей транзисторов. На рис. 130,в показаны осциллограммы с моделью транзисторов N1, в которой в десять раз уменьшена емкость коллекторного перехода (CJC = 0.08 P).

Дополнительно получим передаточную характеристику усилителя, как зависимость напряжения выходного сигнала от входного. Войдя в режим анализа на постоянном токе (DC) и выполнив ус-

тановки в соответствии с рис. 130,г, получим результат на выходах OUTA и OUTB (см. рис. 130,д). Далее в режиме анализа на переменном токе (AC) получим АЧХ по выходу OUTA и изменение фазы на выходе OUTB.

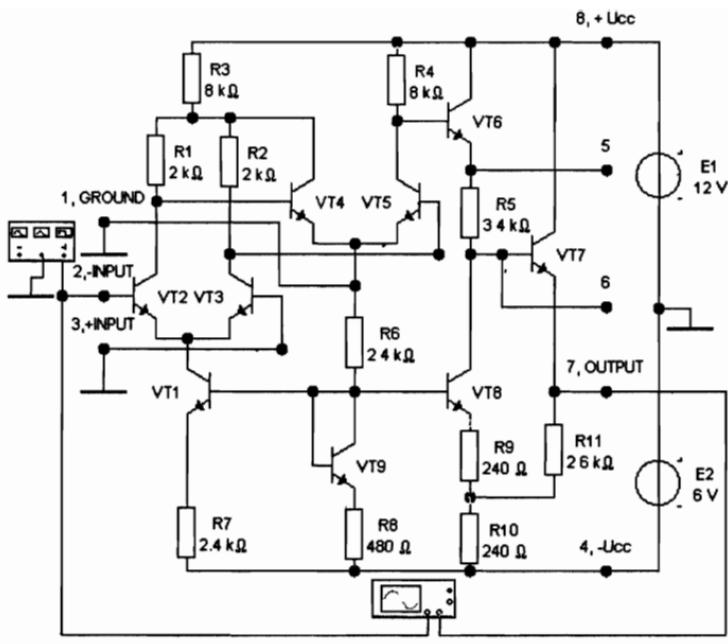
В отличие от дифференциального усилителя операционный, наряду с двумя дифференциальными входами, имеет один несимметричный выход, потенциал которого относительно земли (или некоторой общей точки схемы) при отсутствии сигнала близок к нулю. Кроме того, в ОУ выходной сигнал может отклониться в пределе в положительном и отрицательном направлении до напряжений соответствующих источников двухполарного питания.

Эти две задачи решаются введением специальных схем сдвига уровня напряжения и выходного каскада, дополняющих дифференциальные каскады до ОУ. Примерами трехкаскадных (по основному функциональному признаку) ОУ, имеющих такую структуру, и служат первые ОУ типа μ A702 (аналог – К140 УД1) и μ A709 (аналог – К153 УД3).

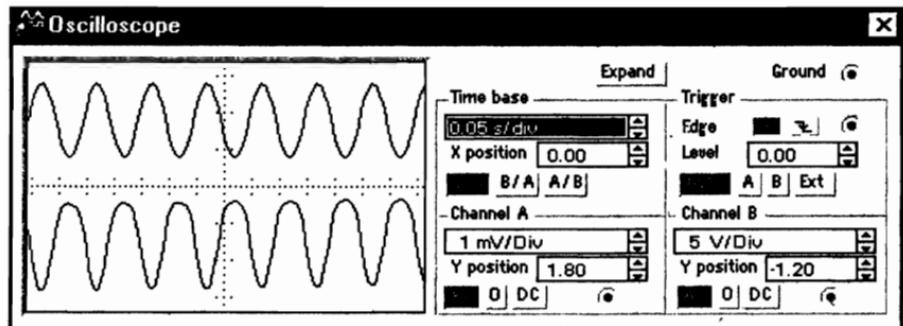
Воспроизведем в программе **EWB** схему усилителя μ A702 являющегося высокоскоростным ОУ общего применения (см. рис. 131,а). Входом служит первый ДК (на транзисторах VT2 и VT3), стабилизированный по току эмиттеров ГСТ на транзисторах VT1 и VT9; он имеет коэффициент усиления по напряжению около 8. Ток второго ДК на транзисторах VT4 и VT5 не фиксируется ГСТ и поэтому сигнал усиливается в 200–300 раз. Однако сигнал еще мал и находится в положительной области питающих напряжений. Далее собственно и следует каскад сдвига уровня напряжения в отрицательную сторону (VT6). На сигнал, выделившийся на эмиттере VT6, накладывается постоянное напряжение сдвига, формирующееся на резисторе R5. Транзистор VT8 играет роль второго ГСТ. Окончательно сигнал снимается с эмиттера VT7. Усиление в выходном каскаде около 2,5. Таким образом, номинальный коэффициент усиления данного ОУ составляет около 4000.

В рассматриваемой схемной модели ОУ были использованы модели bipolarных транзисторов типа Q2N2222A, что отличает ее от реальной микросхемы. Поэтому приводимые далее результаты моделирования носят качественный характер.

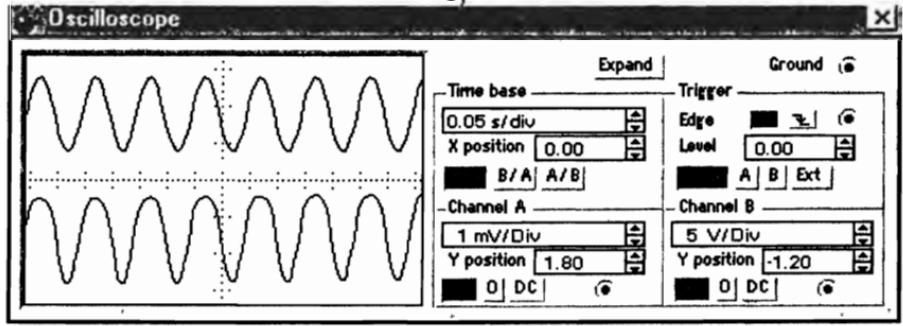
Питание данного ОУ осуществляется от двух разных источников: первый (E1) дает +12 В относительно земли, у второго (E2) заземлен «плюс» и он дает –6 В относительно земли. В результате с учетом сдвига уровня напряжения получается симметричный выходной сигнал, колеблющийся между уровнями ± 6 В.



a)



b)



c)

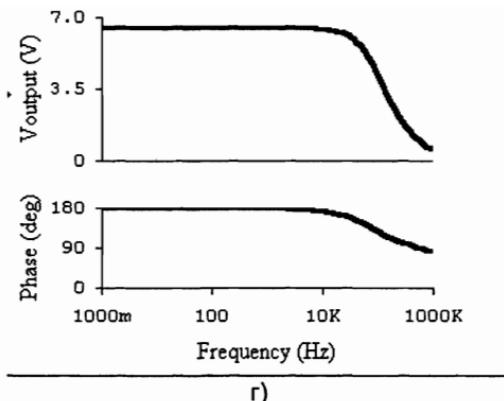
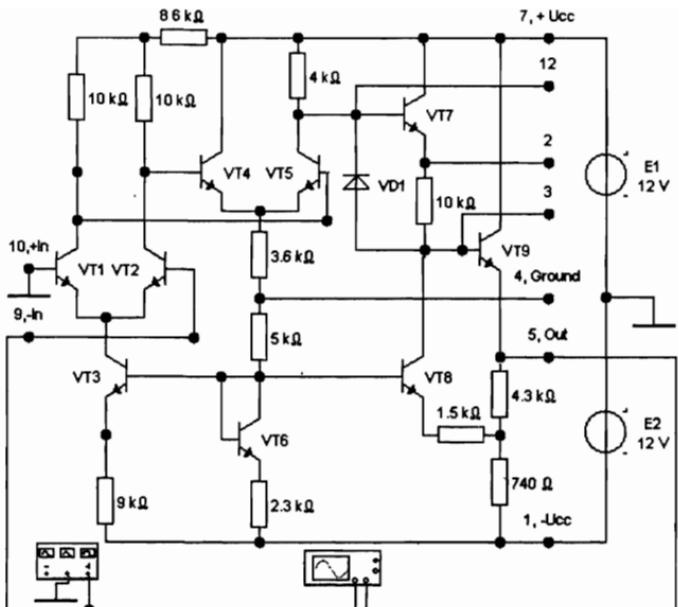


Рис. 131. Операционный усилитель типа μ A702 (**EWB**)

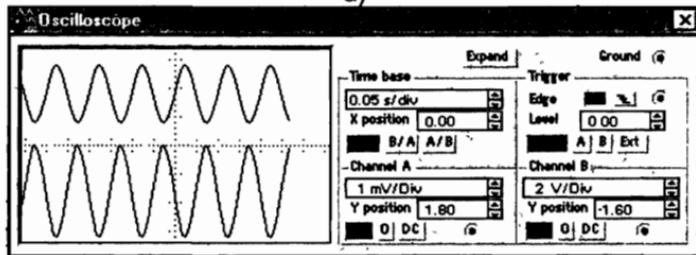
Задав на генераторе входного сигнала синусоидальные колебания с частотой 10 Гц и амплитудой 1 мВ, выполнив соответствующие установки на осциллографе и включив моделирование, получим осциллограммы (см. рис. 131,б) входного сигнала (верхняя кривая – канал А) и сигнала на выходе (нижняя кривая – канал В). Сравнивая масштабные множители по каналам (1mV/div и 5V/div) видим, что коэффициент усиления порядка 5000. Кроме того, замечаем, что колебания на выходе ОУ при подаче сигнала на вход –INPUT происходят в противофазе по отношению к входному сигналу (при этом вход +INPUT заземлен). Это стандартное включение ОУ, обеспечивающее его устойчивую работу при наличии дополнительных внешних ОС. Поэтому вход –INPUT называют инвертирующим и помечают знаком «–» или, особенно в цифровых схемах, не закрашенным кружком \circ . Если произвести переключение источника в собранной схеме на вход +INPUT, а инвертирующий вход заземлить, то колебания на выходе будут синфазны входным (см. рис. 131,в). Поэтому вход +INPUT называют не инвертирующим и отмечают знаком «+».

Некоторые усовершенствования были введены в отечественном ОУ типа К140УД1, схема которого в программе **EWB** показана на рис. 132,а. Работа этой схемы с использованием моделей идеальных транзисторов проиллюстрирована осциллограммами напряжений, из которых следует, что коэффициент усиления составляет около 3000. Питание осуществляется от источников ± 12 В.

Теперь, наконец, рассмотрим знаменитый ОУ типа μ A709, схема которого оказалась наилучшей среди трехкаскадных моделей. Это выполнить не сложно, поскольку в обеих программах есть готовые библиотечные файлы этого ОУ. Надо только иметь в виду,



a)



b)

Рис. 132. Операционный усилитель типа К140УД1 (EWB)

что в их наименовании греческая буква « μ » заменена латинской «U» или «и». Таким образом, открыв в каталоге Samples программы EWB схемный файл Ua709.ewb, увидим схему данного усилителя (см. рис. 133). На представленном рисунке она показана после небольшого графического редактирования. Для транзисторов сохранено их программное обозначение: QNL библиотечная модель биполярного транзистора N-P-N типа, а QPL соответственно P-N-P типа. Во всплывшем дополнительном окне Description (описание) указывается, что схема содержит 41 узел, 114 ветвей и 15 биполярных транзисторов. Транзисторы все на виду и их, с учетом используемых в диодном включении, действительно 15. Узлов же, в классическом по Кирхгофу понимании, только 25. В чем же дело?

Напомним, что узел в электрической цепи это место соединения ветвей. В элементарной физике узлом считается только такое место, где сходятся не менее трех ветвей. При «инвентаризации» узлов на схемных моделях надо быть очень осторожным. Здесь есть свои тонкости. Так, все пять «жирных» черных точек на верхнем проводе-линии рис. 133 представляют один и тот же узел, поскольку графические схемные межсоединения (в отличие от реальных физических) принимаются по умолчанию сверхпроводящими. В этом легко убедиться, нажав ПКМ на каждый из этих узлов, а затем во всплывающих меню, выбрав ЛКМ Component>Node, прочитаем один и тот же номер: 16. Все эти графические монтажные узлы можно свести к одному при другом начертании схемы. Например, разорвав все соединения, связанные с этими узлами, и взяв один монтажный узел сверху схемы, можно соединить в нем семь отходящих от компонентов выводов. Работа схемы при этом не изменится. Этую операцию можно выполнить в программе **MC**, допускающей не ортогональные соединения (см. рис. 33). Можно же, напротив, перечерчивая схему, так чтобы она была более «удобочитаемой» и, не изменяя связей компонент, добавить, сколько нужно подобных фиктивных узлов. Пересчитав подобным образом узлы, получим 25. В программе **MC** эта процедура выполняется автоматически по команде Node Numbers в меню Options. Результат будет таким же.

Все дело в том, что при машинных расчетах электрических цепей работают не с принципиальными, а с эквивалентными схемами замещения. В этих схемах транзистор замещается многокомпонентной моделью, а узлом считается и место соединения двух компонентов. В схемных же моделях программ **EWB** и **MC**, выводимых на экран дисплея, номерованные узлы соответствуют реальным физическим узлам в случае, когда принципиальная и эквивалентная схема совпадают. Это означает, что, имея реальное работающее электронное устройство на своем столе и компьютер с подобной схемной моделью и введя соответствие (одинаковую нумерацию) между физическими и схемными узлами, можно провести измерения в реальном устройстве, например напряжений вольтметром и сопоставить их с результатами моделирования на компьютере. В зависимости от правильности модели и точности измерений они будут иметь соответствующее совпадение. В случае использования эквивалентных схем такое соответствие будет лишь для узлов, отражающих реальные выводы компонент, например для эмиттера, базы и коллектора транзистора. Такая же коллизия возникает и для смешанных схем (см. рис. 7).

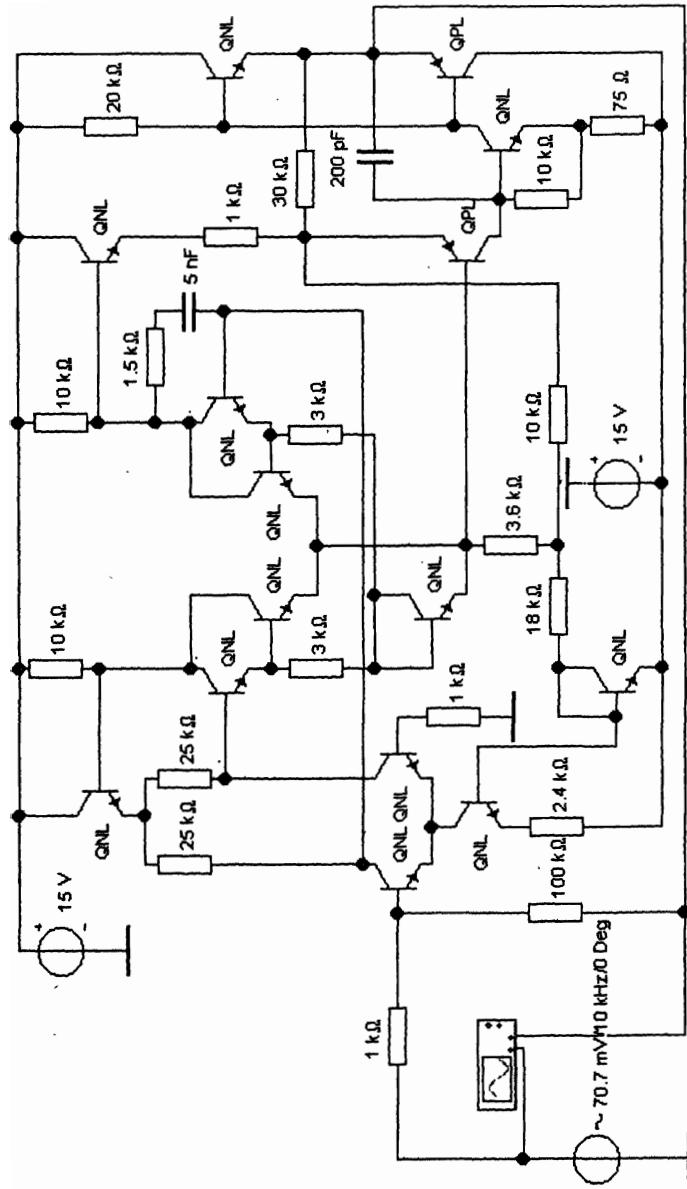


Рис. 133. Операционный усилитель μ709 (MC)

Совет

Не удивляйтесь, если нумерация узлов и компонентов, приводимые в книге и появляющиеся при другой сборке схем будут отличаться: программы производят их автоматически в зависимости от последовательности сборки и расположения компонентов.

Вернемся теперь к схемной модели (рис. 133). Открыв осциллограф и включив моделирование, получим осциллограммы напряжений на входе и выходе ОУ (рис. 134,а). Наблюдаемый на этой частоте (10 кГц) сдвиг фаз отличный от 180° связан с используемыми моделями транзисторов и корректирующими RC-цепями. Конденсаторы 200 пФ и 5нФ, резистор 1,5 кОм в монолитную схему не входят, а являются навесными элементами.

Войдя далее в режим анализа на переменном токе, получим АЧХ и ФЧХ (рис. 134,б), причем на последней также виден отмеченный фазовый сдвиг.

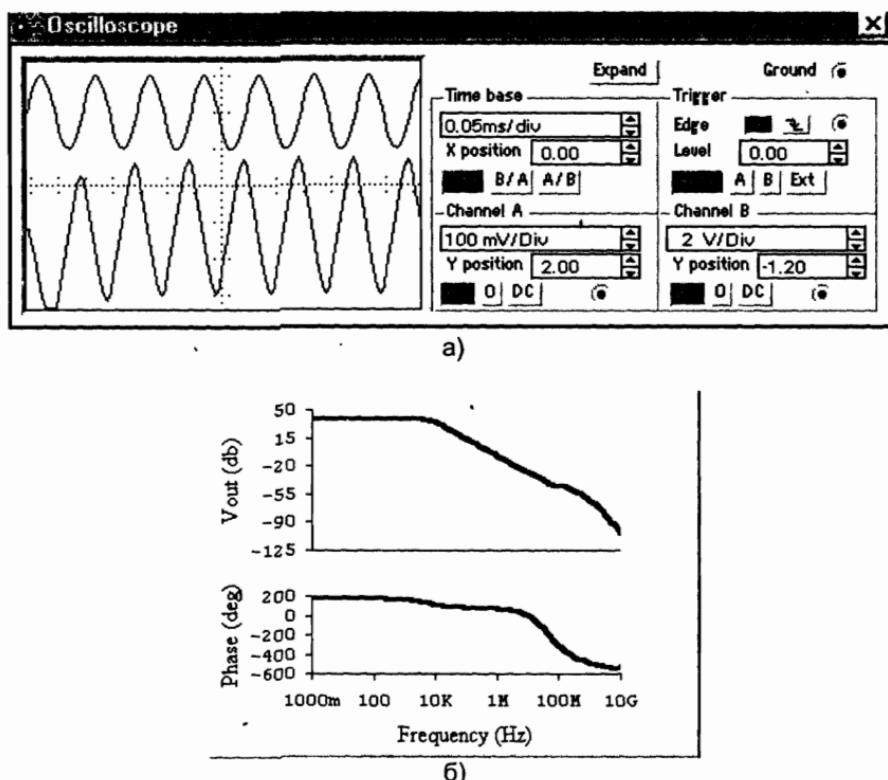


Рис. 134. АЧХ и ФЧХ операционного усилителя типа μA709 (EWB)

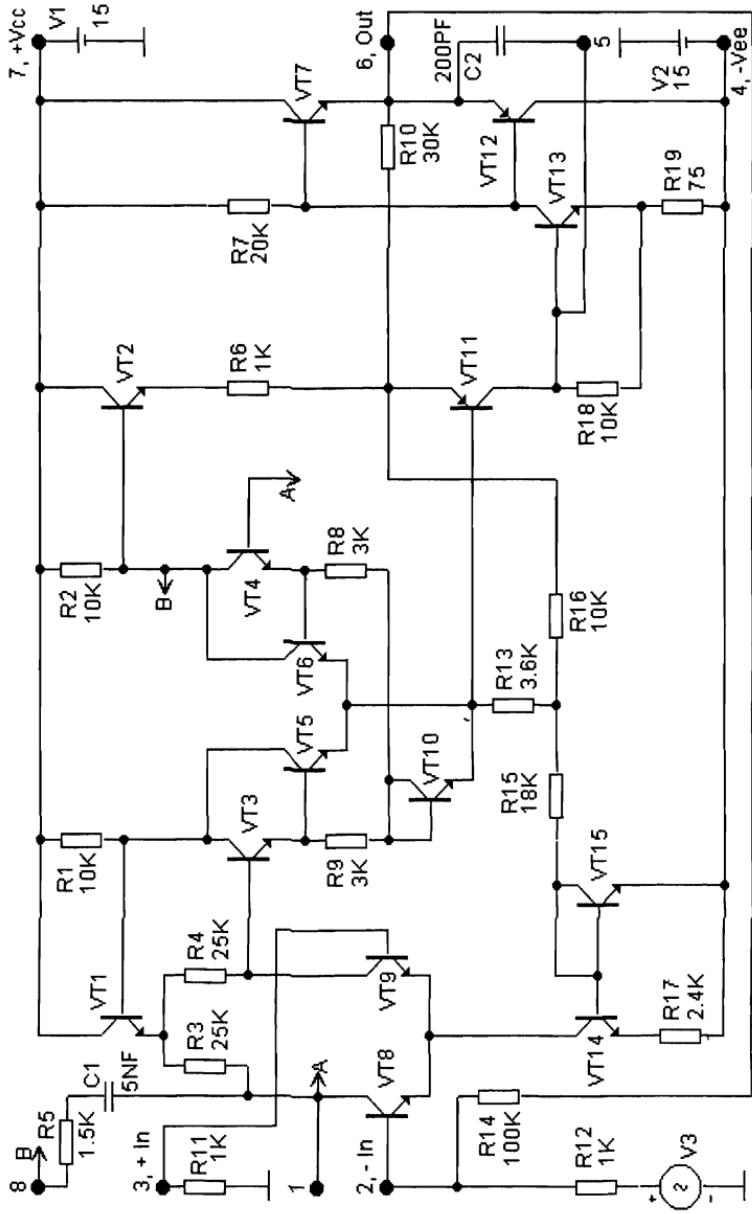
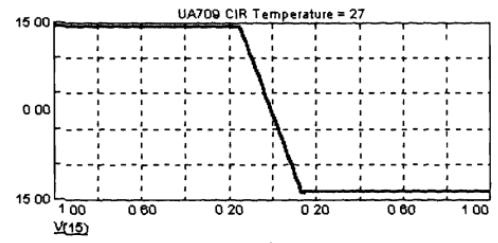
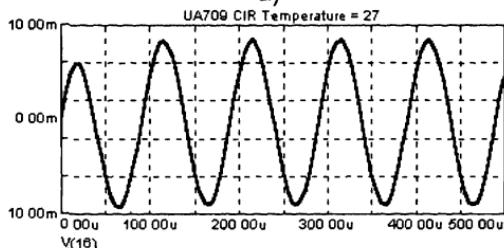


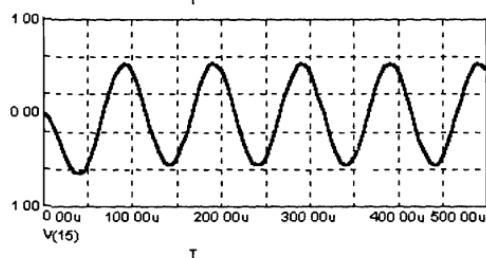
Рис. 135. Операционный усилитель типа μA709 (MC)



a)

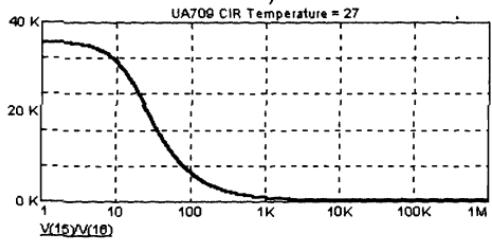


T

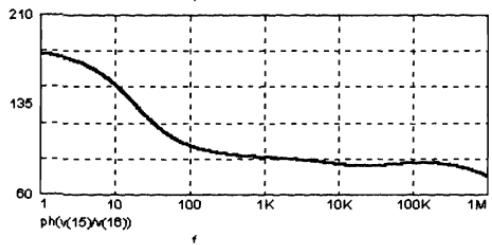


T

б)



f



f

в)

Рис. 136. Характеристики ОУ типа μ A709 (MC)

В программе **МС** в каталоге **Data** (данные) также можно открыть схемный файл UA709.CIR, содержащий схему ОУ типа μA709 (см. рис. 135). Здесь, для удобства показа выводов микросхемы, он был отредактирован. Обратите внимание на использование специального способа электрических соединений точек цепи или компонентов с помощью специального графического элемента **Tie** (соединение, перемычка). Этот схемный элемент, включенный в каком-либо месте схемы, считается соединенным с любым таким же, находящимся в другом месте экрана, если их позиционные обозначения (имена контактов) совпадают.

Элемент **Tie** находится последовательностью команд:

Component>Analogies>Primitives>Connectors>Tie.

В представленном варианте его графическое изображение было изменено с Т-образной перемычки на стандартную стрелку с буквенной индексацией. На рис. 135 использованы две пары таких стрелок-перемычек: А – А и В – В и, хотя на схеме соединительные провода между этими одноименными точками отсутствуют, программа считает их, соединенными между собой.

Проведем моделирование работы ОУ средствами программы **МС**. Сначала, получим передаточную характеристику как зависимость выходного напряжения $V(15)$ от входного $V(16)$, проведя анализ на постоянном токе (рис. 136,а). Здесь при редактировании схемы была изменена нумерация узлов: в стандартном файле они соответственно имели номера 25 и 26. Далее, в режиме анализа переходных процессов получим осциллограммы входного и выходного напряжений (рис. 136,б). И, наконец, в режиме анализа на переменном токе получим АЧХ и ФЧХ (рис. 136,в). Вид последних характеристик во многом зависит от номиналов используемых наружных элементов (C_1 , C_2 и R_6).

Из полученных характеристик видно, что этот ОУ является высокоточным с относительно небольшим быстродействием; в области низких частот его коэффициент усиления по напряжению достигает 35000.

Этими примерами ограничимся в рассмотрении внутренней структуры ИМС, и далее будем рассматривать ОУ, как функциональный компонент, свойства которого заданы макромоделью.

Схемотехнические макромодели ОУ

Канонический ОУ имеет четыре сигнальных вывода: два входных (инвертирующий и неинвертирующий), один выход и землю. На принципиальных схемах такой ОУ обычно изображают, продолжая меморику стрелки тока и диода, в виде равностороннего треугольника, ориентированного по направлению распространения

сигнала, дополняя его соответствующими выводами. Если к четырем сигнальным выводам добавить выводы для двухполарного питания, то всего выводов должно быть 6. Однако, выбрав в программе **MC** последовательно команды: Component>Analog Primitives>Active Devices>Opamp, получим графическое изображение ОУ с 5 выводами (см. рис. 137,а). В программе **EWB**, нажав ЛКМ на

иконку с изображением аналоговых микросхем  и выбрав в ниспадающем меню Analog ICs (Analog Integrated Circuits – анало-

говые интегральные схемы) иконку , получим изображение пятивыводного ОУ (5-Terminal Opamp), показанное на рис. 137,б. В этих УГО слева размещены информационные (сигнальные) входы, а справа (из вершины) – выход сигнала, сверху и снизу выводы питания, не являющиеся информационными. Еще раз следует подчеркнуть, что знаки «+» и «-» на информационных и не информационных выводах имеют принципиально различный смысл: на информационных – они указывают на фазы выходного сигнала по отношению к входному, а на не информационных – это обычные алгебраические знаки потенциалов по отношению к земле. В отечественной литературе, согласно ГОСТ применяют для подобных ОУ схожие изображения в виде треугольников (рис. 138,а,б) или в виде прямоугольников, сохраняя мнемонический треугольник во внутреннем поле (рис. 138,в,г). Здесь, кроме того, на неинформационных входах ставят условную метку в виде косого креста.

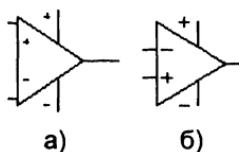


Рис 137. Условные графические обозначения 5-выводного ОУ:
а – в программе **MC**; б – в программе **EWB**

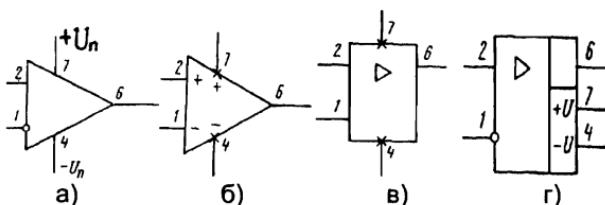


Рис.138 УГО ОУ по ГОСТ

Совет Обратите внимание на то, что в разных способах УГО по разному размещают по отношению друг к другу «плюсы» и «минусы» (информационные и питания) и по-разному ориентируют УГО в пространстве по отношению к горизонтальной оси.

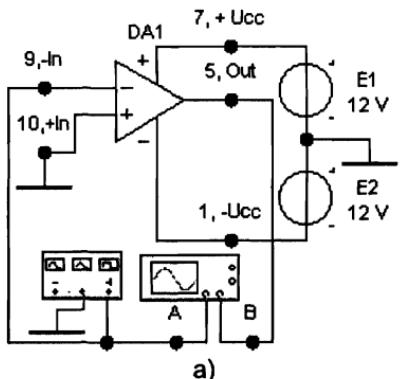
Итак, на приведенных обозначениях 5 выводов вместо 6: не хватает земли – с ней всегда проблемы. Для того чтобы с этим разобраться посмотрим на соответствие между выводами реальной микросхемы на ее цоколе или корпусе и приведенным УГО.

Обратимся к рис. 131,а, где для ОУ типа К140УД1, дана цифровая нумерация выводов и для основных указаны их функциональное назначение. Здесь 9 – инвертирующий вход, а 10 – не инвертирующий, 5 – выход, 7 – подключение положительного полюса источника Е1 и 1 – подключение отрицательного полюса источника Е2 (относительно их общей точки, которая заземлена). Вывод 4 – Ground (земля) самого усилителя, хотя и имеет нулевой потенциал, обычно с «внешней» землей не соединяют. Таким образом, остается пять необходимых выводов, отсчеты же всех сигналов производятся относительно общей точки источников питания («внешней» земли).

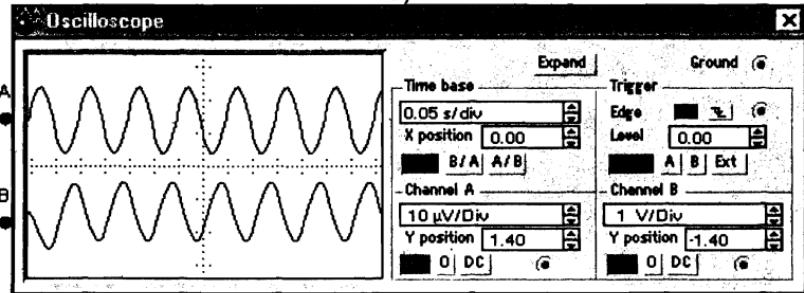
Соберем в программе EWB схему аналогичную показанной на рис. 131,а, «спрятав» все компоненты ИМС внутри ее УГО и сохранив при этом нумерацию выводов (см. рис. 139,а). Если бы в библиотеке компонентов программы EWB содержался ОУ типа К140УД1, то после включения моделирования мы бы получили результаты, полностью совпадающие с представленными на рис. 132. Можно, конечно, отредактировать существующий библиотечный компонент, но это требует многих дополнительных данных о микросхеме. Ограничимся тем, что продемонстрируем принципиальную работоспособность собранной схемы. Выберем в библиотеке компонентов ОУ типа 741 и, уменьшив напряжение на источнике входного сигнала до 10 мкВ, включим моделирование. Результат показан на рис. 139,б. Из осциллограмм видно, что для этого ОУ коэффициент усиления составляет около 100000, поскольку масштабы вертикальной развертки по каналам на одно деление составляют: 10 мкВ – для канала А и 1 В – для канала В.

Проделаем такую же схемотехническую замену в программе МС для ОУ типа UA709, поскольку одна из его модификаций содержится здесь в библиотеке компонентов.

Итак, начинаем с чистого листа (New>Schematic) и, выполняя последовательно команды: Component>Analog Primitives>Active Devices > Opamp > U0000 > UA709AM, выберем необходимый ОУ



a)



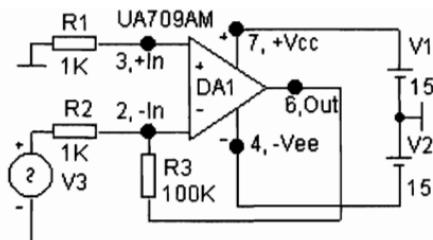
b)

Рис. 139. Схема включения ОУ (EWB)

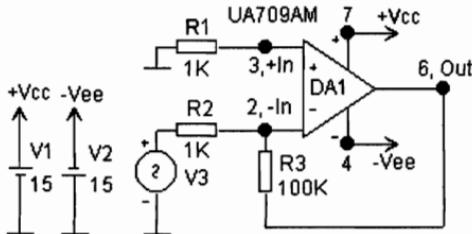
(рис. 140,а). Нумерация выводов ОУ на этом рисунке совпадает с нумерацией на рис. 135, правда здесь в схемной модели фигурируют не все выводы реальной микросхемы. Включим в соответствии с обозначениями и паспортными данными источники питания, а также входные и выходные цепи аналогично рис. 135,а.

Схема готова для моделирования, но вначале придадим ей другой вид, используя вышеописанный элемент Tie. Это позволяет «убрать» в любое место источники питания (при этом, согласно принятым условиям, ОУ остается к ним подключенным). Теперь проведем моделирование этой макромодели аналогично ранее исследованной микромодели. Сопоставляя характеристики, представленные на рис. 136 и 140,в–д, видим их схожесть.

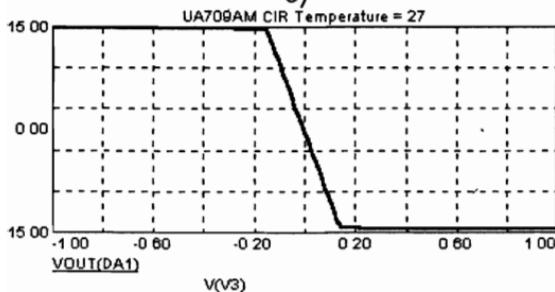
Параметры макромоделей задаются совсем из других схем замещения, и они не являются просто параметрами компонент реальной микросхемы (иначе их число было бы очень большим). Задание этих макропараметров можно легко посмотреть в программе EWB. Для этого достаточно выделить выбранный компонент



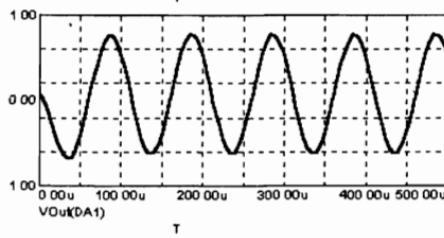
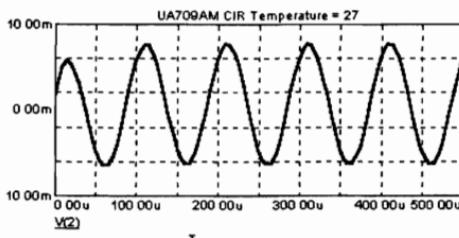
a)



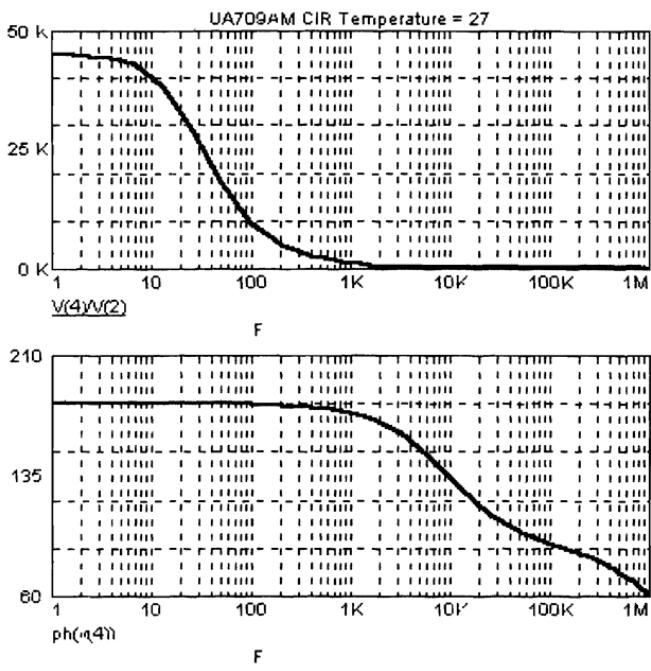
b)



B)



C)



д)

Рис 140 Схемы включения и характеристики библиотечной модели ОУ типа μ A709AM (**MC**)

ОУ и посмотреть его модель. Вообще же в программе EWB имеется четыре варианта аналоговых ОУ. их УГО показаны на рис. 141 Вариант рис 141,а – это так называемый идеальный ОУ.

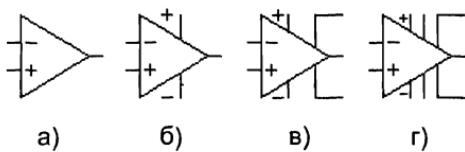


Рис 141 УГО ОУ в программе EWB

В схемотехнике широко используется представление об идеальном операционном усилителе. Основные свойства идеального ОУ таковы. бесконечное входное сопротивление и нулевое выходное, бесконечный коэффициент усиления (при разомкнутой цепи ОС), бесконечная ширина полосы пропускания, начинающаяся с нуля. Это дало основание одному из крупных специалистов по операционным усилителям пошутить, что «спецификация» на идеальный ОУ содержит лишь нули и знак бесконечности.

В схеме идеального ОУ (рис. 141,а) по договоренности вообще не изображают источников питания, предполагая их включенными на своих местах. Отсчет сигналов производится относительно земли, которая должна быть на схеме. Кроме того, в программах расчета схем, содержащих идеальный ОУ, задают не нули и бесконечности, а конкретные числовые параметры. Выбор этих чисел определяется относительными масштабами задачи, подобно механике: Земля в планетарном масштабе – материальная точка (размер – 0), но при движении по ней тел ограниченных размеров мы, конечно же, учитываем ее протяженность. В модели же идеального ОУ надо принять во внимание относительность масштабов электрических величин. Математические модели идеального ОУ являются линейными.

Выполнив в программе **EWB** последовательно команды: Analog Ics>Component Properties>Models>default>ideal>Edit откроем окна с листами Sheet 1(рис. 142,а) и Sheet 2 (рис. 142,б) для редактирования трехвыводного ОУ – 3-Terminal Opamp Model «Ideal». Приведенные в этих листах параметры таковы.

1. Open-loop gain – коэффициент усиления напряжения ОУ, неохваченного ОС.

2. Input resistance – входное сопротивление.

3. Output resistance – выходное сопротивление.

4. Positive voltage swing – положительное напряжение «раскачки» (максимальное значение выходного напряжения).

5. Negative voltage swing – отрицательное напряжение «раскачки» (минимальное значение выходного напряжения).

6. Input offset voltage – напряжение смещения нуля.

7. Input bias current – входной ток.

8. Input offset current – разность входных токов смещения.

9. Slew rate – максимальная скорость нарастания выходного напряжения.

10. Unity-gain bandwidth – частота единичного усиления (частота входного сигнала при котором коэффициент усиления равен 1).

11. Location of second pole – частота второго полюса передаточной характеристики (частота входного сигнала, при которой фаза выходного сигнала становится $>180^\circ$).

Пример выбора числового значения параметров показан в приведенных листах (см. рис. 142,а,б). При переходе к моделям реальных ОУ, необходимо выбрать вместо идеального из приведенной библиотеки компонентов нужный тип или отредактировать имеющиеся модели.

3-Terminal Opamp Model 'ideal'



Sheet 1 | Sheet 2 |

Open-loop gain (A):	<input type="text" value="1e+0E"/>
Input resistance (RI):	<input type="text" value="1e+10"/> Ω
Output resistance (RO):	<input type="text" value="1"/> Ω
Positive voltage swing (VSW+):	<input type="text" value="20"/> V
Negative voltage swing (VSW-):	<input type="text" value="-20"/> V
Input offset voltage (VOS):	<input type="text" value="0"/> V
Input bias current (IBS):	<input type="text" value="0"/> A
Input offset current (IOS):	<input type="text" value="0"/> A
Slew rate (SR):	<input type="text" value="1e+10"/> V/s
Unity-gain bandwidth (FU):	<input type="text" value="1e+12"/> Hz

OK

Отмена

a)

3-Terminal Opamp Model 'ideal'



Sheet 1 | Sheet 2 |

Location of second pole (FP2):	<input type="text" value="0"/>	Hz
Compensation capacitance (CC):	<input type="text" value="0"/>	F

OK

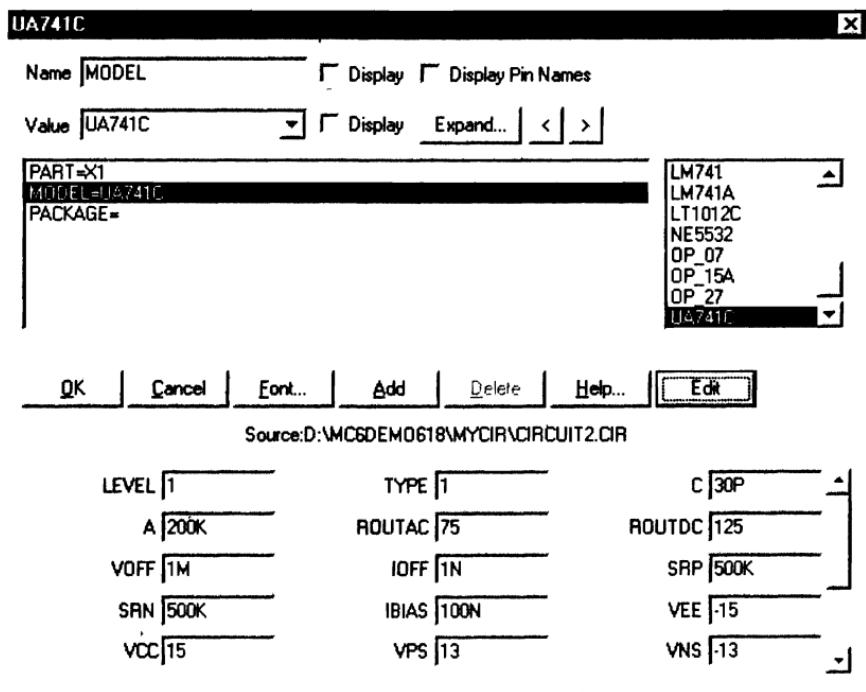
Отмена

б)

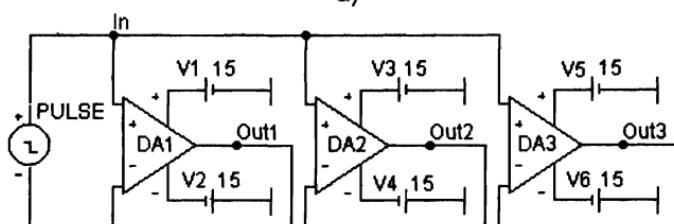
Рис. 142. Окно для редактирование параметров идеального ОУ (EWB)

Действуя аналогично предыдущему, можно выбрать модель пятивыводного ОУ – 5-Terminal Opamp Model «741», который принят за своеобразный стандарт или другой подходящий тип ОУ (рис. 139,а). Число параметров этих ОУ естественно больше, так как тут модели уже нелинейные. При необходимости учета компенсационных и корректирующих цепей используют модели семи- и девятивыводных ОУ (рис. 141,в,г).

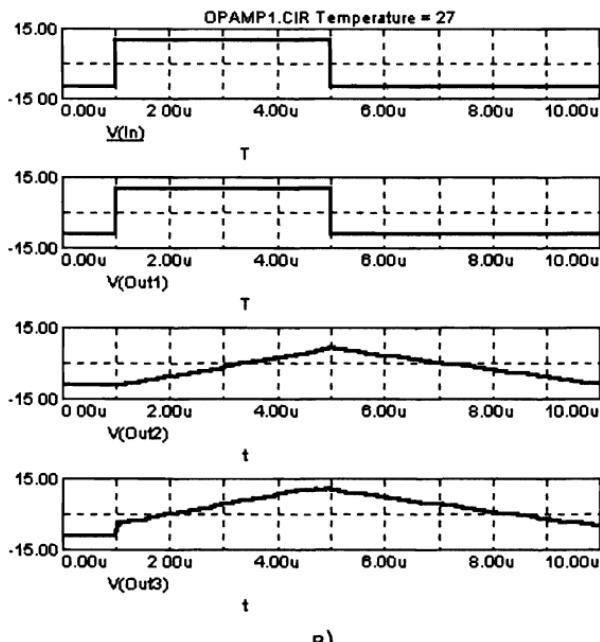
В программе МС, также имеются различные модели и библиотеки ОУ. Базовым схемным компонентом ОУ является пятивыводной (см. рис. 137,а). Здесь можно использовать модели трех различных уровней (Level): простейшую идеальную линейную (Level1), усилненную линейную (Level 2), и нелинейную (Level 3). Окно для редактирования содержит как параметры, так и типы ОУ (рис. 143,а). По умолчанию задана модель третьего уровня сложности (Level 3), предусмотрена возможность прокрутки типов и параметров ОУ. Поведение моделей показано во времени при подаче на них прямоугольного импульса на рис. 143,б,в) и в частотной области на рис. 143,г, причем нумерация ОУ и выходов на схеме соответствует номеру уровня модели.



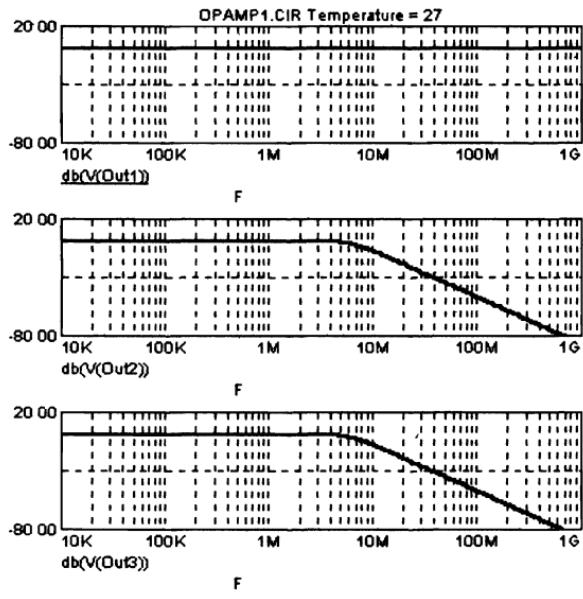
a)



б)



B)



Г)

Рис. 143. Модели ОУ (МС)

5.2. Операционные схемы

Усилия любого разработчика операционных усилителей направлены на достижение цели, кажущейся абсурдной, – сделать, чтобы усилитель был функционально неразличим в конкретной схеме, т. е. чтобы он не влиял на ее операционное уравнение.

Достал И. Операционные усилители

Использование ОУ для выполнения различных функций по обработке сигналов основано на применении к ним соответствующих обратных связей, задающих эти функции. ОУ совместно со специально подобранными «навесными» элементами («обвязкой») из цепей ОС составляет функциональный блок – операционную схему. Подобные устройства, некоторые из которых будут рассмотрены ниже, могут выполнять самые разнообразные операции по обработке аналоговых сигналов.

Сейчас подобные схемотехнические решения стали обыденными, но так было не всегда. При внедрении в технику идей ОС в прошлом веке дело доходило до курьезов. Еще в далеком 1775 г. Парижская академия наук приняла мотивированное решение, которым раз и навсегда отказывалась рассматривать любые проекты *Perpetuum mobile* (вечных двигателей). После этого эксперты патентных бюро всего мира первым делом смотрели: «А не вечный ли это двигатель?» – он действовал как черная метка. Не надо думать, что все они были закостенелыми ретроградами: семь лет знаменитый А. Эйнштейн проработал техническим экспертом III класса бернского Бюро патентов.

Представим теперь некоего многоопытного эксперта, к которому поступила заявка с предложением соединить выход усилителя с его же входом. «Ну и чем же эта штука отличается от известных вечных шарманок с колесами, сосудами, шарами и цепями, возвращающимися в исходное состояние, а затем начинающими движение опять и опять? Уж очень походит на *Perpetuum mobile*, только из разряда электрических!» – мгновенно решает эксперт, и изобретение летит в корзину. Как станет ясно позже, эксперт явно не смог преодолеть той тонкой грани, которая разделяет безумные и гениальные идеи. «Ваша идея, конечно безумна. Весь вопрос в том, достаточно ли она безумна, чтобы быть великой» – говорил в подобных случаях Н. Бор.

Через десятки лет этот же эксперт (или его приемник) торжественно оформляет патент на изобретение века, подтверждая оригинальность и практическую целесообразность подобного же творения. Никакие фундаментальные законы здесь, конечно, не на-

рушаются: усилитель исправно получает не только свой же выходной сигнал, но и обычное питание от сети или другого дополнительного источника. В настольной книге эксперта по операционным усилителям теперь черным по белому написано, то основное положение, которое мы выбрали эпиграфом к данному подразделу. Получается, что чем лучше реальный усилитель, тем меньше он вносит искажений при выполнении соответствующих операций, выполняемых системой ОУ – ОС. Решение этой абстрактной задачи и дает идеальный ОУ, охваченный необходимой ОС. Ситуация напоминает античный театр: роль играет замечательный актер, но амплуа персонажа раз и навсегда предопределено его маской.

Наличие у ОУ двух входов и одного выхода определяет схемотехнические варианты включения сигнала, нагрузки и цепей ОС.

В программе **EWB**, используя простейшую модель идеального трехходового ОУ, соберем схему (рис. 144), в которой сигнал умножается на заданную отрицательную константу. Эта инверсия осуществляется за счет частотно-независимой параллельной ООС через резистор R_2 , а масштабирование определяется отношением R_2/R_1 . В приведенной схеме коэффициент передачи по напряжению составит $-1\text{Мом}/10\text{k}\Omega = -100$. При подаче на вход (In) напряжения в $+10\text{mV}$ на выходе (Out) получим напряжение -100 mV , регистрируемое вольтметром.

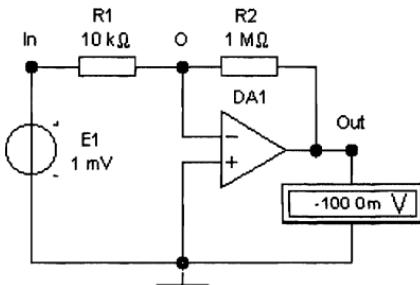


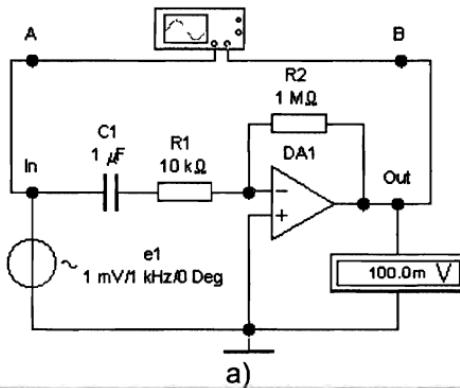
Рис. 144. Инвертирующий усилитель на основе ОУ (**EWB**)

Здесь, относительно точки О («потенциальная земля»), где встречаются входной сигнал и сигнал ОС, как бы работает коромысло своеобразных весов с соотношением $-(R_2/R_1)$. Так вот, чем лучше ОУ, тем точнее будут работать эти «весы». По отношению к этой точке работает резистивный делитель напряжения с коэффициентом передачи $-(R_1/R_2)$. ОС совместно с ОУ составляют блок с передачей обратного вида. Это правило – передача операционной схемы обратна передаче цепи ОС – выполняется во всех операционных схемах.

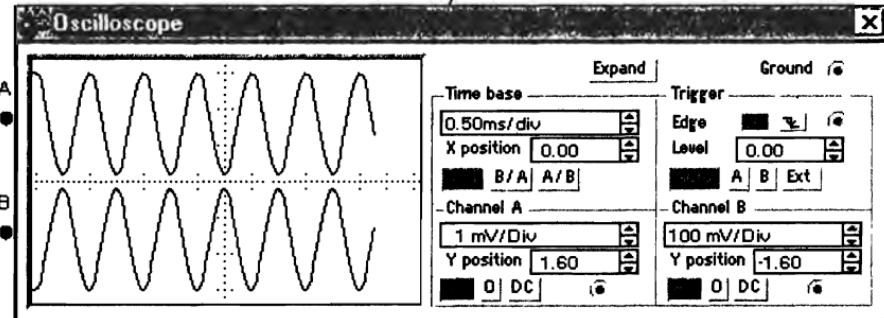
Изменяя параметры резисторов в этой схеме, можно пронаблюдать за ее работой. При $R_2=R_1$ выходное напряжение будет равно входному, но с обратным знаком – устройство становится обыкновенным инвертором сигналов.

Включив в подобной схеме на входе разделительный конденсатор, можно осуществить инвертирующее усиление переменных напряжений (рис. 145,а). Напряжение на зажимах источника e_1 изменяется по синусоидальному закону с частотой 1 кГц при действующем значении напряжения 1 мВ. Вольтметр здесь переустановлен на режим АС и также измеряет действующее значение напряжения (неотрицательная величина), поэтому его показание равно +100 мВ.

Для того чтобы увидеть инверсию сигнала, которая на переменном токе заключается в изменении его фазы на 180°, в схеме включен осциллограф. Характер и масштаб колебаний по каналам А и В, включенным в отмеченные одноименные точки схемы, говорит сам за себя (см. рис. 145,а).



a)



b)

Рис. 145. Инвертирующий усилитель на основе ОУ при сигнале переменного напряжения (EWB)

Перестроив схему, получаем неинвертирующий усилитель (рис. 146). Здесь ООС включена в инвертирующий канал ОУ, а сигнал подается на неинвертирующий вход. Вображаемые весы несколько усложнились, и коэффициент передачи по напряжению этой операционной схемы становится равным $(1 + R_2/R_1)$. В этом легко убедиться, посмотрев на параметры компонентов схемы и показания вольтметра.

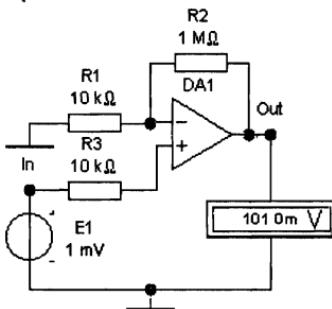
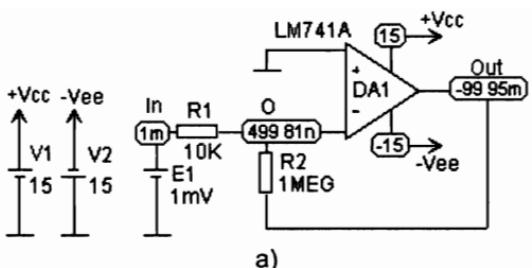


Рис. 146. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ (EWB)

В программе **МС** также можно исследовать аналогичные операционные схемы. Для построения схемы инвертирующего усилителя используем 5-ти выводной ОУ (рис. 147,а). Схемотехническая графика этой программы несколько отличается, поэтому дадим необходимый комментарий. Исходное положение УГО ОУ таково, что оба «плюса» находятся сверху. Конечно, его легко можно повернуть относительно горизонтальной оси, но не будем сейчас этого делать из методических соображений. Дело в том, что в печатных и электронных информационных ресурсах могут встретиться самые различные случаи, к этому надо привыкать и быть предельно внимательными. 5-ти выводному ОУ требуются два разнополярных по отношению к земле источника питания. Введем их аналогично рис. 140,б. Для моделирования войдем в режим DC Analysis и, выполнив установки в соответствии с окном на рис. 147,б, нажмем Run, затем F3 и пиктограмму вывода значений узловых потенциалов на схему (Node Voltages). Тогда на схеме в скругленных рамочках на соответствующих узлах появятся числовые значения их потенциалов относительно земли. Узлы питания имеют потенциалы +15 В и -15 В соответственно, входной узел (In) имеет потенциал 1m, т. е. 1 мВ, а потенциал выходного узла (Out) составляет -99,95 мВ или округленно -100 мВ. Обратим также внимание на потенциал узла O, равный всего лишь 499,81 н, т. е. округленно 500 нВ = 0,5 мкВ. Это почти ноль, практически земля: отсюда и его название «потенциальная земля».



a)

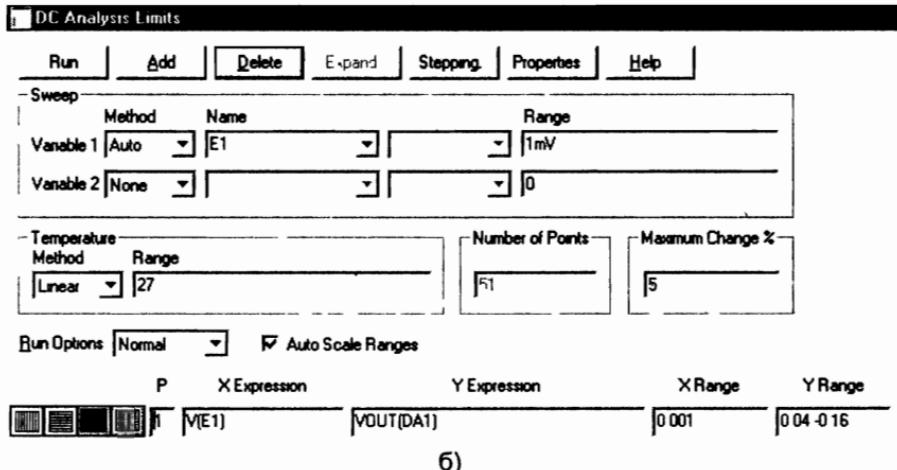


Рис 147. Инвертирующий усилитель на основе ОУ (МС)

Работа на переменном токе инвертирующего усилителя, использующего ОУ в программе МС, была фактически представлена выше (см. рис. 140) так, что остается лишь сопоставить эти результаты с рис. 145.

А теперь вернемся к «горе-патентоведу», с описания работы которого был начат этот раздел. Пусть к нему на экспертизу попадает такая схема, как представлена на рис. 148, только развернутая и с учетом прошлой элементной базы. Это многокаскадный линейный ламповый усилитель с большим коэффициентом усиления (примерно то, что сейчас мы видим как ретро в виде систем класса Hi-Fi), а все изобретение и состоит-то только в том, что выход соединен накоротко с одним из входов. «Ну, и что же получилось? – думает эксперт – Что подали на вход, то и получили на выходе: зачем же городили усилитель? И не простой, а самый лучший! От чего ушли, к тому же и пришли. Да это явно очередной «полоумный» изобретатель. Новизна, возможно, и есть, но где же необходимая полезность?»

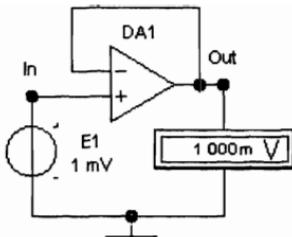
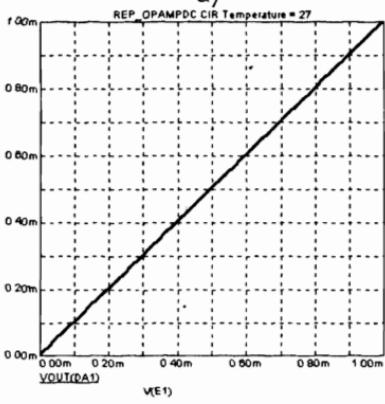
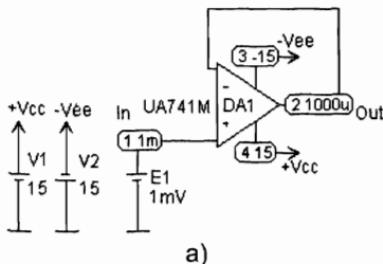


Рис. 148. Повторитель напряжения (EWB)

Увы, оказывается, что есть и полезность: эту самую простую операционную схему с успехом широко используют как идеальный буфер. Дело в том, что входное сопротивление ОУ с ОС бесконечно велико (практически, сотни МОм), а выходное очень мало (практически, омы). Вот такой идеальный трансформатор полных сопротивлений. Да ему нет цены.

На рис. 148 и 149 представлена работа этого устройства, называемого повторителем напряжения. В программе **MC** (рис. 149,а) изображение ОУ повернуто на 180° вокруг горизонтальной оси и узловые потенциалы выведены на схему вместе с расчетными номерами ее



б)

Рис. 149. Повторитель напряжения (**MC**)

узлов в формате: (№ узла: узловой потенциал). Например, помета (2:1000u) Out означает, что на выходе (Out) в узле №2 потенциал составляет 1000u, т. е. 1000 мкВ = 1 мВ. Далее, здесь же (рис. 149,б), показана передаточная характеристика этого повторителя.

Поскольку ОУ имеет дифференциальный вход, то третьим вариантом подачи входного сигнала является его подача сразу на оба входа, а не на один из них и землю. Это использование ОУ как бы по прямому назначению: в качестве дифференциального усилителя, только очень хорошего. На рис. 150 и 151 показан дифференциальный усилитель на основе ОУ. Здесь сигнал подается между инвертирующим и неинвертирующим входами и используется резистивная ОС. Это как бы совмещение двух предыдущих усилителей инвертирующего и неинвертирующего и, казалось бы, что ничего нового здесь не содержится. Однако, такая операционная схема обладает одним немаловажным свойством: значительно ослаблять синфазный сигнал, например сигнал наводок на обоих входах относительно земли одновременно. Это ведь дифференциальный, а значит разностный усилитель: вычитание двух сигналов в случае идеального ОУ даст ноль для сильной помехи и выделит полезный сигнал, хотя его относительный уровень может быть сравнительно малым. На практике применяют такие операционные схемы, на основе специальных инструментальных (прецизионных – высокоточных) ОУ, например, в медицинской и другой специальной электронике.

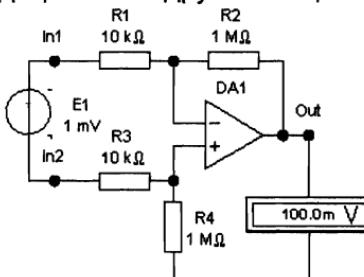


Рис. 150. Дифференциальный усилитель на основе ОУ (EWB)

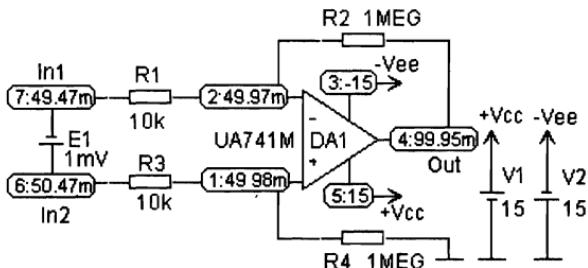


Рис. 151. Дифференциальный усилитель на основе ОУ (MC)

Еще одним достаточно простым и полезной схемой является сумматор. Напряжение на выходе этой схемы равно алгебраической сумме входных напряжений (см. рис. 152 и 153). Если, скажем, изменить знак источника E_2 на противоположный, то результат будет -3 мВ. Число входов для сложения можно при необходимости увеличить. Можно также построить по аналогии инвертирующий сумматор, производящий одновременное масштабирование складываемых чисел.

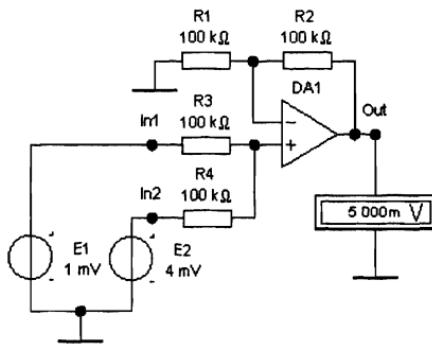


Рис 152. Сумматор (EWB)

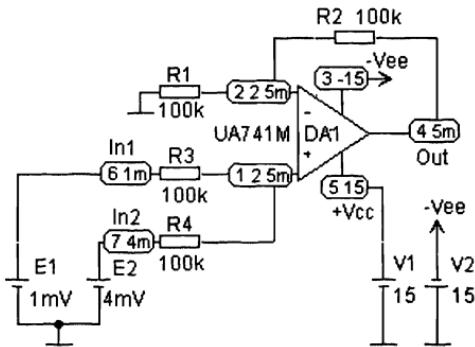
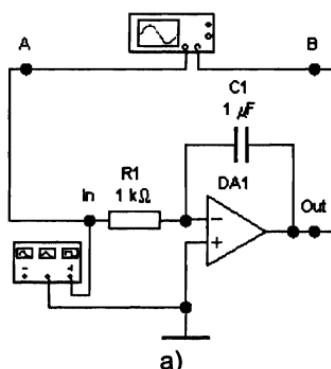


Рис. 153. Сумматор (MC)

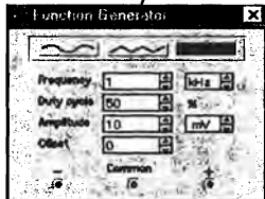
Перейдем теперь к операционным схемам с частотно-зависящими RC-цепями. Это позволяет создать интеграторы и дифференциаторы, а также другие устройства.

Схема простейшего интегратора на ОУ в программе EWB представляет собой инвертирующий усилитель, в котором резистор ОС заменен конденсатором (рис. 154,а). В качестве источника входного сигнала, подлежащего интегрированию во времени, выбрана периодическая последовательность прямоугольных импульсов, задаваемая функциональным генератором в соответствии

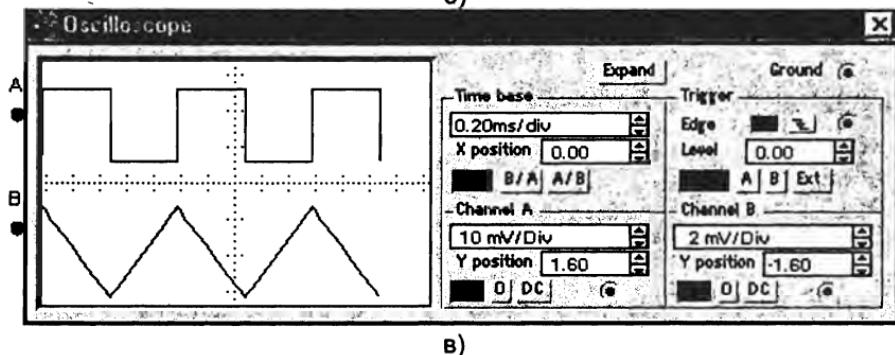
с установками на его панели (рис. 154,б). Выполнив также, необходимые установки на осциллографе и включив моделирование, получим картину (рис. 154,в) входных прямоугольных импульсов (луч А) и результат их интегрирования (луч В).



а)



б)

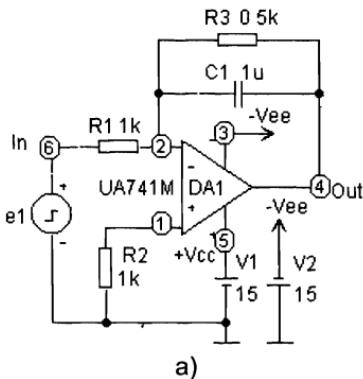


в)

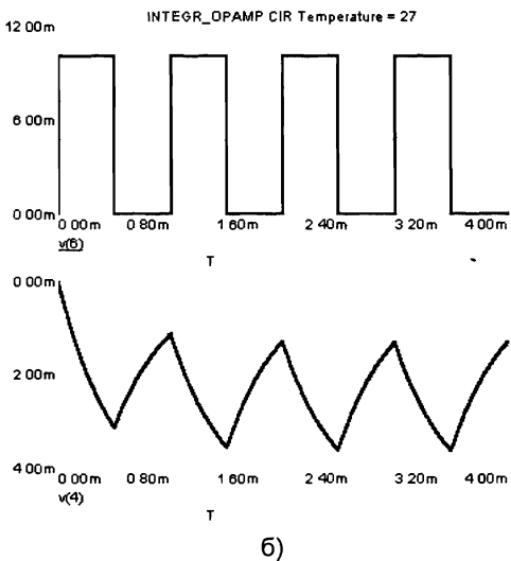
Рис. 154. Интегратор (EWB)

В программе МС представлен несолько усовершенствованный вариант интегратора (рис. 155,а). Здесь источник переменного напряжения e1 задан в формате:

.MODEL E1 PUL (VZERO=0 VONE=10MV P1=0 P2=0 P3=0.5MS P4=0.5MS P5=1MS)



a)



б)

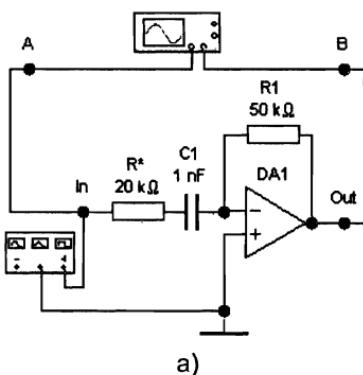
Рис 155 Интегратор (МС)

Проведя анализ переходного процесса, получим графики, показанные на рис.155,б, на которых видны характерные экспоненциальные этапы заряда и разряда конденсатора в цепи ОС.

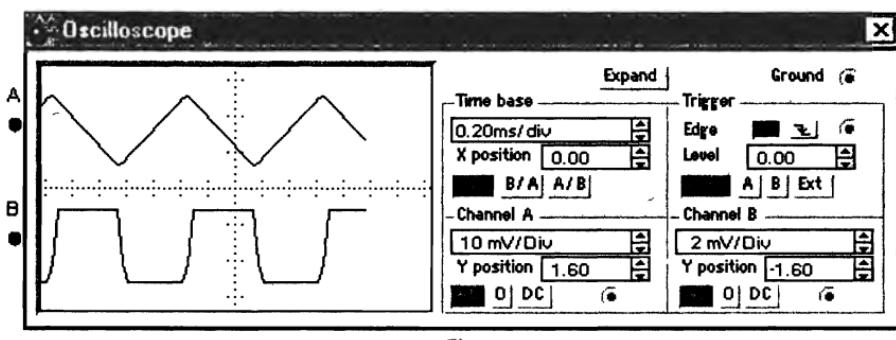
Поскольку математически операции интегрирования и дифференцирования являются обратными друг другу, то в принципе поменяв местами в схеме интегратора в программе EWB на рис.154,а резистор R1 и конденсатор C1, получим дифференциатор (рис. 156,а). Это напоминает описанный ранее переход от простейших интегрирующих RC-цепей к дифференцирующим, к которому здесь полезно вернуться для сопоставления.

В схему данного дифференциатора для коррекции его работы введен дополнительно резистор R^* на входе. Переключим задаю-

щий генератор, не меняя других его установок, на режим треугольных импульсов. Включив моделирование, на осциллографе (после его необходимых установок), увидим восстановление исходной прямоугольной последовательности: теперь луч А входной треугольный сигнал, а В результат его дифференцирования – прямоугольные импульсы (рис. 156,б).



а)



б)

Рис. 156. Дифференциатор (EWB)

Дифференциатор в программе МС показан на рис.157,а. Здесь генератор входных импульсов оставлен прежним: те же прямоугольные импульсы. Результат их дифференцирования показан на нижнем графике рис. 157,б. Получилась периодическая последовательность знакопеременных импульсов с нулевым временем фронта (и это правильно) и малым временем спада (а это небольшая погрешность в выполнении операции).

Интересно отметить, что, если рассмотреть размерность интеграла и производной по времени, то поскольку размерность произведения R^*C есть время, то именно эта «постоянная времени»

и является той константой в обратной передаточной функции, на которую производится умножение при интегрировании и соответственно деление при дифференцировании. Такова роль «функциональных гирь», регулируемых глубокой ООС на весах ОУ.

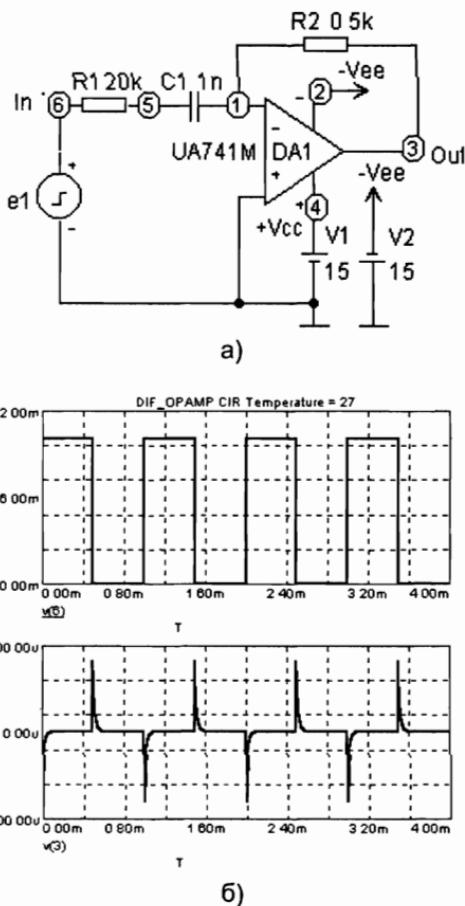
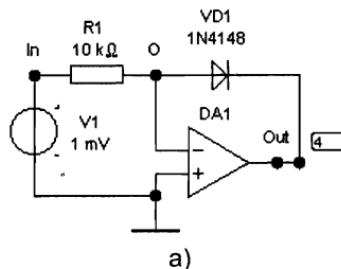


Рис. 157. Дифференциатор (МС)

Рассмотренные операционные схемы выполняли четыре линейные математические операции: сложение (вычитание), умножение (деление) на константу, интегрирование и дифференцирование. Их действие было основано на использовании операционной схемы, состоящей из линейного ОУ и ОС из линейных RC-цепей. Однако, линейные физические системы – это всего лишь удобные абстракции, упрощающие более широкий класс систем нелинейных в своем поведении. Вопреки широко распространенному

ному заблуждению, нелинейные системы (в данном случае схемы) отнюдь не «уроды», а, напротив, очень даже красивые и полезные создания. Богатство свойств этих систем является тому подтверждением. Система становится нелинейной, если содержит нелинейные же элементы, существенно влияющие на ее поведение. В операционной системе мы выделяем условно два элемента цепь ОУ и цепь ОС. Оставив в системе линейный ОУ и заменив линейную ОС на нелинейную, получаем нелинейную операционную схему. Самое главное заключается в том, что характер нелинейной операции в этой системе целиком зависит от свойств ОС (при идеальном ОУ). Например, если заложить в обратную связь такое нелинейное преобразование как умножение сигналов, то в результате получится аналоговое деление (правило обратной передаточной функции), и, наоборот. Положим теперь на коромысло наших воображаемых весов (ОУ) нелинейные «гири» или, если угодно, нарядим наших актеров в характерные маски. Необходимые атрибуты нетрудно найти среди арсенала полупроводниковых приборов с их богатым набором нелинейных ВАХ. Рассмотрим в качестве примера нелинейные математические операции логарифмирования – антилогарифмирования.

Для построения логарифматора (усилителя с логарифмической характеристикой усиления) в программе **EWB** возьмем схему инвертирующего усилителя (рис. 144,а) и, скопировав ее на новый лист или сохранив (Save As) под новым именем, заменим резистор R2 в цепи ОС на диод VD1 (рис. 158,а). Поскольку ВАХ диода имеет экспоненциальный характер, то ее обратной передаточной функцией будет логарифмическая зависимость. Выполнив установки в окне моделирования на постоянном токе по рис. 158,б, и дав в этом окне команду на моделирование (Simulation), получим результат проведенной операции (рис. 158,в). Исходный график несколько отредактирован набором инструментов, предоставляемых в его же окне. Нетрудно видеть, что на протяжении четырех декад по входному положительному напряжению, операционная схема осуществляет операцию логарифмирования и умножения на отрицательную константу.



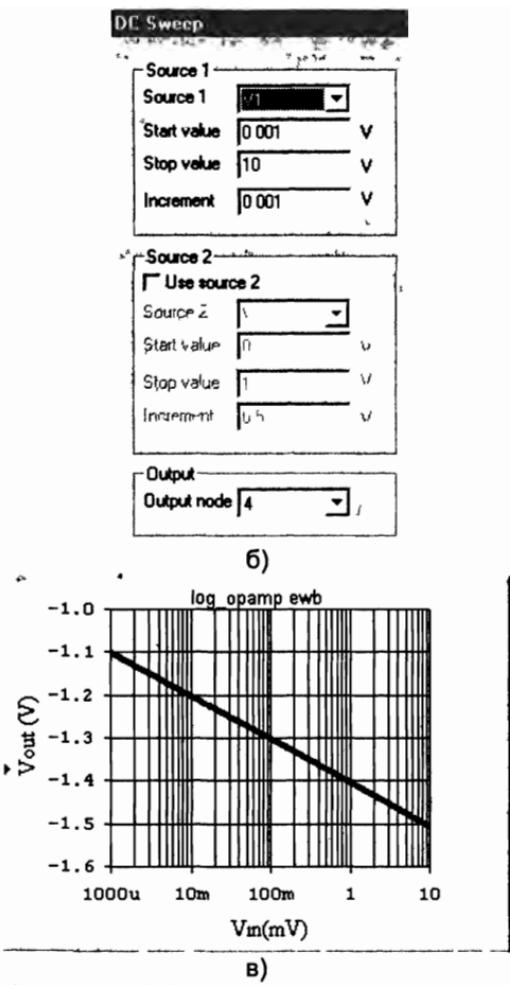
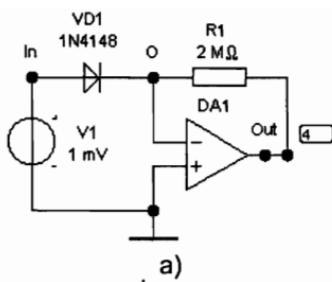
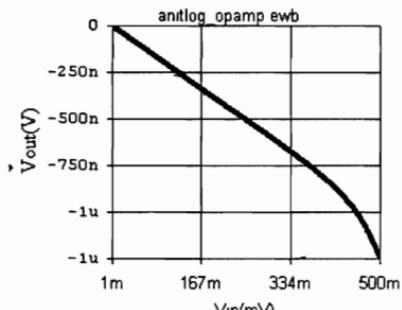


Рис. 158. Логарифматор (EWB)

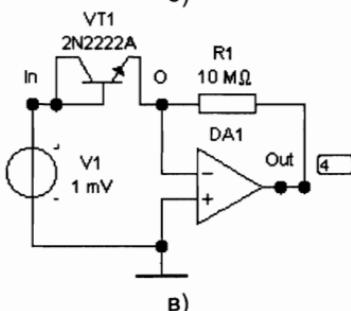
Поменяв местами в схеме логарифматора входной резистор R1 и диод VD1, получим антилогарифматор: на его выходе должна получаться экспонента (рис. 159а,б). Вид полученного преобразования во многом зависит от вида ВАХ используемого полупроводникового прибора, на которые сильно влияет температура. В практических схемах (аудиотехнике и специальной электронике) часто применяют вместе и логарифматор и антилогарифматор. Тогда вместо диода используют транзистор в диодном включении или с заземленной базой, или с дополнительным управлением по базе. Для устранения температурных погрешностей применяют также специальные монолитные транзисторные пары. Иллюстрация использования транзистора приведена на рис. 158,в,г.



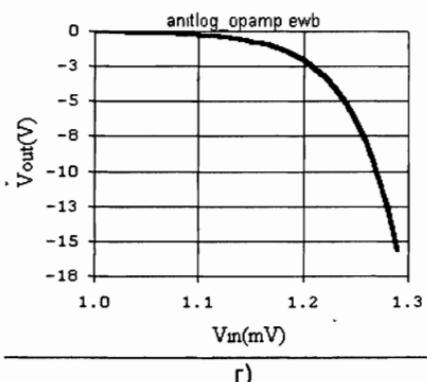
a)



b)



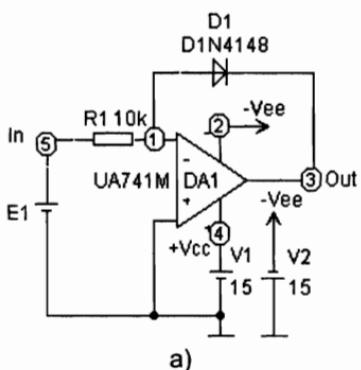
b)



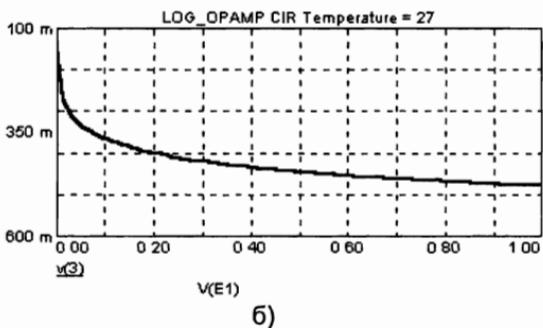
c)

Рис. 159. Антилогарифматор (EWB)

Построение логарифматора и антилогарифматора в программе **МС** и исследование их работы не имеет каких-либо особенностей и представлено на рис. 160, 161.



a)

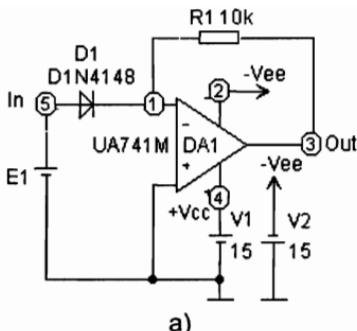


б)

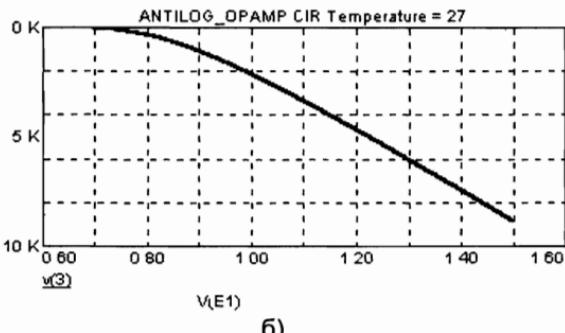
Рис. 160. Логарифматор (**МС**)

Полученные характеристики операционных схем отличаются от характеристик реальных устройств из-за использования упрощенных схем и моделей.

На практике операционные схемы используются как самостоятельно, так и в составе более сложных устройств. Когда-то из подобных операционных блоков состояла аналоговая ЭВМ. Развитие идет по спирали и теперь на цифровой ЭВМ можно эмулировать работу аналоговой машины. Для этого даже не требуется скрупулезно воссоздавать схемы ее блоков: сумматоры, интеграторы, перемножители, делители: они и другие аналоговые устройства в виде макромоделей соответствующих компонент имеются в обеих программах и для желающих с ними поработать, как говорится, «путь не заканчен» (по Вл. Далю – не запрещен).



a)



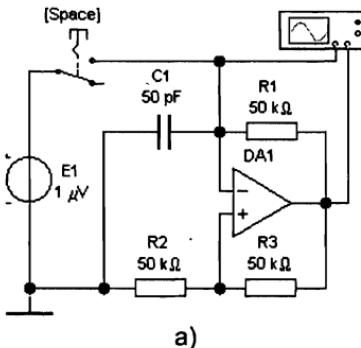
б)

Рис. 161. Антилогарифматор (МС)

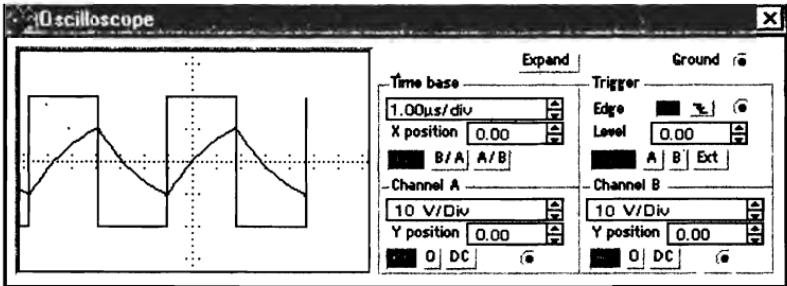
5.3. Генераторы на ОУ

Реализация схем генераторов на ОУ особенно в диапазоне частот до нескольких мегагерц значительно проще, чем на транзисторах. ОУ как бы сам напрашивается: «Ну, сделайте меня, наконец, генератором!» Действительно, в нашем распоряжении есть идеальный усилитель с двумя каналами управления, по которым легко осуществить обратные связи и положительную и отрицательную. Остается только правильно задать их характеристики, а уж ОУ-то постарается.

Начнем с простого. В программе **EWB** возьмем идеальный ОУ (рис. 162,а) и, используя RC-элементы, создадим две обратных связи: по неинвертирующему каналу положительную (ПОС), а по инвертирующему отрицательную (ООС). Можно не «лепить» схему заново, а отредактировать какой-либо подходящий готовый вариант, например, рис. 154,а. Глубина ПОС задается резистивным делителем $R1-R2$. Глубина ООС определяется величиной $R1$. Для того чтобы произошло самовозбуждение системы ПОС должна



a)



b)

Рис. 162. Релаксационный генератор на ОУ (EWB)

преобладать. Подключим осциллограф к инвертирующему входу (канал А) и выходу ОУ (канал В). Схема простейшего автоколебательного мультивибратора готова к работе. Включаем моделирование. Подбираем настройки осциллографа. На экране ровные линии – колебания отсутствуют. Ситуация сходна с качелями: надо подтолкнуть систему. Собираем дополнительную цепь из источника E1 и ключа [Space]. Снова запускаем моделирование. Нажимаем и отпускаем на клавиатуре [Space]. На экране, при соответствующих настройках осциллографа, возникает картина колебаний (рис. 162,б). Видны характерные релаксационные кривые зарядки и разрядки конденсатора (так изменяется напряжение на инвертирующем входе) и прямоугольные броски напряжения на выходе.

Кстати, чтобы «подтолкнуть» систему из нулевого состояния потребовалось подзарядить конденсатор до напряжения всего лишь в один микровольт. Далее она совершает колебания с размахом, зависящим от напряжений источников питания ± 10 В (в этой схеме источники «спрятаны», но работают). Этим приемом (начального толчка) можно пользоваться и для других «капризных» автоколебательных схем. Конечно, это всего лишь виртуальная

схема. На практике же встречаются так называемые «жесткие» по природе автоколебательные системы, действительно требующие «хорошего» начального толчка, причем, иногда, и не одного, а нескольких. Кроме того, отмеченная «капризность» может быть связана с линеаризацией модели.

Теперь, заменим модель идеального ОУ на LM101A и номинал R1,а также уберем цепь начальной раскачки (рис. 163,а). После включения моделирования сразу получим генерацию колебаний в системе.

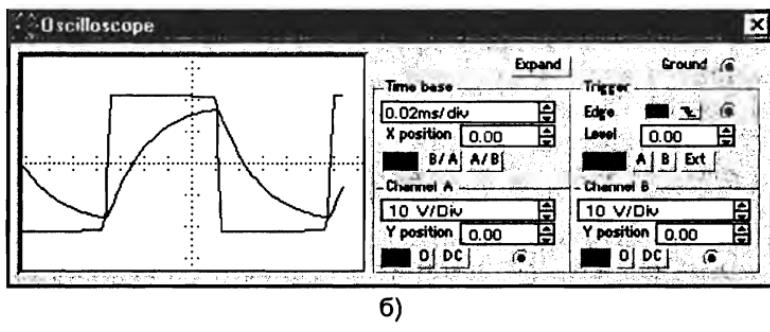
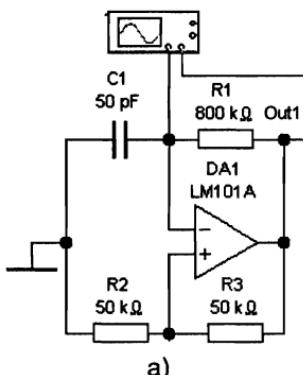
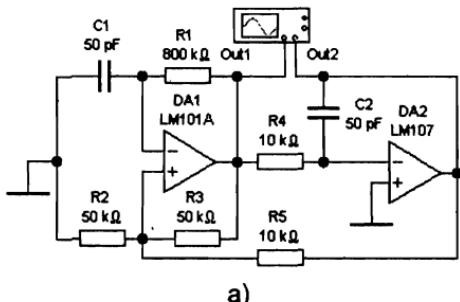
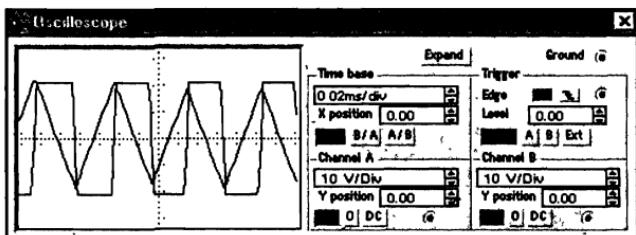


Рис. 163. Генератор прямоугольных импульсов на ОУ (EWB)

Скопировав этот каскад, разместим его копию справа от исходного и, изменив в ней модель ОУ на LM107 и введя другие необходимые элементы, получим функциональный генератор с двумя выходами: Out1 и Out2 (рис. 164). Включив моделирование, наблюдаем колебания: на первом выходе прямоугольные, а на втором – треугольные. Изменяя схемные параметры генератора, можно подробно исследовать свойства подобных автоколебательных систем.



a)



б)

Рис. 164. Функциональный генератор (EWB)

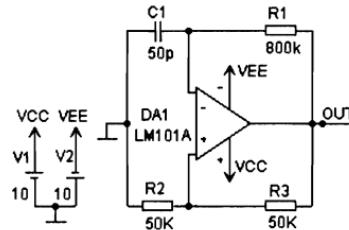
Два последних генератора повторим средствами программы МС (рис. 165, 166) и, при соответствующих настройках, увидим практически те же результаты.

На основе ОУ можно выполнить и классические генераторы гармонических колебаний.

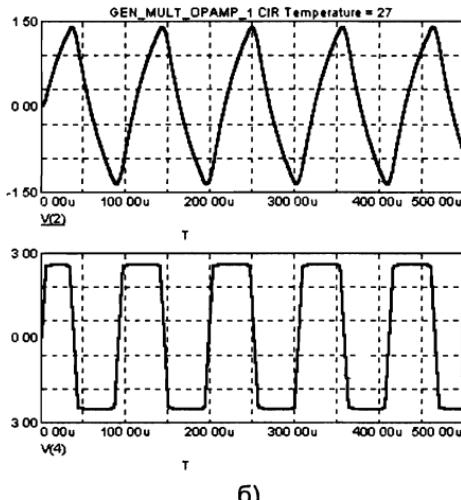
Не рассматривая всех возможных вариантов, воспользуемся демонстрацией работы двух библиотечных схемных файлов, имеющихся в рассматриваемых программах. Оба генератора, схемы которых после графического редактирования показаны на рис. 167, 168 имеют частотно-избирательные цепи в ОС, настраивающие их на определенную частоту. В первом генераторе это так называемый мост Вина на RC-элементах (рис. 167,а), во втором, соответственно, кварцевый резонатор ZQ1 (рис. 168,а). Эти элементы и задают частоту установившихся автоколебаний.

В генераторе с мостом Вина (рис. 167,а) цепь VD1-E1, включенная на его выходе, играет роль стандартного ограничителя уровня выходных колебаний (см. § 2.3), выключение этой цепи приводит к переходу генератора из синусоидального в релаксационный режим.

Параметры кварцевого резонатора в схеме на рис. 168,а задаются в формате: XTAL(1MEG,35,50000).

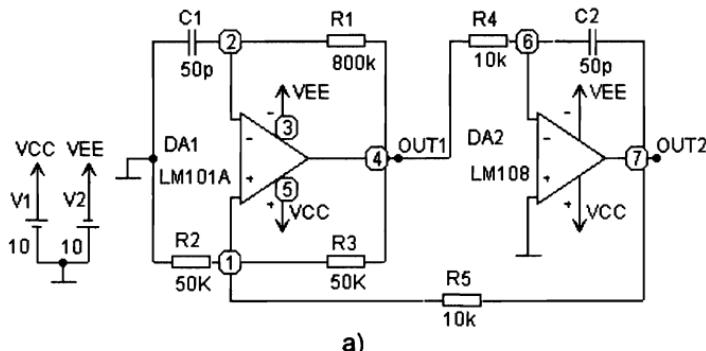


a)

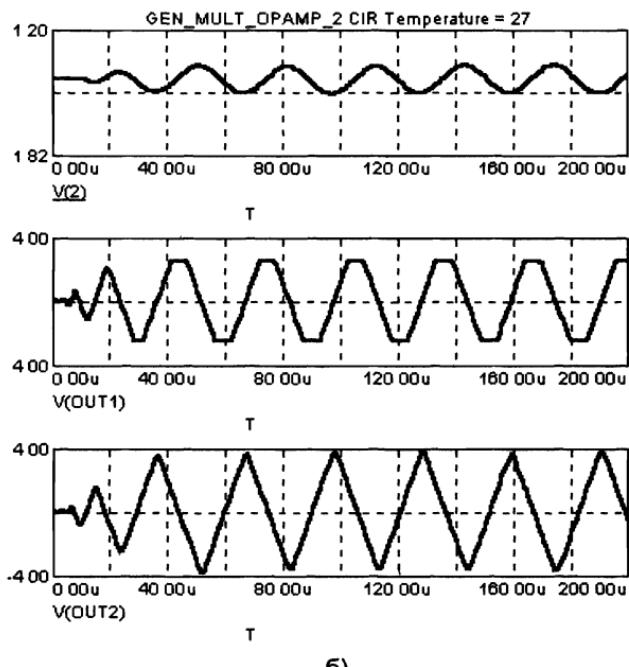


б)

Рис. 165. Генератор прямоугольных импульсов на ОУ (МС)

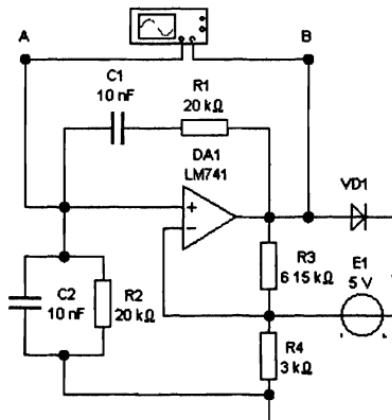


а)

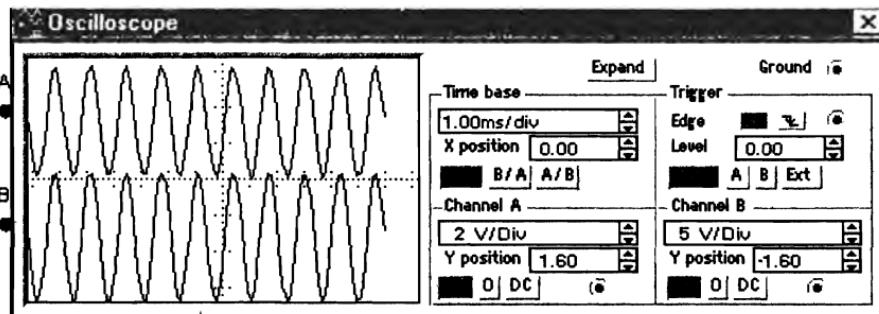


б)

Рис. 166. Функциональный генератор (МС)

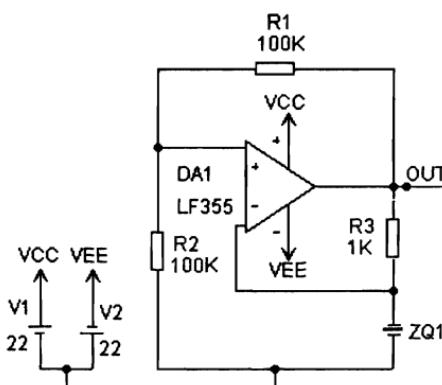


а)

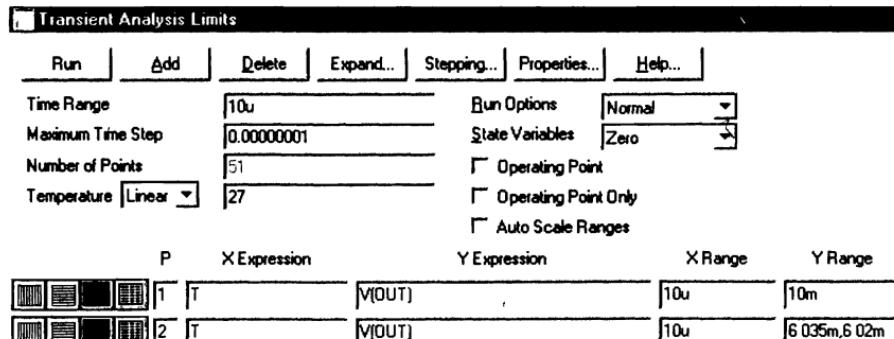


6)

Рис. 167. Генератор на ОУ с мостом Вина (EWB)



a)



6)

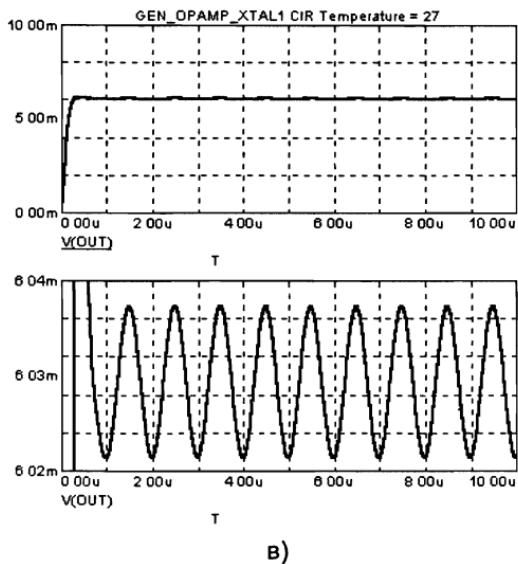


Рис 168. Кварцевый генератор на ОУ (**МС**)

При включении стандартного файла на схеме появляется также такой текст: . RELTOL=1E-4. Это дополнительная установка опции (OPTIONS) относительного (RELATIONAL) допуска (TOLERANCE), т. е. точности расчетов при численном анализе. Другое ее задание, принятое по умолчанию содержитя в диалоговом окне глобальных установок (Global Setting). На практике же проще всего подбирать необходимую точность по виду кривых путем изменения, временного шага (Maximum Time Step) в соответствующем окне (рис. 168,б). Для этого просто надо «набивать» нули после запятой и следить за результатом, соблюдая необходимую меру.

В программе **МС** есть и еще одна особенность: если масштаб начала переходного процесса и основных колебаний не соизмерим, то их можно и не увидеть. Это показано на верхней осциллограмме рис. 168,б. Необходимо выйти из автоматического режима и специально задать по оси ординат интервал, максимально приближенный к размаху колебаний (см. запись на рис. 168,б в правом нижнем углу), тогда и получится картина, показанная на нижней осциллограмме рис. 168,в.

5.4. Активные фильтры

Даже усиленное изучение теории активных фильтров само по себе не заставит работать фильтр.

Г. Мошиц, П. Хорн.

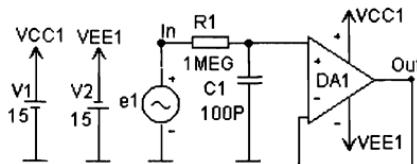
Проектирование активных фильтров

Частотная фильтрация относится к одной из основных аналоговых операций в обработке сигналов (наряду с усилением, ограничением, перемножением и сравнением). Рассмотренные выше пассивные фильтры из R-L-C элементов, обладают рядом недостатков. При переходе к интегральным технологиям для радиоэлектронных устройств, работающих в диапазоне примерно до 50 МГц, остро встал вопрос об исключении индуктивных катушек из частотно-избирательных цепей: по своим массово-габаритным характеристикам они явно не вписывались в микроминиатюризацию. И тут конструкторы опять использовали уникальные возможности ОУ. Были разработаны фильтры, названные активными, так как их основу составлял активный усилитель, дополняемый RC-цепями. Рассмотрим схемы некоторых активных фильтров.

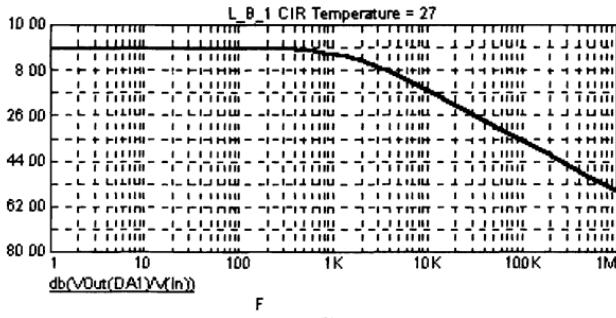
В программе **MC** соберем схему из повторителя на ОУ с интегрирующей RC-цепью на входе (рис. 169,а). АЧХ этой схемы, полученная в режиме стандартного анализа на переменном токе (рис. 169,б), показывает, что это ФНЧ-1 (здесь и далее сквозная цифровая индексация носит подсобный характер). Однако, роль ОУ в этой схеме невелика и это пока еще не совсем активный фильтр. Введем в схему еще один резистор и еще один конденсатор, выполнив на нем дополнительную ОС (рис. 170,а) и получим ее АЧХ (рис. 170,б). Последний фильтр уже относится к активным. Сравним приведенные АЧХ. Видно, что у активного ФНЧ-2 она спадает в переходной области от пропускания к задержанию в два раза круче. В случае же идеального фильтра она спадала бы вообще вертикально, наподобие «кирпичной стены» (по-английски, соответственно, *break walls*), как говорят радиоспециалисты «фильтровики».

В данных схемах использовалась модель идеального ОУ, при замене которой на модель реального ОУ, характеристика изменится, причем не в лучшую сторону (рис. 170,в). Это надо иметь в виду, анализируя приведенные ниже результаты и, занимаясь практической реализацией активных фильтров, когда проблема соотношения виртуального и реального сразу станет актуальной.

В программе **EWB** соберем такой же активный ФНЧ (рис. 171,а) и получим его АЧХ на Боде-плоттере (рис. 171,б). Здесь,

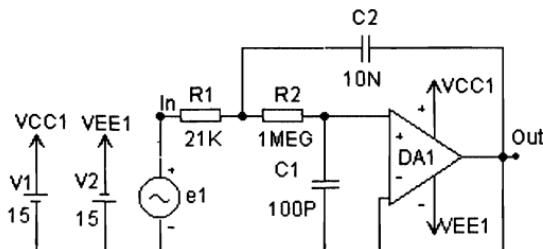


a)

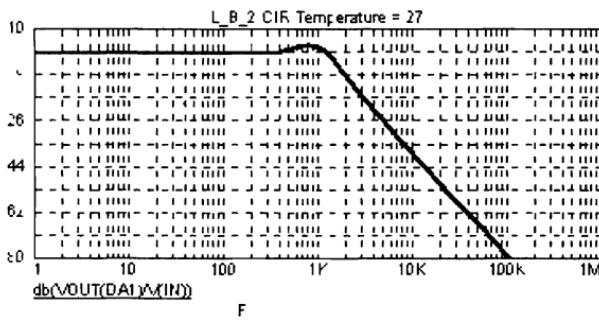


б)

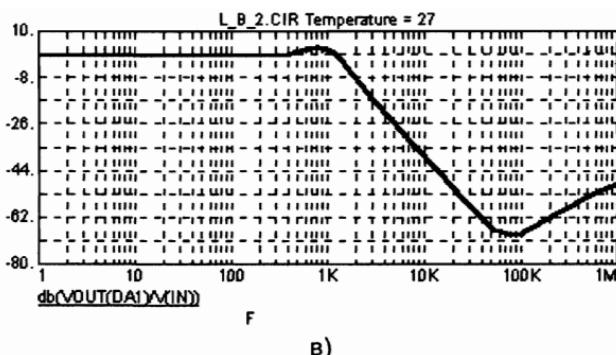
Рис 169 ФНЧ-1 с ОУ (MC)



a)

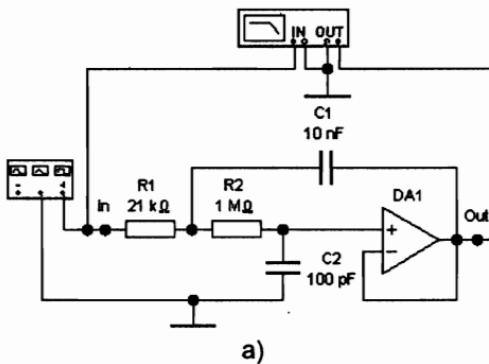


б)

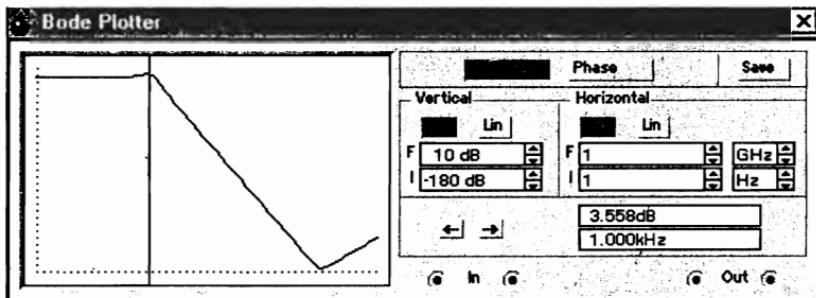


в)

Рис. 170. Активный ФНЧ-2 (МС)



а)



б)

Рис. 171. Активный ФНЧ (EWB)

несмотря на идеальность модели ОУ, в конце области задержания АЧХ имеет явное искажение.

Существуют различные параметры, по которым классифицируют активные фильтры. В 1955 г. ученые из Массачусетского технологического института Саллен и Кей опубликовали каталог, в котором провели схемотехническую классификацию фильтров,

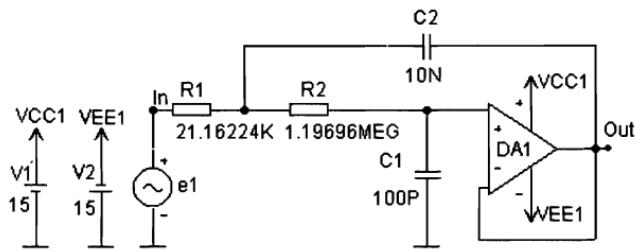
ставших каноническими. Активные фильтры, имеющие структуру типа показанной на рис. 170,а, называют фильтрами Саллена и Кея (Sallen-Key). Передаточная характеристика фильтра представляет собой сложную комплексную функцию, вид которой определяет его свойства. Вообще изложение теории фильтров требует применения специального математического аппарата, который, в силу специфики данной книги, в явном виде не показывается, и поэтому дадим лишь некоторые поясняющие замечания. Применяя различные математические выражения для аппроксимации, можно в той или иной степени приблизится к заветным кирпичным стенам. Фамилии ученых, именами которых названы аппроксимирующие полиномы, также входят в классификационное название типа фильтра. Остановимся на двух широко распространенных типах, Баттервортта (Butterworth) и Чебышева (Chebyshev). Кстати, фамилия замечательного русского математика и механика Пафнутия Львовича Чебышева, правильно произносится, как Чебышев. Фильтр Баттервортта дает максимально плоскую (равномерную) характеристику в полосе пропускания, а Чебышева – максимально крутой склон.

Если в рассмотренном выше ФНЧ-2 (рис. 171,а) со структурой Саллена и Кея специальным образом рассчитать параметры RC-цепи, так чтобы передаточная функция была полиномом Баттервортта и собрать соответствующую схему, то получится активный ФНЧ Баттервортта (рис. 172,а). Его АЧХ показана на рис. 172,б.

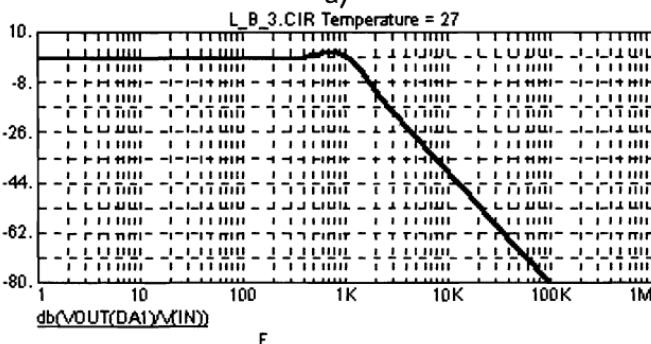
Соединив каскадно два подобных фильтра (как бы последовательно применяя две фильтрующие сетки) и пересчитав параметры резисторов выходного каскада, получим ФНЧ-4 (рис. 173,а) с характеристикой Баттервортта (рис. 173,б).

Описанная процедура проектирования фильтров изящно формализована в последних версиях программы **MC**.

Нажмем на главной панели этой программы кнопку Design (проектирование) и в выпавшем меню: Active Filters/Passive Filters, выбираем активные фильтры. Откроется основное окно для задания параметров (рис. 174,а), в верхней части которого выберем Type (тип) Low-Pass (низкочастотный) и Response (характеристика) Butterworth (Баттервортта). В области Type показана область выбора параметров, ограниченная идеальной «стеной из прямоугольных кирпичей». Здесь частота среза (Cutoff Frequency) обозначена как F_c (для ФНЧ это одновременно и полоса пропускания Passband), F_s – это Stopband, т. е. частота задержания (ослабления, подавления), R – Passband Ripple (размах пульсаций), A – Stopband Attenuation показывает величину ослабления. Способ задания требований к проектируемому фильтру определяется в

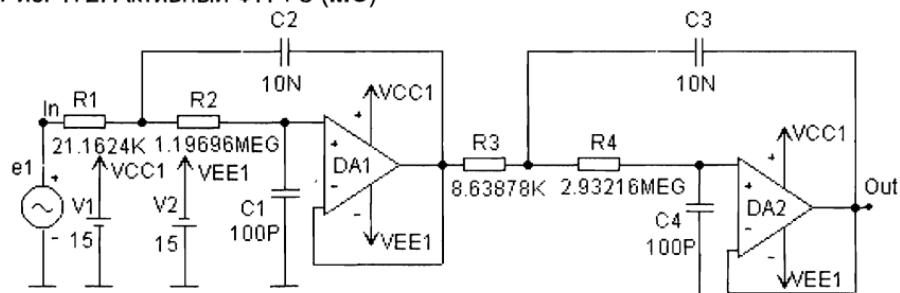


a)

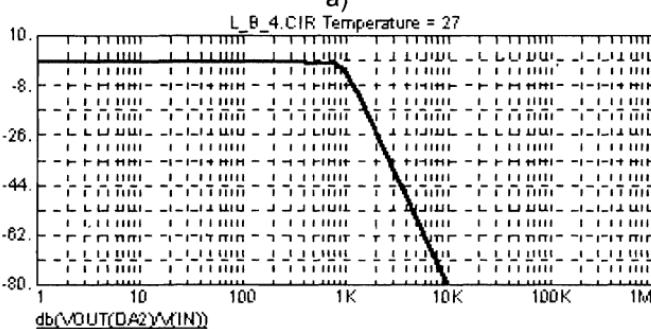


б)

Рис. 172. Активный ФНЧ-3 (MC)



a)



б)

Рис. 173. Активный ФНЧ-4 (MC)

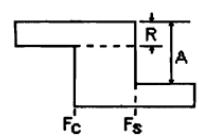
Active Filter Designer



Design | Implementation | Options |

Type

- Low-Pass
 High-Pass
 Bandpass
 Notch
 Delay



Response

- Butterworth 4
 Chebyshev 3
 Bessel 2
 Elliptic 2
 Inverse Chebyshev 3

Specifications

- Mode 1 Mode 2

Passband Gain	0	dB
Passband Ripple (R)	3.0103	dB
Stopband Atten. (A)	20	dB
Passband (Fc)	1000	Hz
Stopband (Fs)	2000	Hz

Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	1000	1.306562...	.
2	1000	0.541196...	.

Default

Plot

OK

Отмена

Справка

a)

Specifications

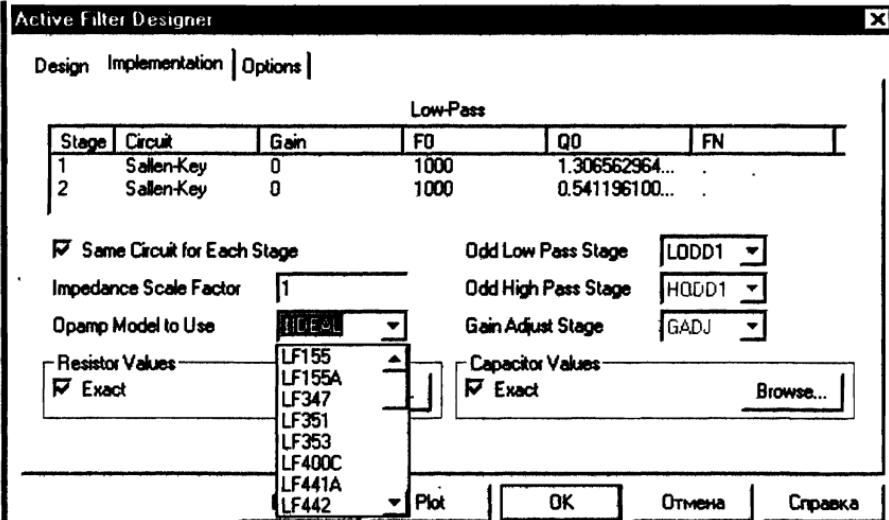
- Mode 1 Mode 2

Gain	0	dB
Passband	1000	Hz
Ripple	3.0103	dB
Order	2	

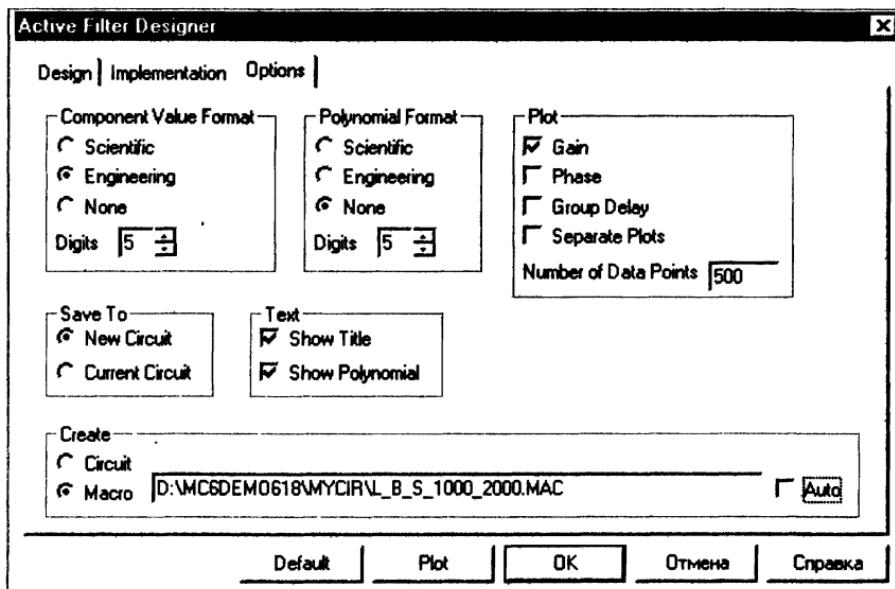
Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	1000	0.707106...	.

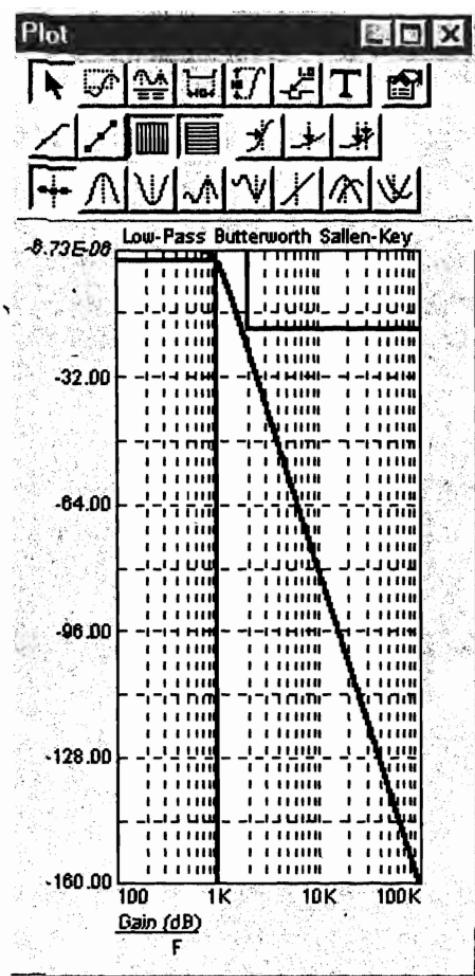
б)



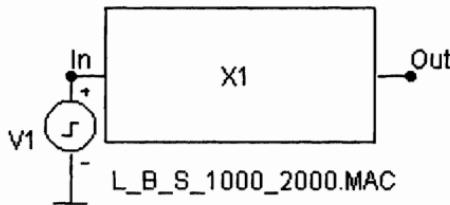
в)



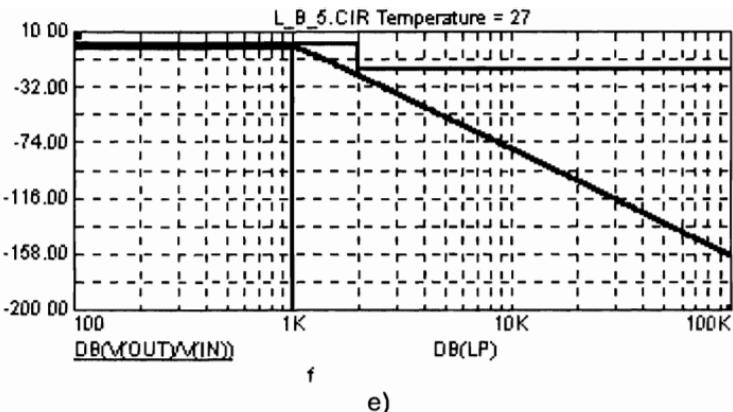
г)



д)



е)



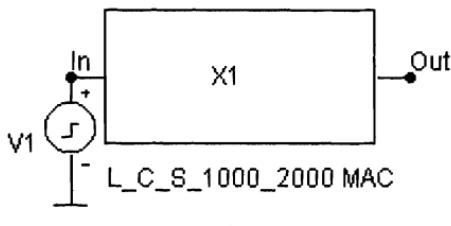
е)

Рис. 174. Проектирование активного ФНЧ Баттервортса (МС)

окошках Mode 1 или Mode 2 (рис. 174,б). Вид этих требований зависит от типа выбранного фильтра. Здесь же в окне Zeros and Poles получаются численные значения полюсов и нулей передаточной функции. Открыв далее в этом же окне следующую позицию Implementation (ввод), можно задать дополнительно ряд параметров фильтра (см. рис. 174,в). В том числе здесь можно выбрать схемную реализацию или заменить модель идеального ОУ, стоящую по умолчанию, на подходящий тип реального, воспользовавшись дополнительным окошком Opamp Model to Use. И наконец, перейдя к позиции Options (опции) можно дать необходимые команды по представлению результатов (см. рис. 174,г). Более подробные сведения содержатся в разделе программы Help (помощь).

Нажав на кнопку Plot (график) в нижней части окна, получим АЧХ спроектированного фильтра (рис. 174,д). Далее, нажав на кнопку OK, получим макромодель (Macros – макрос) этого фильтра в виде графического объекта X1 и файла L_B_S_1000_2000.MAC (рис. 174,е). В обозначении файла использованы начальные буквы слов: Low, Butterworth, Sallen, Macros, а также значения частот среза (1000) и задержания (2000). Для проверки работы нового схемного компонента на его вход надо подключить любой генератор переменного напряжения (рис. 174,в) и войти в меню анализа. Так, анализ на переменном токе дает ту же АЧХ (рис. 174,е). Свернув окно с макросом, получим принципиальную схему этого фильтра типа схемы, аналогичной рис.173,а.

Поступая соответственно методу проектирования, описанному выше, получим следующие фильтры Чебышева: ФНЧ (рис. 175), ФВЧ (рис. 176), полосно-пропускающий (рис. 177) и полосно-задерживающий (рис. 178, 179,180).



а)

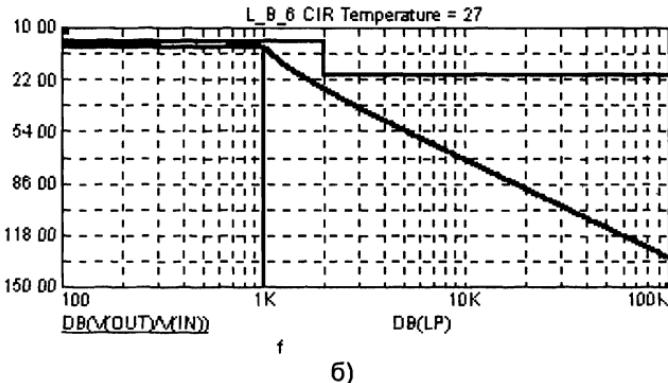


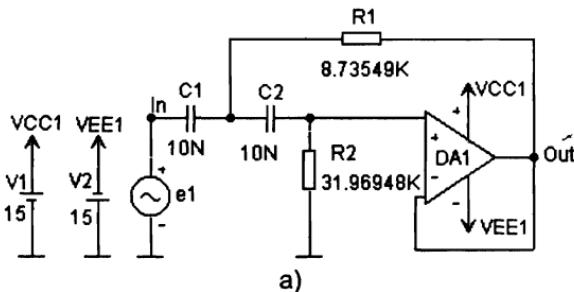
Рис 175 Активный ФНЧ Чебышева (МС)

Сопоставляя схему ФВЧ (рис. 176,а) со схемой ФНЧ (рис. 172,а), видим, что в них резисторы и конденсаторы как бы поменялись местами.

В схеме фильтра на рис. 179 использованы четыре каскада, каждый из которых представляет собой отдельный ПЗФ, пятый (выходной) каскад не фильтрующий, а играет роль согласующего.

Все эти вновь полученные схемные компоненты-фильтры можно далее использовать в других создаваемых схемах.

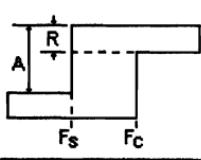
В программе **EWB** также можно собрать схемы разнообразных активных фильтров, воспользовавшись имеющимися в литературе разработками. Используя режим вариации параметров, можно провести оптимизацию их характеристик. Кроме того, в библиотечных файлах ранних версий этой программы имеются примеры различных активных фильтров, которые также было бы не бесполезно просмотреть.



a)

Type

- Low-Pass
 High-Pass
 Bandpass
 Notch
 Delay

**Response**

- Butterworth 4
 Chebyshev 3
 Bessel 2
 Elliptic 2
 Inverse Chebyshev 3

Specifications

	<input checked="" type="radio"/> Mode 1	<input type="radio"/> Mode 2
Passband Gain	0	dB
Passband Ripple (R)	3.01029995	dB
Stopband Atten. (A)	20	dB
Passband (Fc)	2000	Hz
Stopband (Fs)	1000	Hz

Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	1831.748...	3.073033...	.
2	6710.602...	.	.

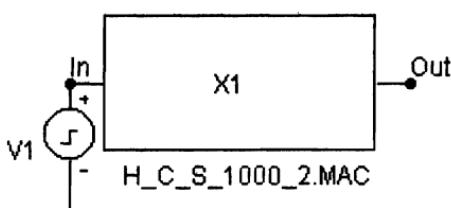
Specifications

	<input checked="" type="radio"/> Mode 1	<input type="radio"/> Mode 2
Gain	0	dB
Passband	1000	Hz
Ripple	1	dB
Order	2	

Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	1050.004...	0.956520...	.

b)



b)

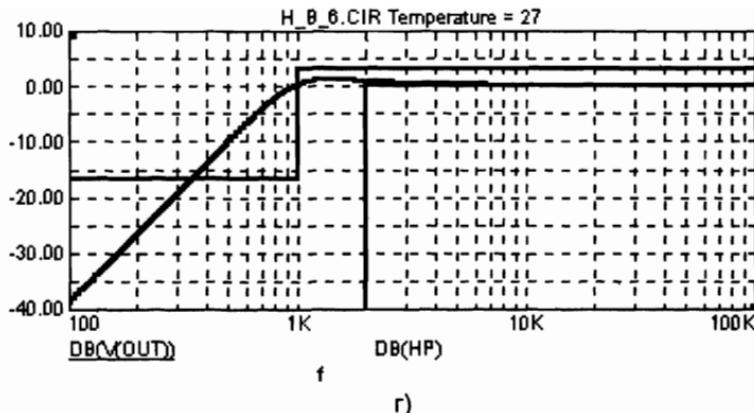


Рис. 176. Активный ФВЧ Чебышева (MC)

Type

- Low-Pass
- High-Pass
- Bandpass
- Notch
- Delay

Response

- Butterworth 4
- Chebyshev 3
- Bessel 2
- Elliptic 2
- Inverse Chebyshev 3

Specifications

<input checked="" type="radio"/> Mode 1	<input type="radio"/> Mode 2
Passband Gain	0 dB
Passband Ripple (R)	3.01029995 dB
Stopband Atten. (A)	20 dB
Center Freq. (Fc)	1000 Hz
Passband (PB)	100 Hz
Stopband (SB)	200 Hz

Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	954.5860...	67.09064...	.
2	1044.955...	67.09064...	.
3	998.7492...	33.51104...	.

Specifications

<input type="radio"/> Mode 1	<input checked="" type="radio"/> Mode 2
Gain	0 dB
Center Frequency	1000 Hz
Ripple	1 dB
Order	2
Q	10

Poles and Zeros

Stage	F0	Q0	FN
1	954.7507...	18.12348...	.
2	1044.748...	18.12348...	.

a)

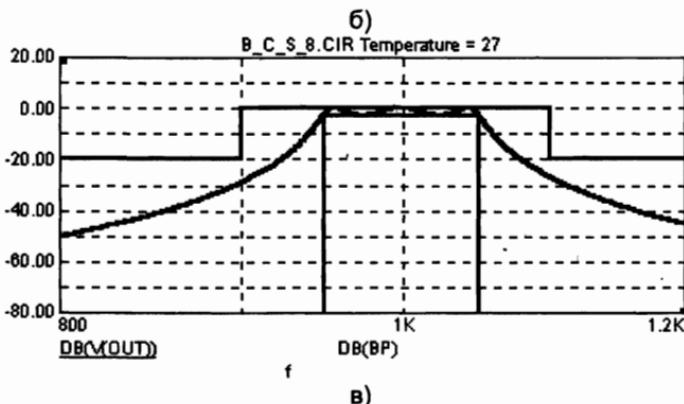
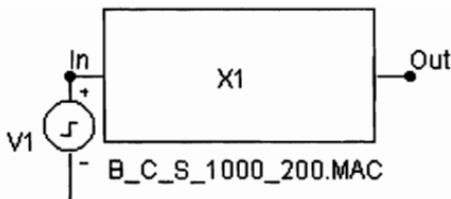


Рис. 177. Активный ППФ Чебышева (МС)

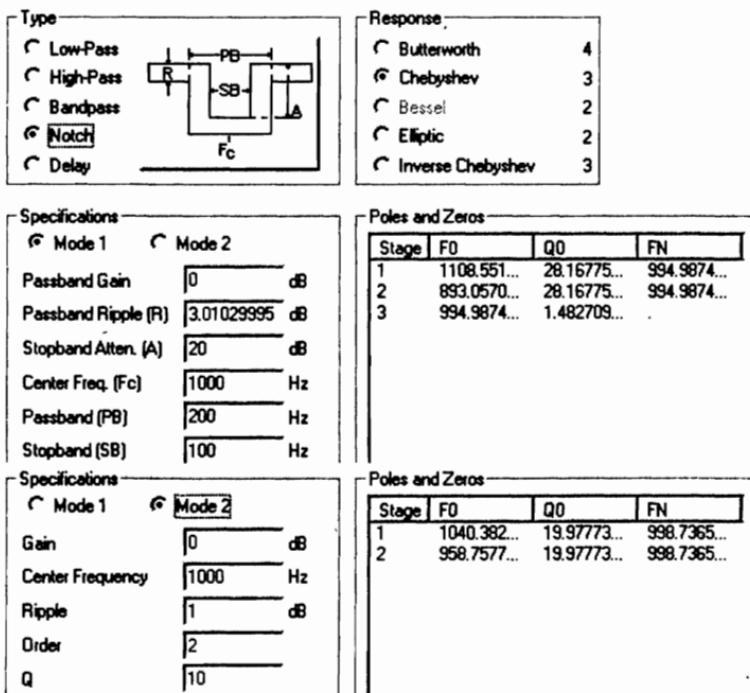


Рис. 178. Окно проектирования активного ПЗФ Чебышева (МС)

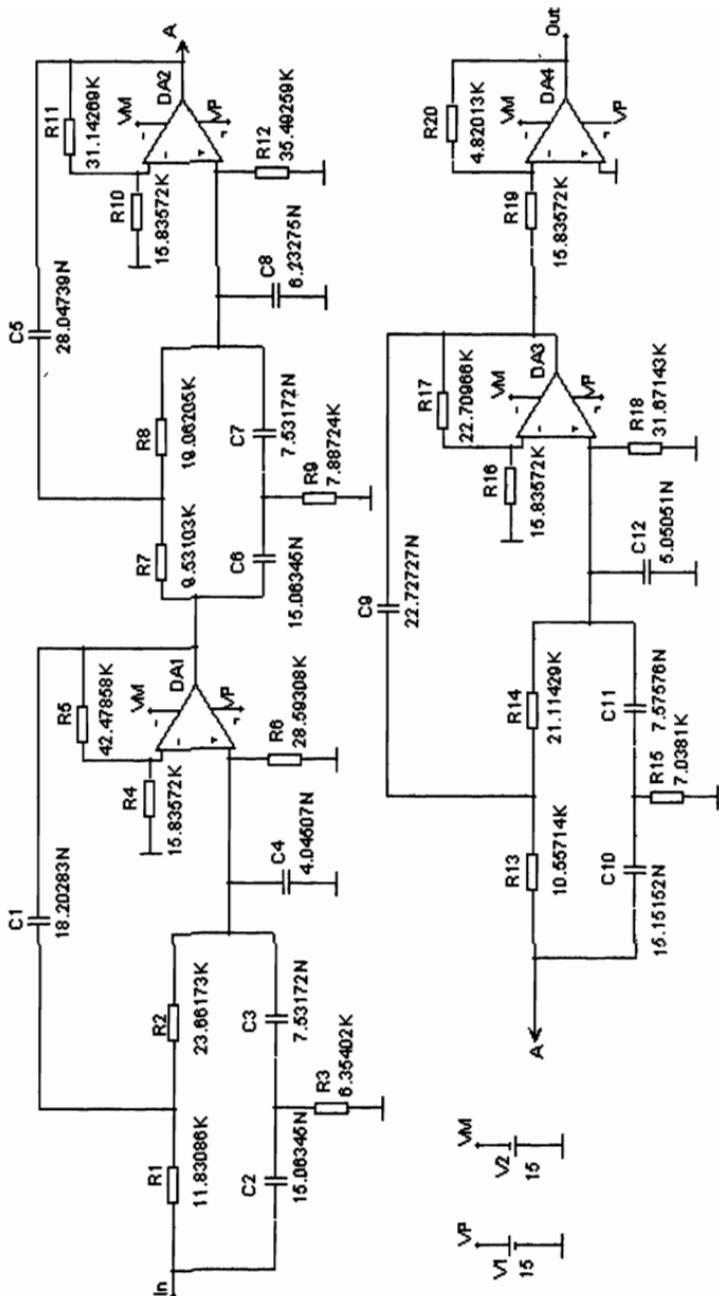
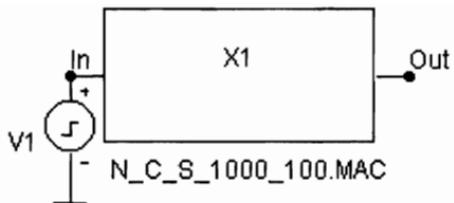
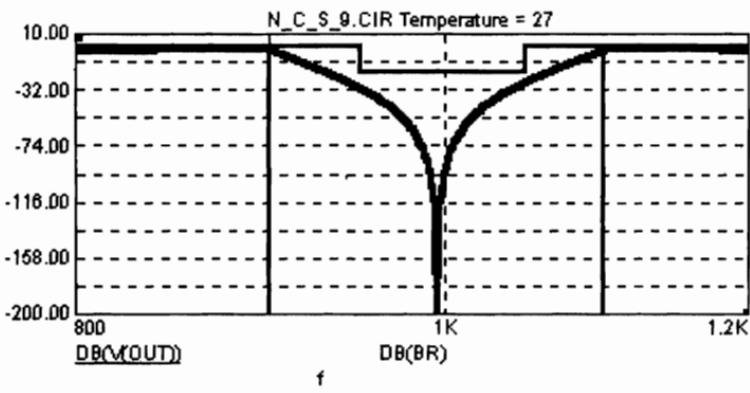


Рис. 179. Принципиальная схема активного ПЗФ Чебышева (MC)



a)



б)

Рис. 180. АЧХ активного ПЗФ Чебышева (МС)

Список основных сокращений, принятых в книге

- АРК – английская раскладка клавиатуры
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
ВАХ – вольтамперная характеристика
ВР – виртуальная реальность
ГСТ – генератор стабильного тока
ДК – дифференциальный каскад
ИМС – интегральная микросхема
ЛКМ – левая кнопка мыши
ООС – отрицательная обратная связь
ОС – обратная связь
ОУ – операционный усилитель
ОЭ – общий эмиттер
ПКМ – правая кнопка мыши
ПОС – положительная обратная связь
УГО – условное графическое обозначение
УПТ – усилитель постоянного тока
ФВЧ – фильтр высокой частоты
ФНЧ – фильтр низкой частоты
ФЧХ – фазочастотная характеристика
ЭДС – электродвижущая сила
• • •
AC – alternate current (переменный ток)
DC – direct current (постоянный ток)
EWB – Electronics Workbench (название программы)
MC – Micro-Cap (название компьютерной программы)
OK – okay («хорошо» – подтверждение команды)
Op Amp – operational amplifier (операционный усилитель)
• • •
Г, G – гига, 10^9
М, Meg – мега, 10^6
к, к – кило, 10^3
м, м – милли, 10^{-3}
мк, μ, и – микро, 10^{-6}
н, н –nano, 10^{-9}
п, р – пико, 10^{-12}

Список литературы

1. Гейтс Эрл Д. Введение в электронику. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. – 640 с.
2. Горохов П.К. Толковый словарь по радиоэлектронике. – М.: Рус. яз., 1993. – 246 с.
3. Джонс М.Х. Электроника – практический курс: Пер с англ. – М.: Постмаркет, 1999. – 528 с.
4. Достал И. Операционные усилители: Пер с англ. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
5. Евсеев Ю.А., Крылов С.С. Симисторы и их применение в бытовой электротехнической аппаратуре. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 120 с.
6. Завадский В.А. Компьютерная электроника. – Киев: ВЕК, 1996. – 368 с.
7. Ибрагим К.Ф. Основы электронной техники: Пер с англ. – М.: Мир, 1997. – 398 с.
8. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с.
9. Кауфман М., Сидман А.Г. Практическое руководство по расчетам схем в электронике: Справочник. В 2-х т. Т. 1: Пер с англ. – М.: Мир, 1991. – 368 с.
10. Мукосеев В.В., Сидоров И.Н. Маркировка и обозначение радиоэлементов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 352 с.
11. Мэндл М. 200 избранных схем электроники: Пер с англ. – М.: Мир, 1980. – 344 с.
12. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Горячая линия – Телеком, 1999. – 768 с.
13. Радиосвязь для всех / В.В. Щербаков, И.Н. Киселев А.Н. Коваль и др. – М.: Ассоциация-27, 1996. – 160 с.
14. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). – М.: СК Пресс, 1996. – 272 с.
15. Разевиг В.Д. Система схемотехнического проектирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
16. Рутковски Дж. Интегральные операционные усилители: Пер с англ. – М.: Мир, 1978. – 323 с.
17. Сворень Р.А. Электроника шаг за шагом: Практическая энциклопедия юного радиолюбителя. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. – 540 с.
18. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 384 с.
19. Тули М. Карманный справочник по электронике: Пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 176 с.
20. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей: Избр. тр. в 3-х т.: Т. 1. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
21. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х т.: Т1.: Пер с англ. – М.: Мир, 1993. – 413 с.
22. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Сов. радио, 1979. – 368 с.
23. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум по Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. В 2 т. – М.: Додэка, 1999 – 2000.
24. Каталог: Электронные наборы и модули «Мастер Кит».

Содержание

Предисловие.....	3
1. ВИРТУАЛЬНАЯ СХЕМОТЕХНИКА.....	3
1.1. Моделирование.....	5
1.2. Цепи и схемы.....	8
1.3. Схемы на компьютере.....	11
1.4. Структура схем.....	28
1.5. Сигналы.....	61
2. ДИОДНЫЕ СХЕМЫ.....	75
2.1. Диоды.....	75
2.2. Выпрямители.....	85
2.3. Стабилизаторы и ограничители напряжения.....	96
3. ТИРИСТОРНЫЕ СХЕМЫ.....	108
3.1. Тиристоры	108
3.2. Регуляторы напряжения.....	123
4. ТРАНЗИСТОРНЫЕ СХЕМЫ.....	130
4.1. Транзисторы.....	130
4.2. Усилители переменного тока.....	143
4.3. Генераторы	170
4.4. Усилители постоянного тока	185
5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ.....	191
5.1. Операционные усилители.....	191
5.2. Операционные схемы.....	219
5.3. Генераторы на ОУ.....	235
5.4. Активные фильтры.....	243
ПРИЛОЖЕНИЕ. Список основных сокращений.....	258
Список литературы.....	259

Научно-популярная литература

Массовая радиобиблиотека. Выпуск 1251

Кардашев Генрих Арутюнович

ВИРТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Компьютерное моделирование аналоговых устройств

Редактор И. Алексеева

Обложка художника В. Ситникова

ЛР № 000000 от 00 2001 г.

Подписано в печать 20.10.01

Гарнитура Arial

Тираж 5 000 экз

Формат 60x88/16

Печать офсетная

Изд. № 67

Бумага газетная

Уч.-изд. 16,5

Зак. № 338

Вышли в свет и поступили в продажу книги:

Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6.

Представлена последняя версия руководства по применению популярной системы схемотехнического моделирования на персональных компьютерах с помощью которой выполняется графический ввод проектируемой схемы, анализ характеристик аналоговых, цифровых и смешанных аналого-цифровых устройств. Рассмотрена методика анализа нелинейных схем по постоянному току, расчет переходных процессов и частотных характеристик. Обсуждается взаимодействие с программой схемотехнического моделирования Pspice и программами для разработки печатных плат P-CAD 2000, OrCAD и Protel. Включены также средства синтеза пассивных и активных аналоговых фильтров, средства моделирования функциональных схем аналоговых и цифровых устройств, возможности анимации цифровых устройств и построение 3-мерных графиков результатов моделирования.

Для инженерно-технических работников, занимающихся схемотехническим проектированием аналоговых и цифровых устройств радиоэлектроники и автоматики, студентов электро- и радиотехнических специальностей технических университетов, может быть полезна радиолюбителям.

Пескин А.Е., Войцеховский Д.В., Коннов А.А. Современные зарубежные цветные телевизоры: видеопроцессоры и декодеры цветности. 2-е издание.

Подробно рассмотрены микросхемы, выполняющие роль видеопроцессоров и декодеров цветности в современных зарубежных цветных телевизорах. Приведены структурные схемы, поясняющие работу микросхем, а также принципиальные схемы, иллюстрирующие способы их включения в конкретных моделях зарубежных цветных телевизоров. Даны сведения, необходимые для успешного ремонта и регулировки телевизоров.

Для подготовленных радиолюбителей

Шило В.Л. Популярные микросхемы КМОП: Справочник.

В справочнике приведено 125 типов отечественных и зарубежных микросхем КМОП. Рассмотрены логические элементы, триггеры, счетчики, регистры и более сложные микросхемы средней степени интеграции. Даны структурные схемы, параметры, цоколевки, а также новые схемные решения.

Для радиолюбителей, может быть полезен студентам, специалистам, занимающимся разработкой, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры.

**Приобрести эти книги можно через почтовое агентство DESSY
107113, г. Москва, а/я 10,**

а так же через интернет-магазины

www.dessy.ru

www.top-kniga.ru

**С авторскими предложениями просим обращаться по
e-mail: radios@cityline.ru**



[www.chip-dip.ru](http://www(chip-dip.ru)

Чип и Дип поставляет электронные компоненты и приборы для инженеров-разработчиков, конструкторских бюро, опытного и мелкосерийного производства, служб эксплуатации и ремонта, сервисных центров и учебных заведений.



РОССИЯ 129110 г. Москва, а/я 996
e-mail: sales@chip-dip.ru

Оптовый офис
г. Москва,
ул Гиляровского, 39
Тел/факс: (095)973-70-73
(многоканальный)
факс: (095)971-31-45

Магазины:
Центральный: г. Москва
ул. Беговая, 2
с 09.00 до 19.30
суббота до 18.00
Тел. для справок (095)284-56-78,
284-36-69, 281-99-17, 971-18-27

г. Москва,
ул. Гиляровского, 39
с 09.00 до 19.30
суббота до 18.00
Тел. для справок (095)284-56-78,
284-36-69, 281-99-17, 971-18-27

г. Москва
ул. Ивана Франко,
д.40, к.1, стр.2
Тел.: (095)417-33-55
e-mail: dlpkorpus@platan.ru

г. С.-Петербург,
Кронверкский просп. 73
Тел. (8 12)232-83-06, 232-59-87

г. Ярославль пр. Ленина, 8а
Тел.: (0852) 80-15-68
e-mail: chip-dip@yelkor.ru



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

т.л. факс: (095) 731-66-99
<http://www.platan.ru>