

# **Лабораторная работа № 14**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДНОГО ДЕТЕКТОРА**

### **1 Цель работы**

Изучение физической модели диодного амплитудного детектора (АД) последовательного типа на основе реально используемой принципиальной схемы, определение основных технических характеристик АД и влияние на них параметров схемы с использованием системы схемотехнического проектирования Micro Cap 8.

### **2 Задание**

#### **2.1 Экспериментальная часть**

Для компьютерной модели последовательного диодного амплитудного детектора, содержащего оконечный каскад усилителя промежуточной частоты (рис. 14.1) получить:

**2.1.1.** Амплитудно-частотную характеристику резонансного усилителя без учета влияния детектора и резонансную характеристику нагруженного усилителя. Определить значение полосы пропускания для обоих случаев.

**2.1.2.** Характеристики детектирования для различных значений сопротивления нагрузки детектора ( $R_6 = 1 \text{ кОм}, 5 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}$ ).

**2.1.3.** Временные зависимости тока диода детектора и напряжения на нагрузке детектора и соответствующие им спектры при воздействии на входе усилителя немодулированного сигнала для величин компонентов, указанных на рис. 14.1.

**2.1.4.** Временные зависимости напряжения на входе детектора, тока диода детектора, напряжения и его спектра на нагрузке детектора при воздействии на входе модулированного сигнала. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на указанные характеристики ( $R_6 = 1 \text{ кОм}, 5 \text{ кОм}, \infty$ ).

### **3 Описание принципиальной схемы детектора**

Исследуются свойства диодного амплитудного детектора последовательного типа, подключенного к каскаду усилителя промежуточной частоты резо-

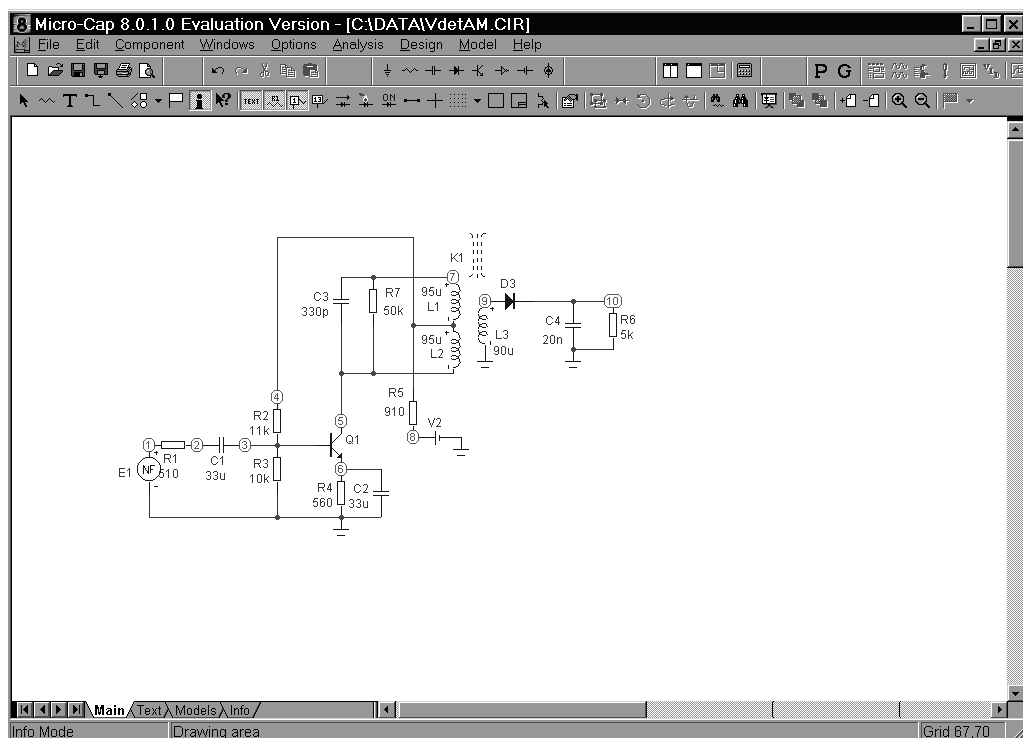


Рис. 14.1

нансного типа (рис. 14.1). Усилительный каскад реализован на транзисторе КТ 316 В (Q1), включенного по схеме с общим эмиттером. Резисторы R2 и R3, являясь делителем напряжения источника питания, создают требуемую величину напряжения между базой и эмиттером, вместе с резистором R4. Резистор R4 является одновременно сопротивлением, обеспечивающим стабилизацию режима по постоянному току транзистора за счет отрицательной обратной связи (вместе с резистором R3). Включенный параллельно ему конденсатор C2 устраняет возникновение отрицательной обратной связи по переменному току. Это позволяет, при некотором ухудшении частотных свойств усилителя, получить больший коэффициент усиления каскада, сохраняя высокую стабильность режима работы транзистора. Нагрузкой каскада является колебательный контур, с учетом внесенных в него, комплексного сопротивления детектора и выходного сопротивления транзистора. Резонансная частота нагруженного контура равна стандартной частоте усилителей промежуточной частоты радиовещательных приемников АМ сигналов — 465 кГц. Транзистор подключен к колебательной системе с коэффициентом включения 0,5, что снижает влияние, изменяющихся под действием внешних факторов, параметров транзистора на характеристики колебательного контура.

По этой же причине детектор подключен к колебательному контуру каскада усилителя промежуточной частоты через катушку связи L3. Так как элементы колебательного контура L1 и L2 и C3 не обладают потерями, то для получения реальной добротности и конечной полосы пропускания, примерно

10 кГц, в контур включен резистор R7, являющийся эквивалентным сопротивлением контура на резонансной частоте. Резистор R5 вместе с резистором R4 служат для получения заданного значения напряжения на коллекторе  $U_{кз0}$  (5 В) и коллекторного тока  $I_{к0}$  (4,5 мА).

Конденсатор C1 выполняет роль разделительного конденсатора, а резистор R1 — выходного сопротивления предыдущего каскада (внутреннее сопротивление источника сигнала).

Нагрузкой детектора, реализованного на диоде Д9В, является параллельное соединение C4 и R6, являющееся фильтром низкой частоты.

Источником питания служит независимый источник постоянного напряжения (V2) величиной 12 В.

На вход исследуемой схемы может подключаться источник гармонического или амплитудно-модулированного сигнала.

## 4 Методические указания по выполнению работы

### 4.1 Машинное моделирование

Компьютерное моделирование проводится с использованием системы схемотехнического моделирования Micro-CAP8.

Предполагается, что:

- студенты знакомы с основами работы операционной системы WINDOWS 98 (или более поздними версиями);
- имеют доступ к сети INTERNET и в состоянии по, указанному в п. 7 настоящего описания, адресу получить инсталляционные файлы студенческой версии программы mc8demo.exe или приобрести эту программу на CD дисках.

Демонстрационная версия содержится в ZIP-файле (ее можно раскрыть программой PKUNZIP). Запуск программы осуществляется программой SETUP.EXE. После завершения установки формируется папка Micro Cap8 Working Demo для быстрого запуска MC8. В подкаталог MC8demo\data заносятся файлы схем, имеющие расширение .CIR, и библиотеки математических моделей компонентов в файлах с расширением .LBR.

После установки и запуска программы mc8demo.exe в верхней части экрана монитора появляется окно главного меню с панелью команд (рис. 14.2).

Меню главного окна представлено второй строчкой сверху. Оно состоит из команд: File, Edit, Components, Windows, Options, Analysis, Help. Верхняя строчка главного окна в подкаталоге \DATA укажет имя, присвоенное ЭВМ или, назначенное Вами, вводимой схемы с расширением .CIR, которое используется для описания схемы во внутреннем формате MC8 (вначале ЭВМ присваивает формируемой схеме имя CIRCUIT с некоторым порядковым номером, которое при выходе из программы можно заменить на любое другое).

Применяемые в принципиальной схеме наиболее часто встречающиеся компоненты (конденсаторы, резисторы, индуктивности) выбираются курсором (рис. 14.2) в строке основных компонентов, активируются левой кнопкой (например, резистор) мыши и затем помещаются в выбранном месте главного окна при повторном нажатии на левую кнопку. Удерживая нажатой левую

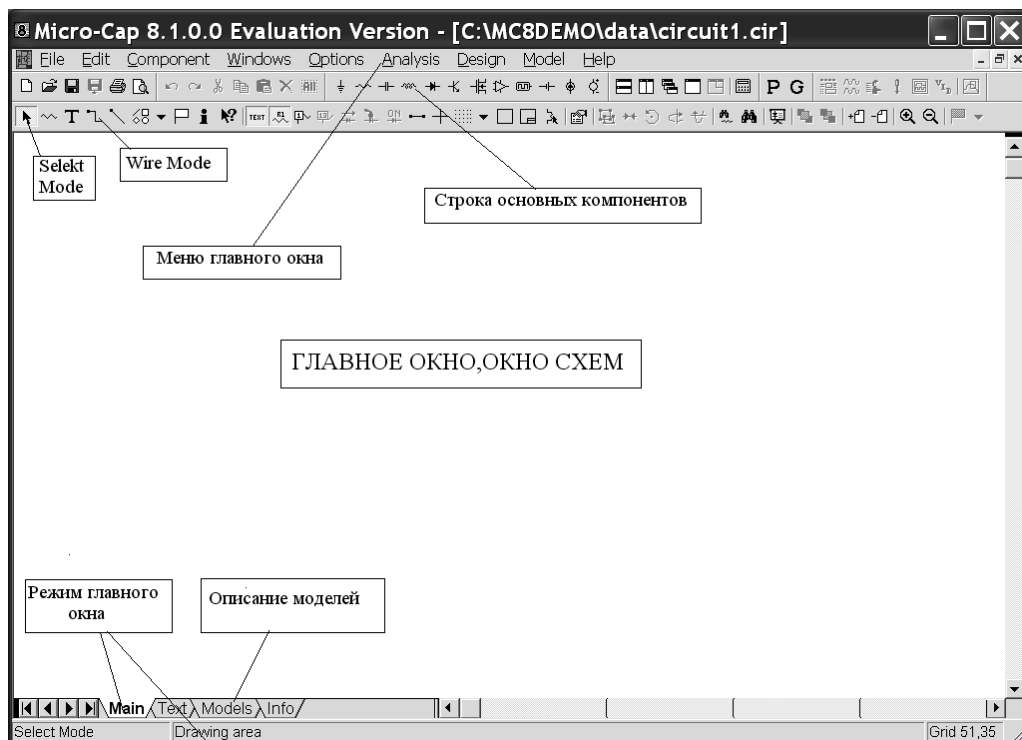


Рис. 14.2

кнопку можно вращать компонент, щелкая правой. При отпускании левой кнопки местоположение компонента фиксируется и на ниспадающем меню Resistor предлагается присвоить ему позиционное обозначение (PART), указать его величину (VALUE), а так же другие, не используемые при выполнении лабораторной работы, параметры. Присвоенные значения могут изображаться вместе с компонентом в главном окне, если подсвеченный параметр помечен галочкой Show (рис. 14.3). При вводе значения параметров допускается использование масштабных коэффициентов:

Таблица 1

Значение	6 10	3 10	-3 10	-6 10	-9 10	-12 10	-15 10
Префикс	MEG	K	M	U	N	P	F
Степ. форма	10E+6	10E+3	10E-3	10E-6	10E-9	10E-12	10E-15

Масштабный коэффициент может содержать и другие дополнительные символы, которые программа игнорирует. То есть величина емкости, например, 5 пФ может быть введена: 5 PF или 5 P, или 5E-12.

Подтверждением окончания ввода любого компонента является нажатие кнопки ОК. Если неверно введены какие-либо сведения, то нажатие кнопки Cancel отменяет всю введенную информацию о компоненте.



Рис. 14.3

При необходимости коррекции отдельных элементов принципиальной схемы необходимо сначала его удалить. Для этого вначале активизируют режим редактирования элементов и компонентов схемы (Select Mode, рис. 14.2). Затем, подведя курсор к компоненту, нажать левую кнопку мыши. При этом подсвечивается, обычно зеленым светом, компонент или соответствующий текст на принципиальной схеме и затем, войдя в меню EDIT, на выпадающем подменю выбирают CUT (рис. 14.4) и удаляют необходимый атрибут схемы. Альтернативным вариантом при удалении компонентов является применение пиктограммы CUT (или Ctrl-X) на панели инструментов (ножницы), которая активизируется только при нажатии кнопки Select Mode (рис. 14.2).

Ввод транзистора KT 316 В n-p-n типа осуществляется пиктограмму символа транзистора левой кнопкой мыши на панели основных компонентов (рис. 14.2). На выпадающем справа меню (рис. 14.5) NPN:NPN Transistor рамка с названием Name и выключателем справа (Show, помечен галочкой) выводит в окне схем сообщение о том, что это позиционное обозначение (PART). Одновременно в окне Value указывается предлагаемое к вводу в окно схем название компонента (транзистора) и при нажатом выключателе они отображаются в окне схем.

В рамке Display выключателями задаются условия отображения в окне схем компонента: с помеченными выводами (Pin Markers), названиями выводов (Pin Names) или пронумерованными выводами (Pin Numbers). Мы ограничимся лишь выводом на экран токов (Currents), значением мощности (Powers) и условий эксперимента (Conditions). Поочередно активизируя строки в высвеченном окне Part, Value и, соглашаясь с предложенными названиями компонентов или игнорируя их (например, можно пропустить строку Value); в строке MODEL указываем тип транзистора.

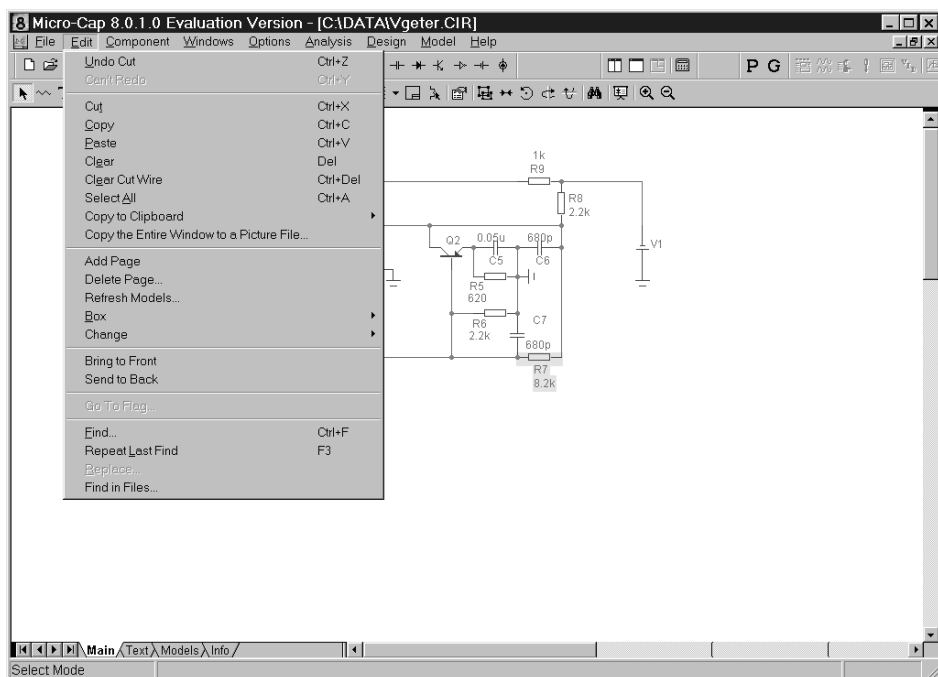


Рис. 14.4

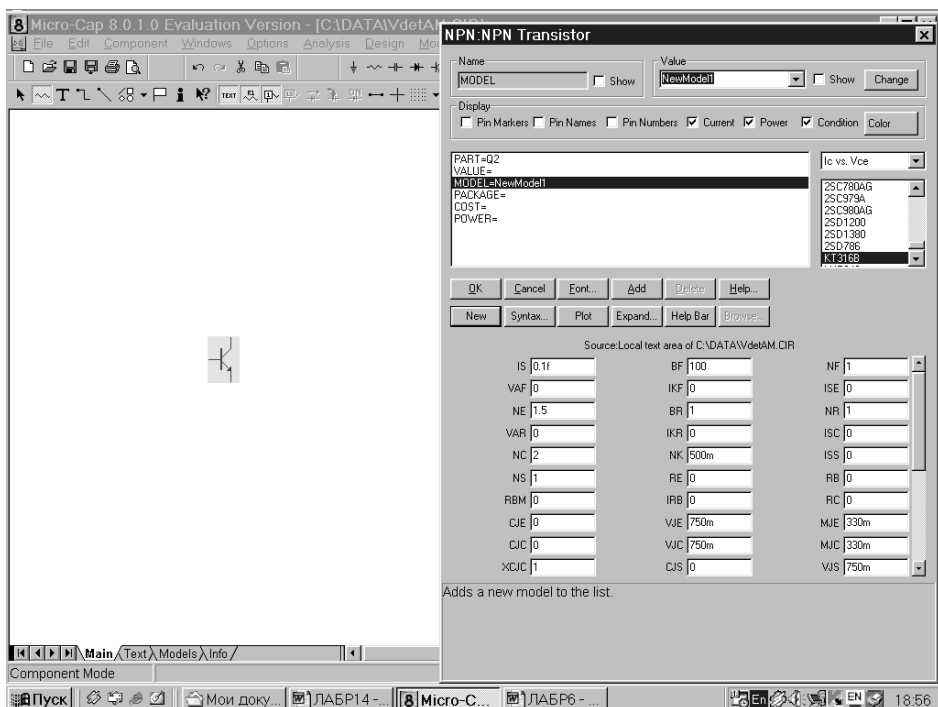


Рис. 14.5

Поскольку в библиотеке MC8 нет отечественных транзисторов, то необходимо ввести параметры модели Гумеля — Пуна транзистора KT316B, представляемых в массиве Source: Local text area of C:\DATA\VdetAM.CIR (рис. 14.5).

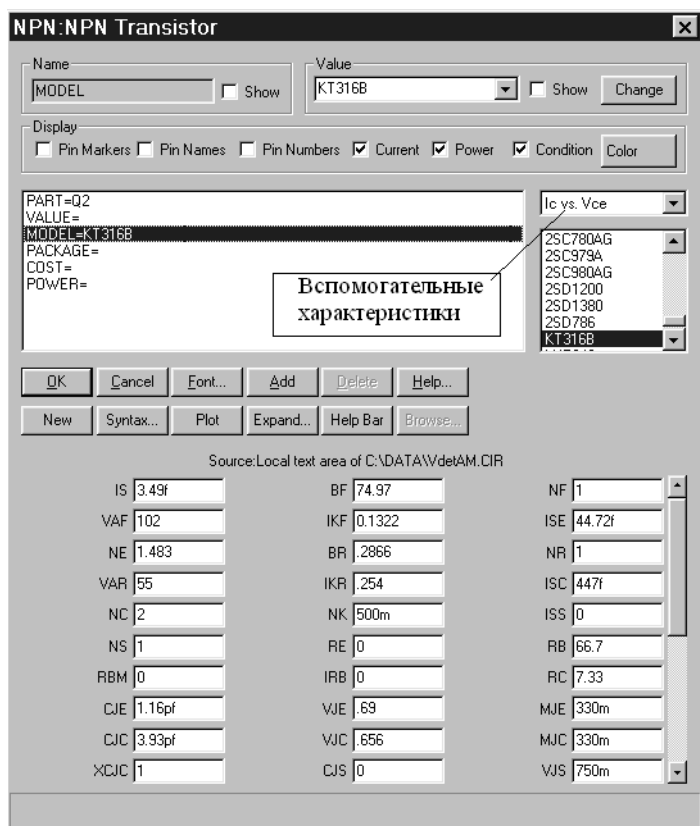


Рис. 14.6

Для этого, после ввода позиционного обозначения транзистора (PART), характеристики, определяющей активный режим (VALUE, можно не вводить), выбирается строка MODEL и нажатием на кнопку NEW осуществляется переход в режим ввода параметров новой модели транзистора. В строке MODEL появляется надпись New Model1, что дублируется в верхней строке Value. Находящийся там курсор позволяет ввести, выбранный Вами в колонке справа тип транзистора или ввести новый. При отсутствии там транзистора KT316B (используйте линейку прокрутки), введя в рамке Value тип транзистора (KT316B) затем приступайте к редакции параметров модели Гумеля — Пуна биполярного транзистора, описанного в таблице параметров. Помещая курсор в одном из окон массива: Source: Local text area of C:\DATA\VdetAM.CIR, активизируем его левой кнопкой мыши. Здесь VdetAM — имя файла, используемого для ввода принципиальной схемы амплитудного детектора и последующего анализа. Содержащиеся в каждом окне числового массива значения удаляются «стрелкой» на клавиатуре и затем вводятся из описания модели транзистора KT 316B.

Последовательный переход в другие окна параметров модели осуществляется нажатием на клавиатуре кнопки Tab или перемещением в выбранное окно курсора и удалением параметров, представленной модели транзистора, «стрелкой» на клавиатуре. После завершения ввода параметров транзистора левой кнопкой мыши нажимают на панель ОК, подтверждая завершение ввода.

Смысл, заключенный в аббревиатурах приведенных параметров, и условия, при которых они получены, расшифровывается в пособиях по применению программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ [4].

Сведения о параметрах модели транзистора также можно ввести используя режим описания моделей. Для этого необходимо войти в режим Models из главного окна, щелкнув левой кнопкой мыши по надписи внизу главного окна (рис. 14.2), активизируя режим описания моделей используемых активных устройств (Active Devices). Содержание текстового файла (рис. 14.7) с параметрами транзистора KT 316B совпадает со сведениями представленными в файле: Source:Local text area of C:\Data\VdetAM.CIR (рис. 14.6). Отсутствие некоторых параметров модели транзистора в текстовом файле обусловлено присвоением их значений по умолчанию или, при отсутствии полного перечня параметров биполярного транзистора для модели Гумеля — Пуна, переходом ЭВМ к упрощенной модели Эберса — Молла.

Система схемотехнического моделирования MC8 позволяет получать ряд вспомогательных характеристик используя параметры введенной модели транзистора KT316B.

Используя линейку прокрутки, в правом столбце подменю NPN Transistor (рис. 14.6) на выпадающем меню можно выбрать: семейство выходных ( $I_c$  vs  $V_{ce}$ ) характеристик  $I_k = f(V_{kэ})$ , зависимость коэффициента усиления (DC Current Gain) по постоянному току  $I_k/I_b = f(I_k)$ , зависимость напряжения насыщения ( $V_{ce}$  saturation voltage) от коллекторного тока  $V_{kэ} = f(I_k)$  зависи-

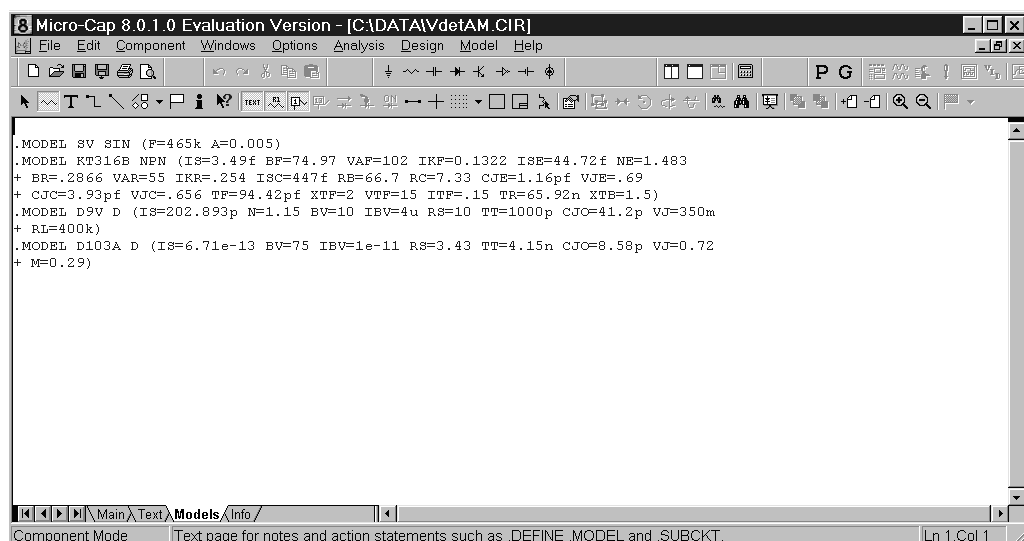


Рис. 14.7



мость коэффициента усиления по постоянному току (Beta vs Frequency)  $I_k/I_b = f(F)$ . Выбрав левой кнопкой мыши необходимую зависимость, получим ее график на экране монитора нажатием кнопки Plot (рис. 14.6). Выбрав  $I_c$  vs  $V_{ce}$  получаем семейство статических выходных характеристик транзистора КТ316В (рис. 14.8).

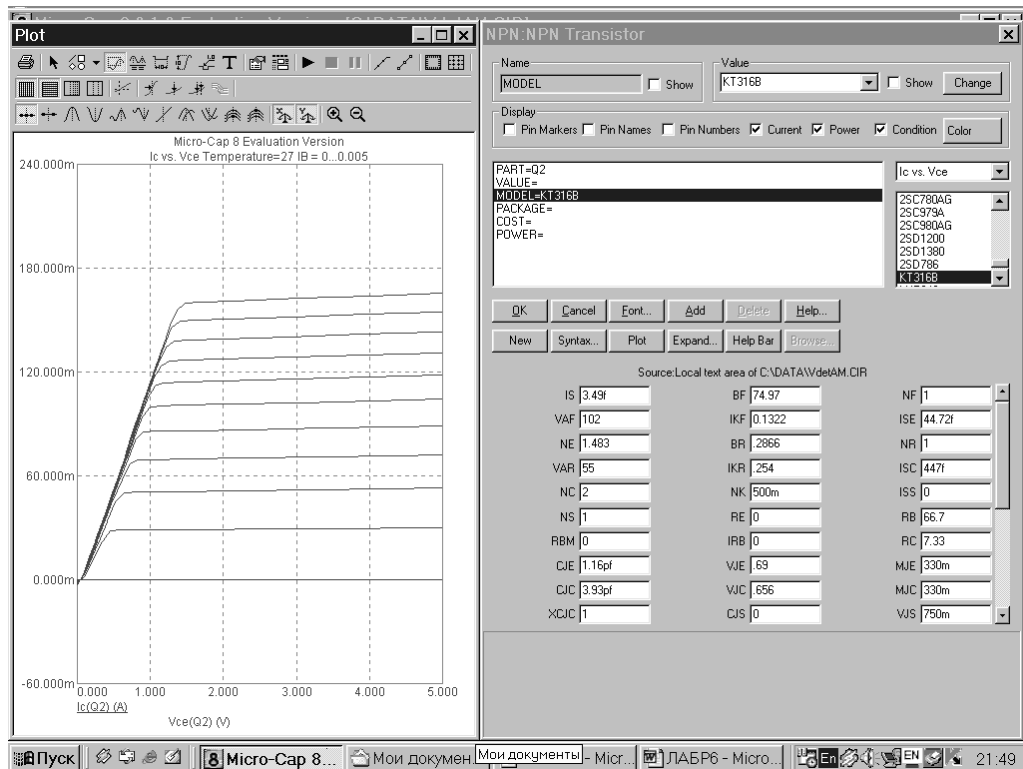


Рис. 14.8

Величина напряжения источника питания принимается равной 12 В. Подключение его в схему должно проводиться с учетом типа проводимости транзистора.

Соединительные линии между элементами схемы прочерчивают, используя кнопку ввода ортогональных проводников Wire Mode (изображение линии) на панели инструментов (рис. 14.2). Установив курсор в нужном месте главного окна (окна графического редактора), нажимаете левую кнопку мыши и, удерживая ее, «прочерчиваете» линию до соединения с выбранным компонентом или линией. Отпустив ее, фиксируете положение линии.

Автотрансформаторное включение в колебательный контур транзистора Q1 реализуется представлением контурной катушки в виде двух индуктивностей L1 и L2. Индуктивная связь контурной катушки (L1 вместе с L2) и L3, обеспечивается применением трансформатора без сердечника (рис. 14.9). Выбрав в меню главного окна команду Components, а затем, на разворачивающихся вправо подменю Analog Primitives, потом Passive Componentns и K, нажатием левой кнопки мыши устанавливаем графическое изображение транс-

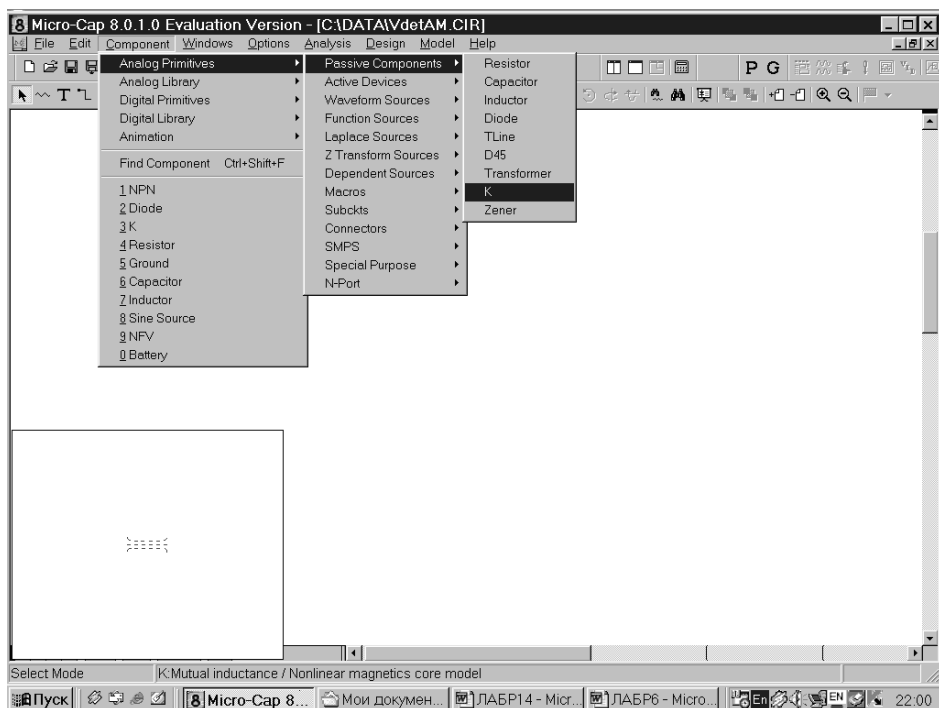


Рис. 14.9

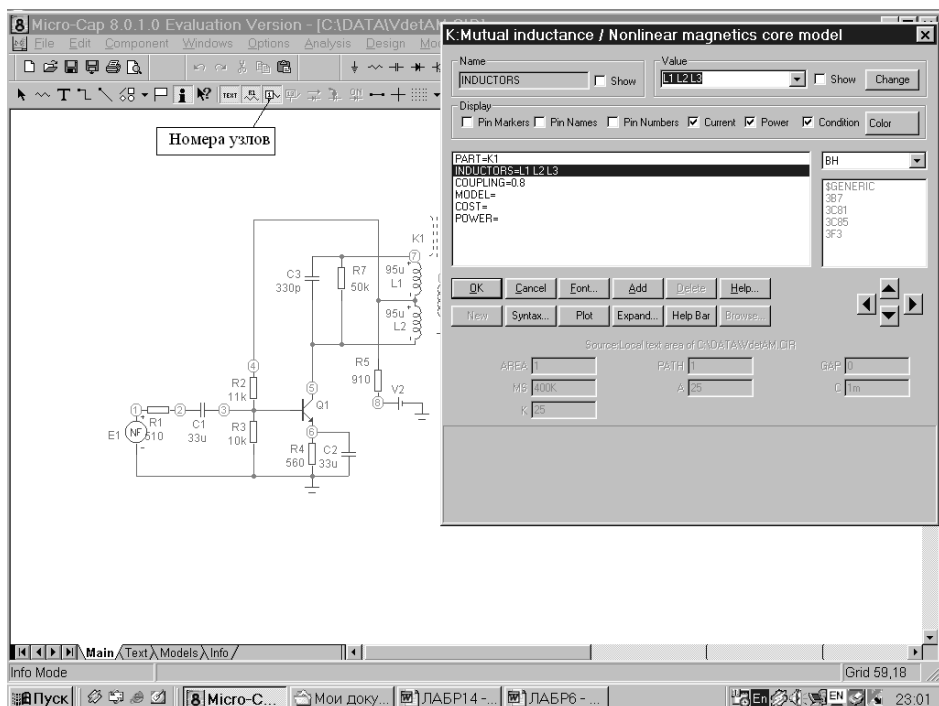


Рис. 14.10

форматора в произвольном месте окна схем и затем вводим названия индуктивно-связанных катушек (рис. 14.10).

На выпадающем подменю K: Mutual inductance/Nonlinear magnetics core model, в верхней части которого содержатся такие же элементы, как например, в описании транзистора, в строке PART вводится позиционный обозначитель трансформатора (буква K с некоторым порядковым номером), а в строке INDUCTORS названия индуктивностей первичной и вторичной обмоток трансформатора L1, L2, L3 (через пробел). Коэффициент связи между обмотками (0,8) задается при активизации строки COUPLING.

Строка MODEL, где вводятся параметры сердечника трансформатора, не активизируется так как используется модель трансформатора без сердечника. В этом случае правое окно подменю остается неактивным. Нажатие на кнопку Cancel позволяет отказаться от всех введенных ранее в этом подменю параметров. Кнопка Font позволяет изменять шрифт вводимых обозначений и изменять цвет вводимых компонент и надписей. Нажатием на кнопки Add или Delete можно ввести или удалить из перечня описаний какие-либо позиции или ввести дополнительные сведения к уже имеющимся (Cost, Power и др.). Пояснения к принятым обозначениям и вводимым параметрам можно найти нажав панель Syntax.

Нажатием на кнопку Plot можно вывести на экран монитора некоторые вспомогательные характеристики (например, график петли гистерезиса сердечника трансформатора). Кнопка Help Bar отключает диалоговое окно и позволяет получать краткую информацию о содержимом экрана, функции кнопок и других элементов, указанных курсором.

Закончив ввод компонентов принципиальной схемы и, проверив их значение, нажатием кнопки Node Numbers (номера узлов) на панели инструментов главного окна (рис. 14.10) переходят в режим анализа свойств схемы. Режим анализа схемы по переменному току предваряет оценка рабочего режима транзистора по постоянному току.

Обеспечение режима работы транзистора в соответствии с рекомендациями п. 3 достигается при выборе элементов схемы, приведенных на рис. 14.1. Проверка указанных режимов проводится с использованием процедуры Dynamic DC. Для того в меню главного окна схем выбирают команду Analysis и, на дополнительном, разворачивающемся вправо подменю, Dynamic DC (рис. 14.11).

Для комбинации активизированных пиктограмм, представленной на выпадающей закладке выбора пределов анализа Dynamic DC Limits (рис. 14.12), на принципиальной схеме детектора указываются рассчитанные значения напряжений в узлах при температуре 27 °C Temperature List (или списка значений) и величине шага изменения помеченного резистора в процентах (Slider Percentage Step Size). Выбор режима Place Text (размещение текста) обеспечивает вывод на экран монитора сведений о значении температуры и перечне выводимых величин.

Повторным нажатием пиктограммы напряжений в узлах отменяем вывод на экран монитора значений напряжений, а активизацией пиктограммы отображения токов в ветвях выводим значения (рис. 14.13) постоянных токов (подтверждаем выбор нажатием кнопки ОК). Убеждаемся в соответствии тре-

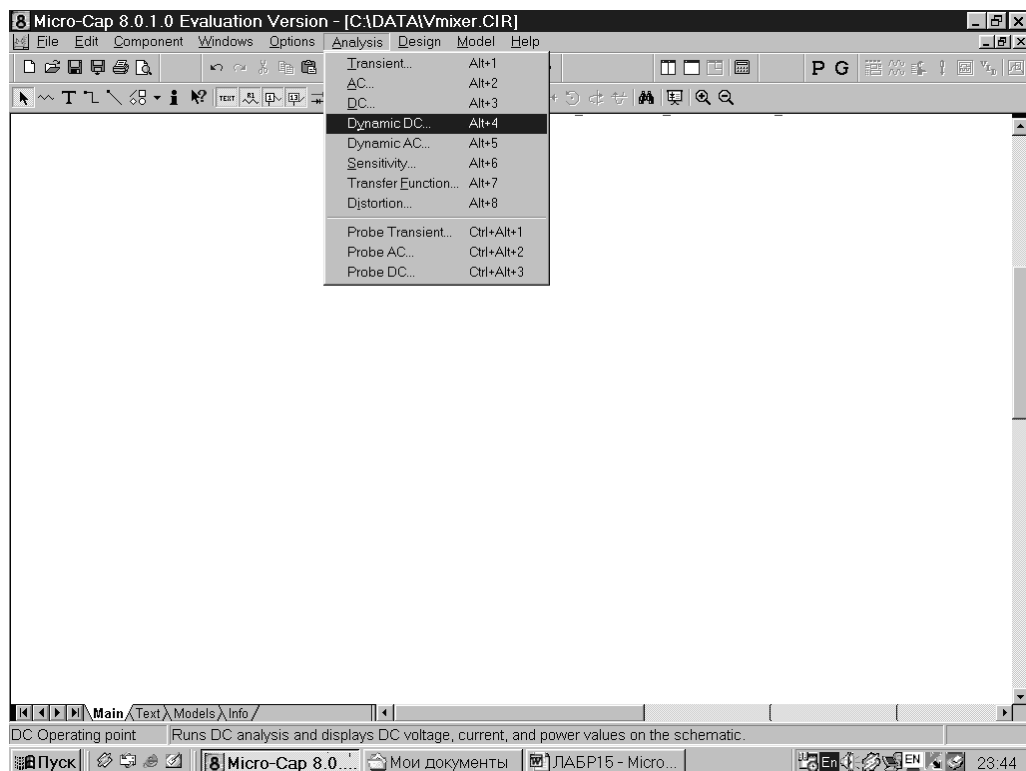


Рис. 14.11

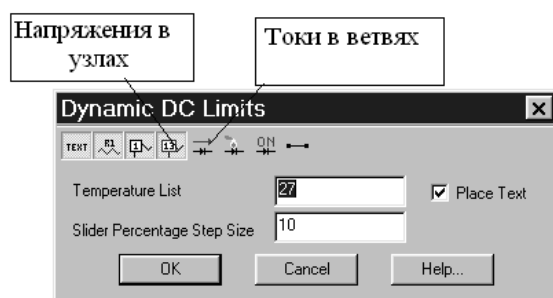


Рис. 14.12

буемых и рассчитанных значений постоянных токов (при расхождении значений больше чем на 0,05 мА необходимо проверить правильность параметров введенных компонентов и их соединение).

Исследование свойств амплитудного детектора начинают с получения амплитудно-частотных характеристик оконечного каскада усилителя промежуточной частоты без учета влияния детектора. Для этого вместо нелинейного независимого источника напряжения (NF на рис. 14.13) в схему вводят источник гармонического напряжения. Для чего после команды Component в меню главного окна на выдвигающихся вправо подменю последовательно выбирают

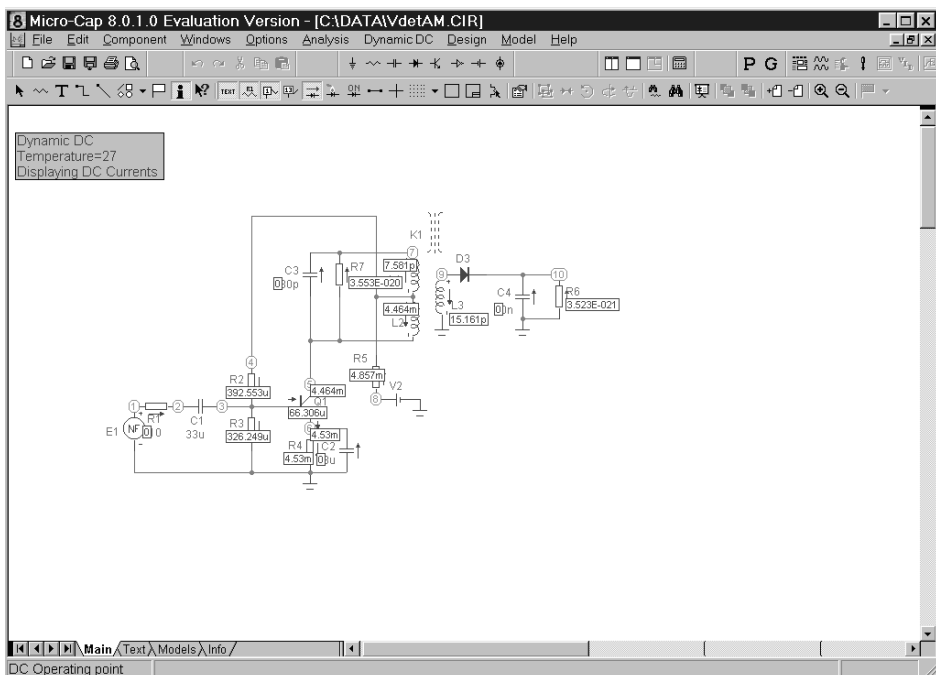


Рис. 14.13

Analog Primitives, затем Waveform Sources и Sine Source. После нажатия левой кнопки мыши в главном окне появляется изображение независимого источника напряжения (рис. 14.14), заменяющего курсор в окне схем. Установив его на входе исследуемой схемы и, подтвердив это нажатием левой кнопки мыши, выбираем в диалоговом окне Sine Source: Sine Source параметры источника гармонического сигнала (рис. 14.15).

Содержание верхней части подменю и, предоставляемые программой возможности, описывались ранее. В верхнем подсвеченном окне левой части закладки содержатся атрибут PART, где вводится позиционное обозначение вводимого компонента (обычно программой предлагается начинающееся с буквы V с текущим номером). Атрибут следующей строки MODEL должен содержать имя модели генератора гармонических колебаний и в правом подсвеченном окне содержится перечень предлагаемых программой генераторов. Поскольку он не содержит генератора с частотой 465 кГц, то необходимо создать такой генератор, задав его параметры. Для этого, установив курсор на кнопку New, и нажав на левую кнопку мыши, активизируем окна параметров источника сигналов, задаваемых в файле Source Local Text area of C:\DATA\VdetAM.CIR. Подведя курсор к окну F — частота, и, удалив указанное там значение, вводим значение равное промежуточной частоте тракта радиовещательных приемников (465 кГц). Затем, используя кнопку Tab клавиатуры, последовательно заменяем другие параметры источника сигналов: A — амплитуду напряжения генератора (в вольтах), DC — значение постоянной составляющей генерируемого сигнала (в вольтах), значение начальной фазы — PH (в градусах), величину внутреннего сопротивления источника сиг-

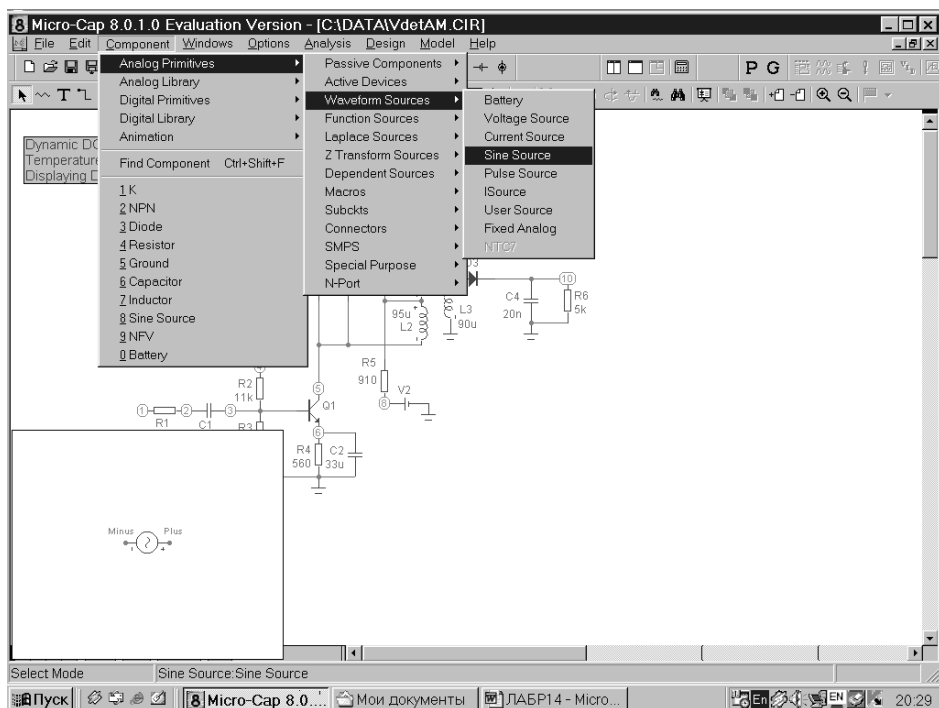


Рис. 14.14

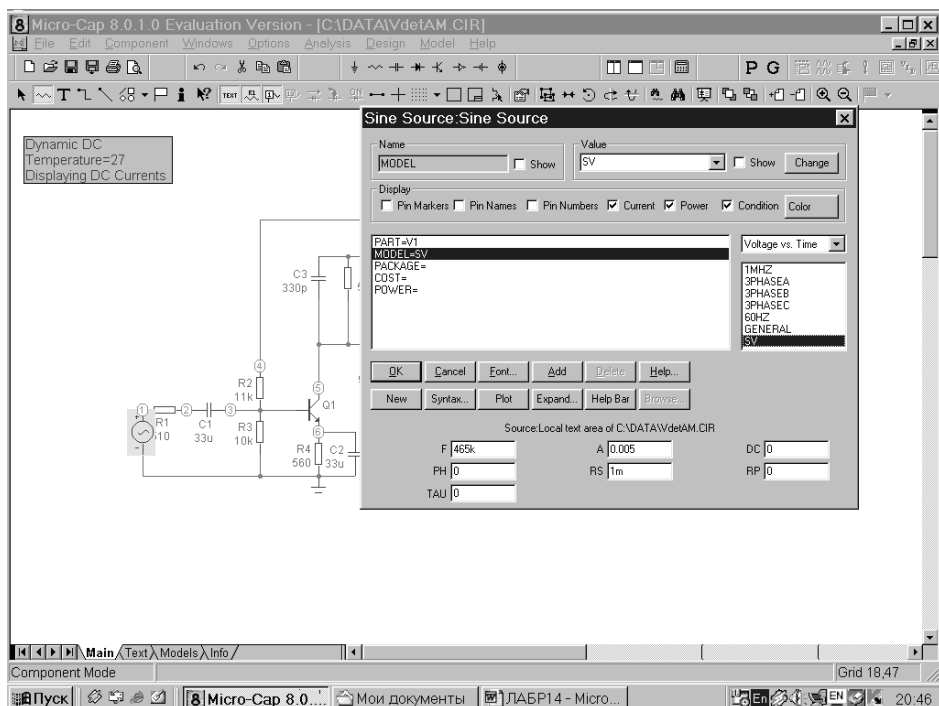


Рис. 14.15

налов(в омах), период повторения затухающего сигнала  $RP$  (в секундах), и  $TAU$  — значение времени изменения амплитуды сигнала по экспоненциальному закону (в секундах). Названные атрибуты вводятся в соответствие с рис. 14.15. Нажатием панели ОК подтверждают окончание ввода параметров источника сигналов. Остальные атрибуты источника сигналов PACKAGE (тип корпуса), COST (стоимость) и POWER (создаваемая источником мощность) можно не вводить, так как они используются только при конструктивном расчете с использованием программы PSPICE. Назначение остальных кнопок диалогового окна аналогично по своему назначению и функциям, описанным ранее при вводе трансформатора (рис. 14.10).

При выполнении пункта 2.1.1 необходимо исключить влияние детектора на резонансный усилительный каскад. Для того, активизировав пиктограмму «выбор режима» (Select Mode, рис. 14.2), нажатием левой кнопкой мыши выбираем идентификатор трансформатора  $K$  (подсвечивается зеленым светом) и затем удаляем его, войдя в окно редактора электрических схем Edit и выбрав на выпадающем меню (рис. 14.16) команду Cut (или комбинацию клавиш  $Ctrl+X$ ). Удаление идентификатора трансформатора исключает взаимоиндукцию между обмотками трансформатора.

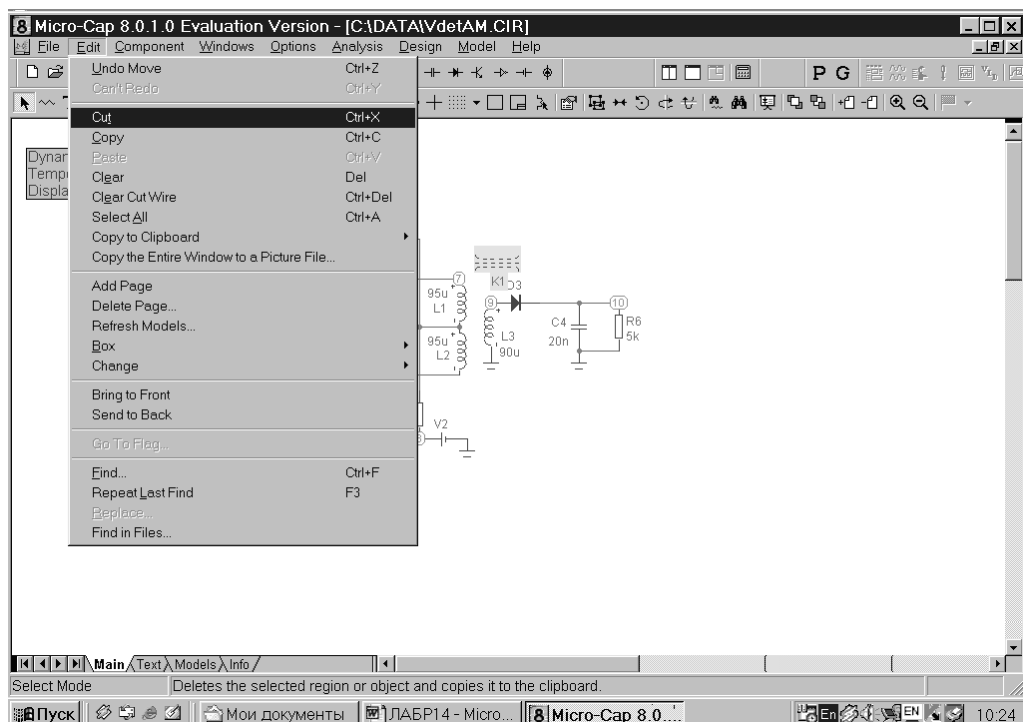


Рис. 14.16

Амплитудно-частотные характеристики резонансного усилителя (рис. 14.17) с ненагруженным контуром получаем в режиме Analysis, проведя предварительно нумерацию узлов нажатием на пиктограмму «Node Numbers» (рис. 14.10).

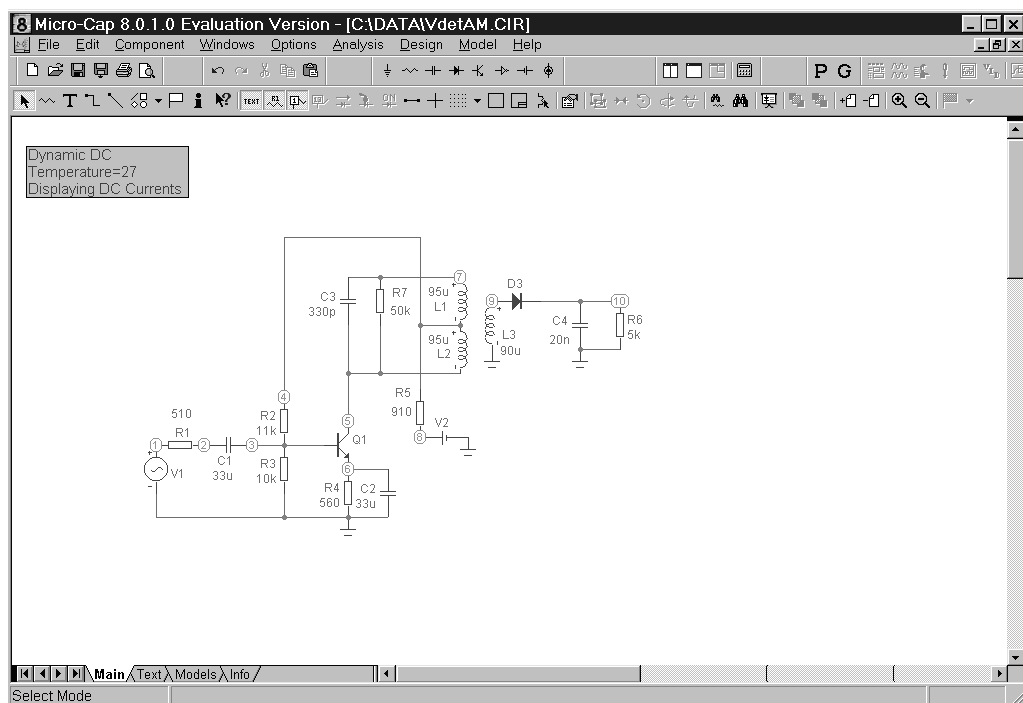


Рис. 14.17

Выбрав в качестве узла, в котором будут анализироваться частотные характеристики, коллектор транзистора (узел номер 5), войдем в режим анализа.

В меню главного окна выбираем команду Analysis и затем на выпадающем меню режим AC расчета частотных характеристик (рис. 14.18) (в режим анализа можно войти выбрав комбинацию ключей на клавиатуре Alt+2).

При выборе режима AC в окне схем нажатием левой кнопки мыши, MC8 предлагает перейти к выбору пределов анализа на выпадающем меню AC Analysis Limits (рис. 14.19).

В окне AC Analysis Limits задается следующая информация:

Frequency range — значения верхнего и нижнего пределов частот анализа. Нажатием на кнопку прокрутки выбираем способ разбиения интервала частот автоматический (Auto), равномерный (Linear), логарифмический (Log);

Number of Points — количество подинтервалов в заданном частотном интервале, в котором производится расчет частотных характеристик, одновременно определяет число точек выводимых на печать (если это указывается) в форме таблицы (рис. 14.24);

Temperature — диапазон изменения температур (может задаваться одно значение температуры, при которой проводится анализ);

Maximum Change — максимально допустимое приращение функции на интервале шага по частоте (учитывается только при автоматическом выборе шага — активизация процедуры Auto Scale Ranges);

Noise Input — имя источника шума, подключенного ко входу второго каскада;



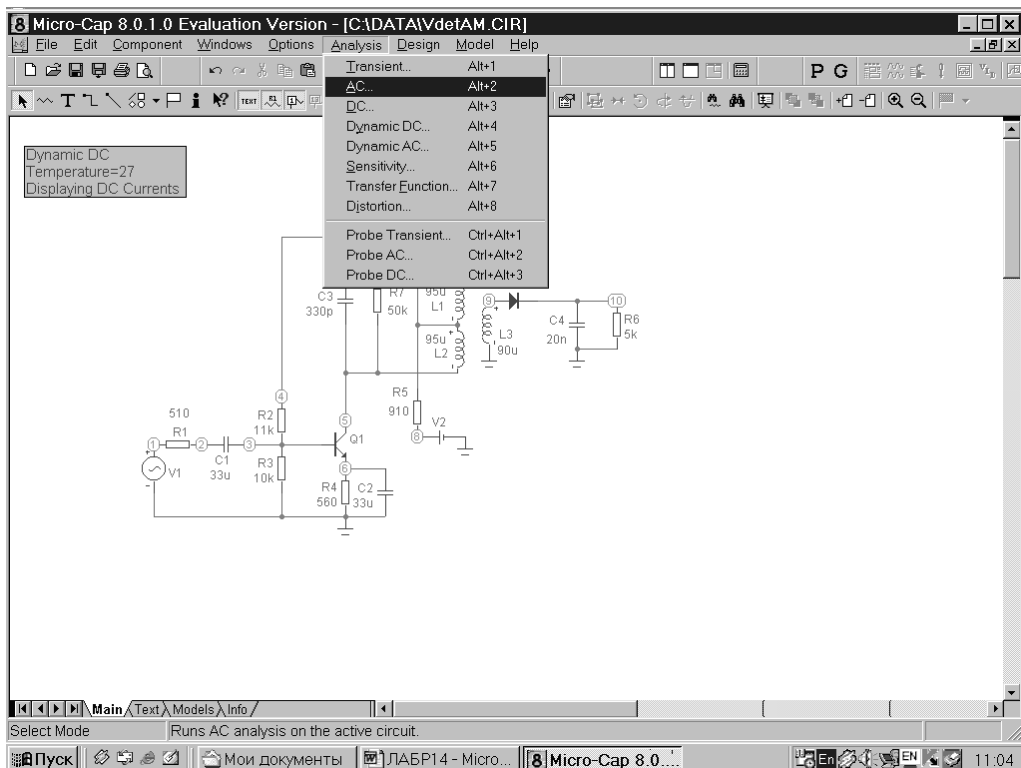


Рис. 14.18

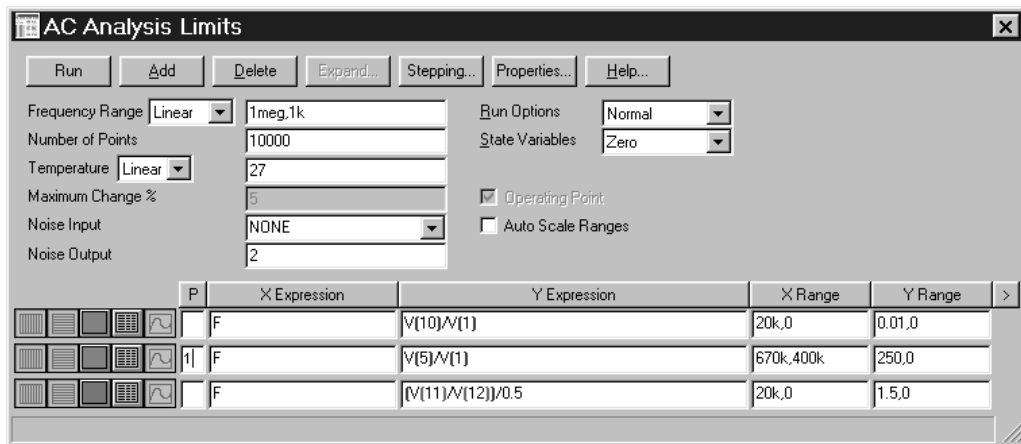


Рис. 14.19

Noise Output — номер(а) выходных зажимов, где вычисляется спектральная плотность напряжения шума;

Run Options — определяет способ хранения полученных результатов:

Normal — результаты расчетов не сохраняются;

Save — результаты сохраняются на жестком диске;

Retrieve — использование результатов расчета, хранящегося на жестком диске для вывода на экран монитора;

State Variables — задание начальных условий интегрирования.

На экран монитора, в соответствии с рис. 14.19, выводится семейство кривых (P), поскольку активизирована пиктограмма слева от столбца P. Каждая строка устанавливает способ отображения результатов и аналитические выражения для построения графиков. Для получения зависимости коэффициента усиления каскада в столбце YExpression помещают выражение для вычисления модуля напряжения в выбранном узле или его относительного значения, а в столбце XExpression — обозначение частоты. Кроме этого, в столбцах YRange и XRange указывают максимальное значение соответствующей переменной, ее минимальное значение и шаг сетки значений соответствующей оси (частота — XRange, коэффициент передачи — YRange). Характер изменения значений по осям — линейный, что выбирается нажатием двух левых крайних кнопок в строке выводимых значений. Затем стоит пиктограмма выбора цвета выводимой кривой, потом — пиктограмма, активизация которой, создает файл для хранения числовых значений рассчитанных кривых и наконец, пиктограмма определяющая систему координат, в которой будут представлены рассчитанные графики.

Run — команда начала моделирования. Начало моделирования может также задаваться нажатием ключа F2.

Add — добавление еще одной строки спецификации вывода результатов после строки, отмеченной курсором.

Delete — удаление строки спецификации вывода результатов, отмеченной курсором.

Expand — открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например XExpression.

Stepping — открытие диалогового окна задания вариации параметров.

Properties — открытие диалогового окна задания параметров (управления выводом графиков на экран и принтер — Plot, выбор масштабов по осям координат — Scales and Formats, выбор цвета объекта, параметров шрифта и типа линий — Colors, Fonts and Lines, нанесение заголовков в выходных числовых данных — Header, выбор одной или нескольких переменных для сохранения в файле пользователя User Source — Save Curves, для режима анализа Transit, нанесение пиктограмм команд на панель инструментов — Tool Bar).

Help — вызов раздела системы помощи.

Для указанных на рис. 14.19 значений пределов и выбранных условий анализа, АЧХ усилительного каскада на рис. 14.20 представлено значение коэффициента усиления (отношение напряжений в узле 5 и узле 1). Максимальное значение коэффициента усиления  $K_0$  определяется с помощью пиктограмм в подменю AC, регистрирующих положение маркера на пересечении двух штриховых линий (1), а затем — в точке максимума кривой (2). По известной величине коэффициента усиления в точке максимума можно определить полосу пропускания усилителя по уровню  $0,707K_0$ . Активизируя пиктограмму, задающую местоположение маркера по указанному значению Y, на закладке Go To Y (рис. 14.21) в подменю AC Analysis, в активизированном окне Value указыва-

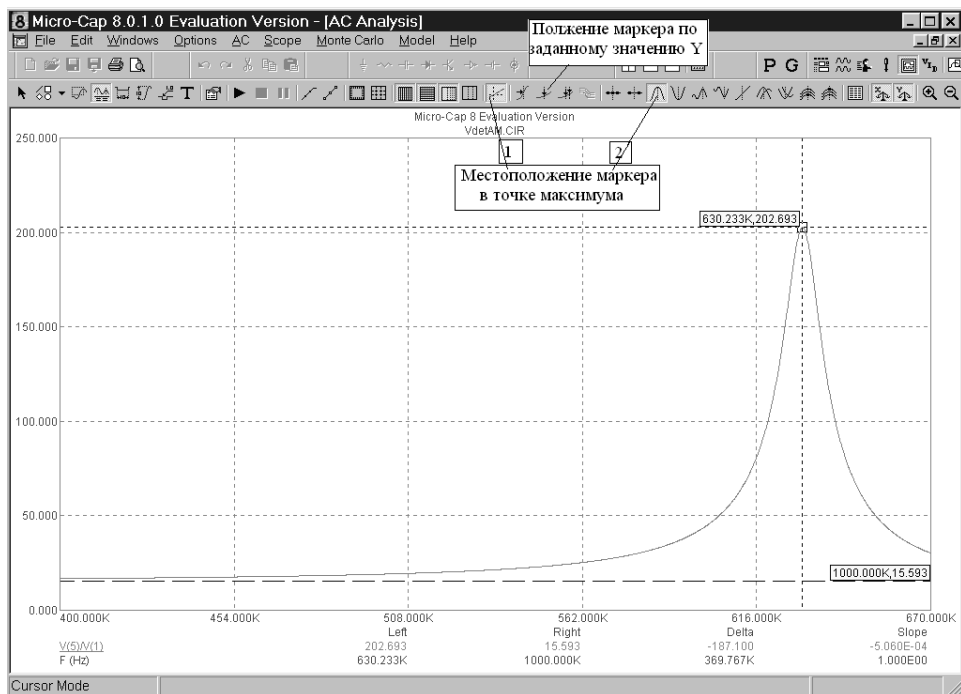


Рис. 14.20

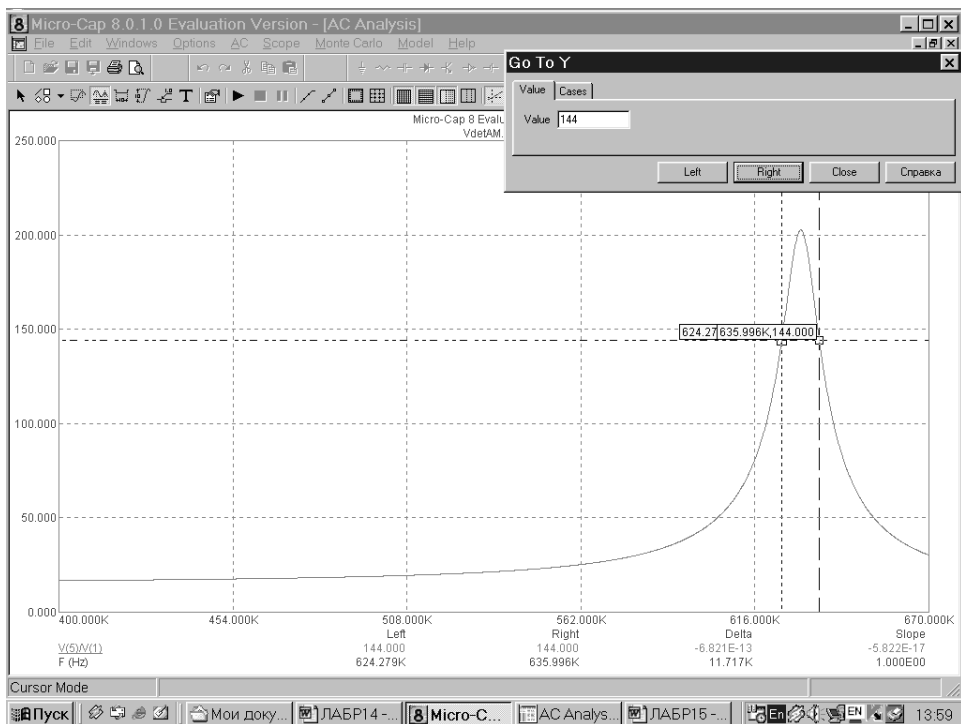


Рис. 14.21

ется значение  $Y$  на уровне  $0,707K_0$  и нажимается панель Left левой кнопкой мыши, что устанавливает левый маркер на заданном уровне  $Y$ . Повторным нажатием на панель Right устанавливаем правый маркер на том же уровне. Ширина полосы пропускания считывается под графиком в колонке Delta. Оцените величину эквивалентной добротности контура. Результаты эксперимента занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Сопротивление нагрузки детектора	Коэффициент усиления		Полоса пропускания, кГц	
	АД включен	АД выключен	АД включен	АД выключен
1 кОм				
5 кОм				
10 кОм				

Повторите эксперимент с учетом влияния детектора. Для этого восстановите принципиальную схему (рис. 14.22) при наличии индуктивной связи между усилителем и детектором с коэффициентом связи равным 0,8. Оцените значение резонансной частоты контура, эквивалентную добротность, коэффициент усиления и величину полосы пропускания усилителя, нагруженного на детектор, в том же узле. Результаты занесите в таблицу 2.

Для выполнения п. 2.1.2 (расчет характеристики детектирования) воспользуемся принципиальной схемой, приведенной на рис. 14.22.

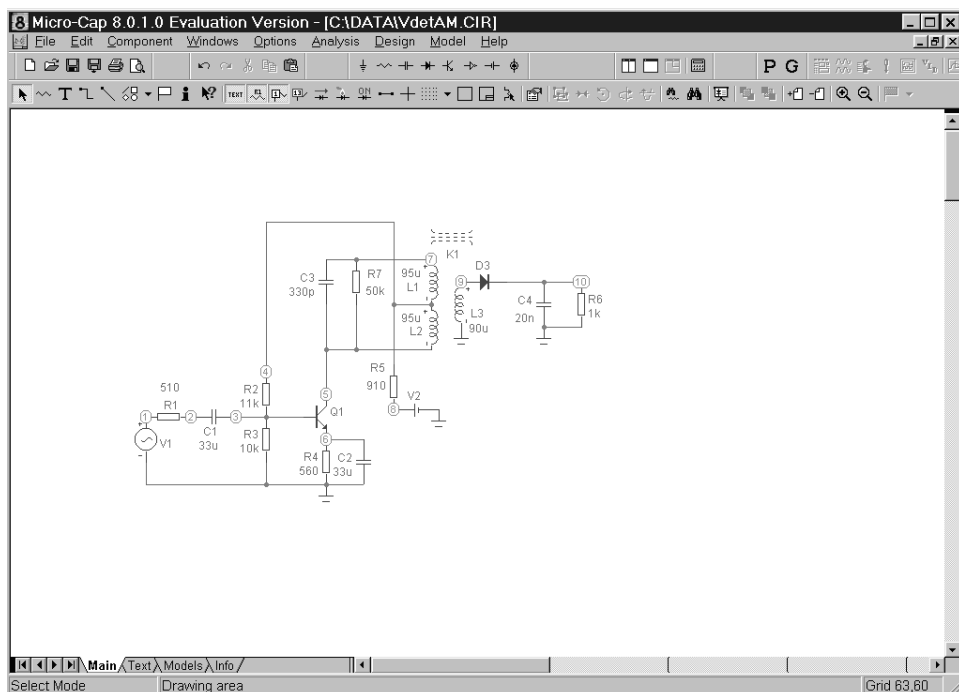


Рис. 14.22

В окне схем выберем команду Analysis и на выпадающем меню Transient (рис. 14.23) или сочетание клавиш Alt+1.

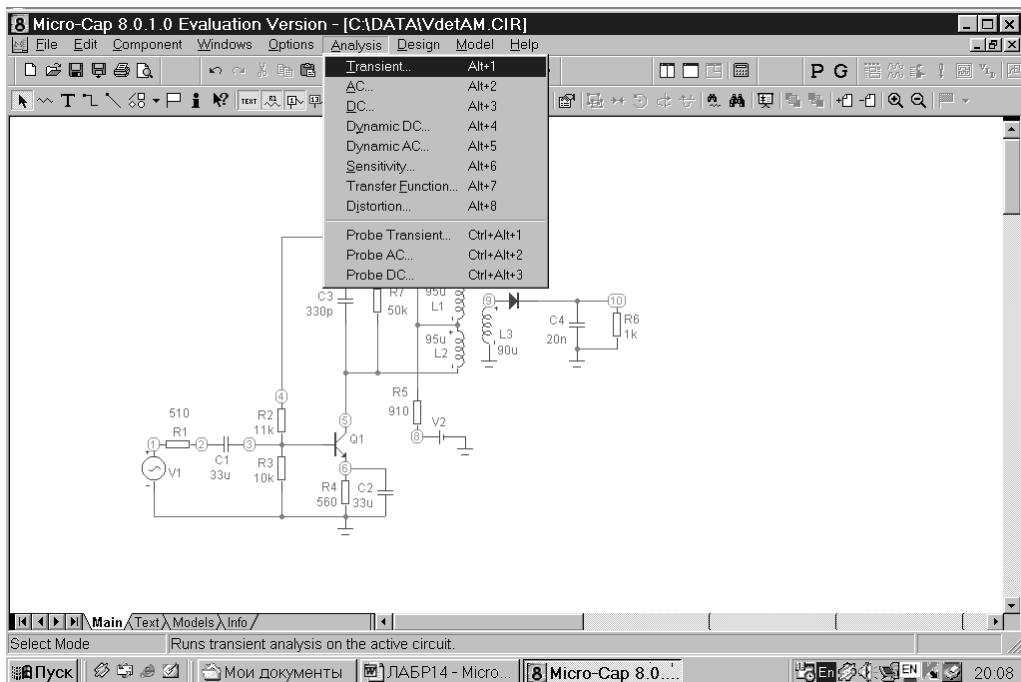


Рис. 14.23

В диалоговом окне Transient Analysis Limits, которое может открываться так же нажатием клавиши F9, задают параметры расчета переходных процессов, прямого преобразования Фурье (FFT) и др. (рис. 14.24).

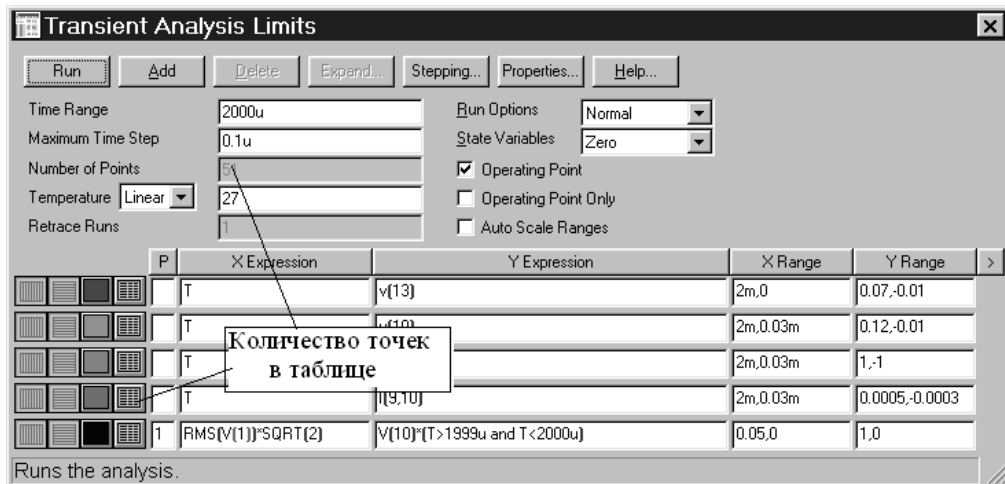


Рис. 14.24

Команда Run — означает начало моделирования (может задаваться так же нажатием клавиши F2).

Нажатием на панель Add левой кнопкой мыши можно добавить еще одну строку спецификации вывода результатов после строки, отмеченной курсором.

Команда Delete, вводимая нажатием левой кнопкой мыши, позволяет удалять строку вывода результатов, отмеченную курсором.

Панель Expand, активизируемая левой кнопкой мыши, открывает дополнительное окно для ввода текста большого размера при описании выражений (например, XExpression).

Нажатием на панель Stepping открывается диалоговое окно задания вариации параметров.

Команда Properties выполняется нажатием на левую кнопку мыши и сопровождается открытием диалогового окна, позволяющего управлять выводом графиков на экран монитора, изменять масштаб по осям координат и др. (подробнее см. в предыдущем разделе построения АЧХ).

Затруднения, возникающие при проведении Analysis во временной области, можно устранить вызовом системы помощи Help.

Слева под строкой панелей вводятся числовые параметры:

Time Range — указывается конечное и начальное время расчета временных характеристик (начальное время расчета по умолчанию принимается равным нулю и может не указываться).

Maximum Time Step — величина максимального шага интегрирования. Текущее значение переменного шага интегрирования определяется величиной допустимой относительной ошибки.

Number of Points — количество точек, выводимых в виде таблицы (по умолчанию принимается равными 51). Изменение количества выводимых точек достигается нажатием на пиктограмму в разделе вывода числовых результатов (рис. 14.24). Нажатием на эту кнопку в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе YExpression.

В столбце справа под строкой панелей располагаются опции управления результатами расчетов.

Run Options — определяют режимы:

Normal — результаты не сохраняются;

Save — результаты сохраняются в бинарном файле формата: <имя файла>.TSA;

Retrieve — используются результаты, сохраненные ранее в бинарном файле, для построения графиков и вывода в форме таблиц (без нового расчета);

State Variables — установка начальных значений позволяет:

Zero — выбирать в качестве начальных значений нулевые потенциалы в узлах и токи через индуктивности;

Read — использовать в качестве начальных значения, взятые из бинарного файла формата <имя схемы>.TOP, создаваемого перед каждым вариантом расчета;

Leave — задание в качестве начальных условий результатов предыдущего расчета.

Нажатие на кнопку Operation Point обеспечивает выполнение расчета по постоянному току перед каждым расчетом переходных процессов.

В режиме Operating Point Only — производится расчет только по постоянному току.

Щелчок по кнопке Auto Scale Ranges обеспечивает автоматический выбор масштабирования по осям.

Условия, определяющие представление результатов моделирования в частотной области, задаются в нижней части диалогового окна Transient Analysis Limits.

Левее таблиц, определяющих выражения и пределы представляемых кривых на экране монитора, расположены кнопки, задающие изменение переменной по осям X и Y по линейному или логарифмическому закону. Выбор происходит при нажатии на соответствующую кнопку (крайнюю левую или вторую). Нажатием на следующую кнопку (Color) на выпадающем меню выбираем цвет выводимой на экран кривой (название кнопки высвечивается при подведении курсора к кнопке).

В колонке P (Plot Group) указывается номер графического окна, в котором будет построена, задаваемая строкой кривая. При одновременном представлении нескольких кривых в одной системе координат, масштаб выбирается автоматически.

В колонке X Expression указывается имя переменной, откладываемой по оси X.

При изучении временных характеристик это время T, при расчете спектра сигнала с помощью преобразования Фурье — это частота F.

В колонке Y Expression приводится выражение, откладываемое по оси Y. Это может быть просто напряжение в каком-либо узле, ток через какой-либо элемент или между какими-то узлами, а так же целое выражение. Щелчком правой мыши на всплывающем меню можно выбрать тип переменной и форму его представления.

X Range определяет максимальное и минимальное значения переменной X на графике.

В колонке Y Range задается максимальное и минимальное значения переменной Y на графике (если минимальное равно нулю, то его можно не указывать).

На рис. 14.24 показано, что в прямоугольной системе координат с линейным законом изменения значений переменных по осям X и Y будет выводиться один график. При этом в качестве аргумента выбрано значение амплитуды напряжения в узле 1 ( $RMS(V1)$  — среднеквадратичное отклонение напряжения в узле 1). В качестве переменной Y выбирается напряжение на выходе амплитудного детектора (в узле 10); при этом проводится оценка установившегося выходного напряжения на достаточно малом промежутке времени в конце процесса моделирования. Это позволяет исключить из рассмотрения нестационарный участок процесса установления выходного напряжения. Пример расчета характеристики детектирования для некоторого значения сопротивления нагрузки детектора ( $R6$ ) представлен на рис. 14.25 (получается соединением вершин составляющих значений амплитуды на выходе детектора для некоторых величин амплитуды входного сигнала). Величина амплитуды входного сигнала задается в подрежиме Stepping (нажатием на кнопку Stepping подменю Analysis Transient Limits).

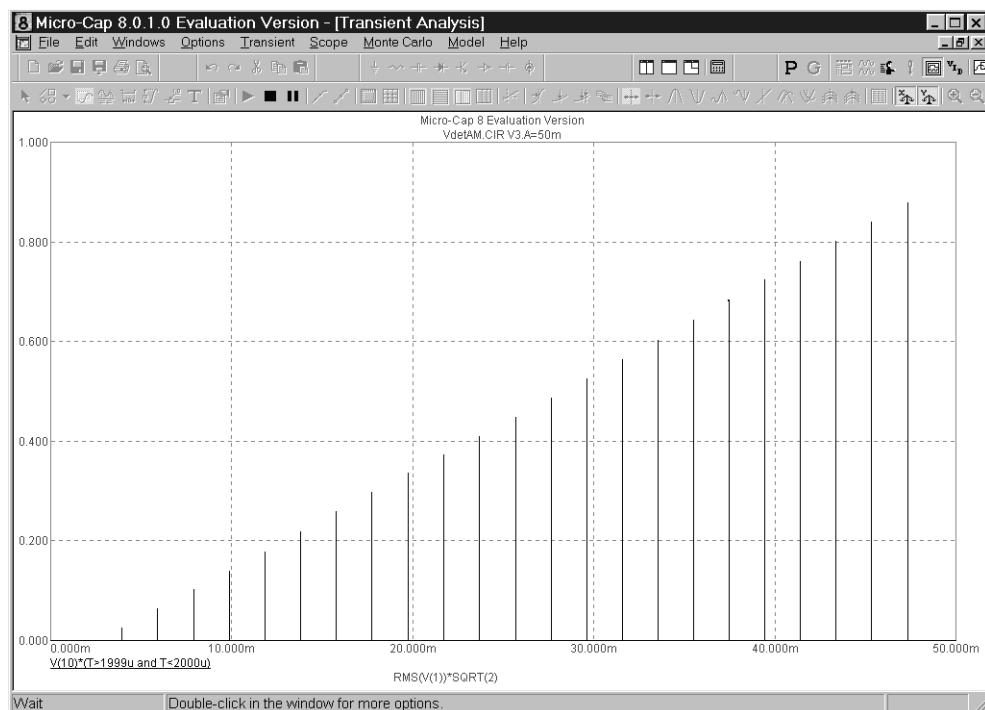


Рис. 14.25

На выпадающем подменю Stepping в верхней строке (рис. 14.26) указывается перечень изменяемых компонентов (для MC8 Demo может изменяться лишь один компонент). Выбор компонента осуществляется нажатием на кнопку в строке.

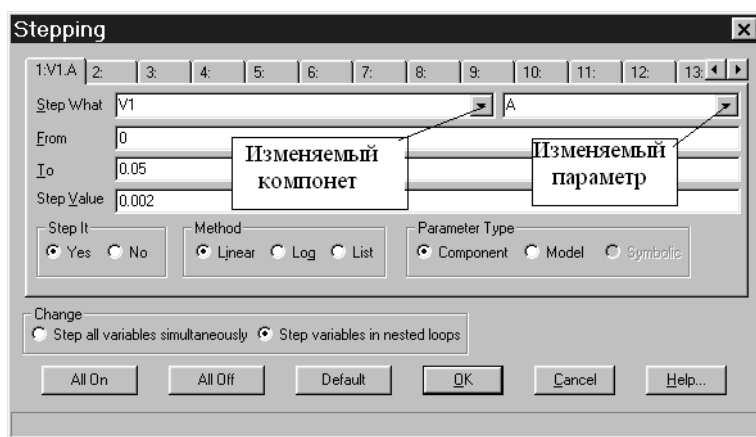


Рис. 14.26

Step What и в диалоговом окне — название изменяемого компонента (рис. 14.27). Аналогично выбирают изменяемый параметр в окошке продолжения строки Step What (рис. 14.28).



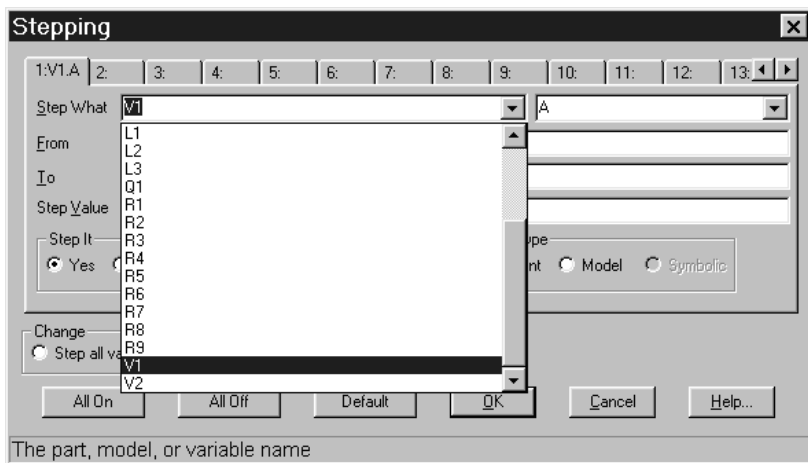


Рис. 14.27

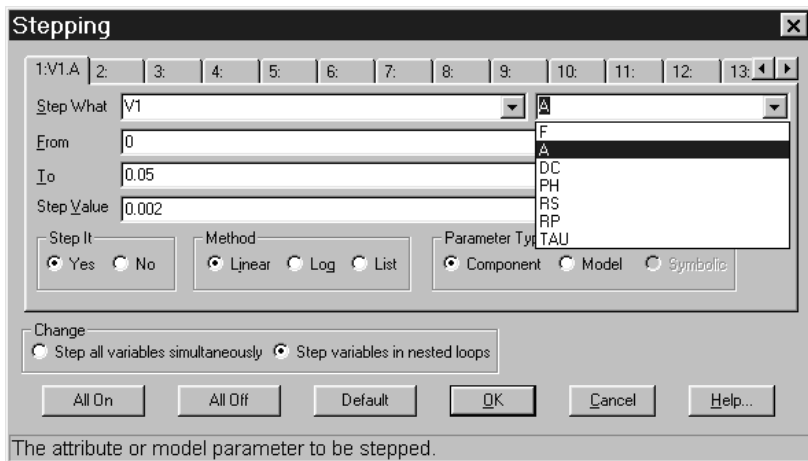


Рис. 14.28

В данном случае в качестве изменяемого компонента выступает генератор V1, а в качестве изменяемого параметра — его амплитуда A. Затем в строке From указывается наименьшее значение амплитуды (вместо предъявляемого по умолчанию), в строке To наибольшее значение амплитуды, а в строке Step Value — значение шага изменения амплитуды. Подтверждение режима Stepping происходит при нажатии радиокнопки Yes в рамке Step It. Одновременно в соседней рамке Method указывается закон изменения выбранного параметра (линейный — при нажатии радиокнопки Linear, логарифмический — Log, в соответствии с некоторым списком значений изменяемого параметра — List). В рамке Parameter Type — тип изменяемого параметра, нажатием радиокнопки Component, подтверждается, что изменяются параметры компонента, а не параметры модели какого-либо компонента или его обозначения. В нижней рамке Change (для профессиональной версии MC8) указывается порядок изменения варьируемых величин: одновременное изменение шага для всех

перечисленных выше компонент — нажимается радиокнопка Step all variables simultaneously или в соответствии с указаниями, данными для каждого компонента — Step variables in nested loops. Нажатие на панель All On дает возможность включения процедуры варьирования параметров компонентов, перечисленных на всех закладках выпадающего меню Stepping (для профессиональной версии MC8). Нажатием на кнопку All Of выводятся из режима варьирования все заданные параметры. Активизация кнопки Default отменяет указанные ранее для каждого компонента пределы изменения и величину шага и обеспечивает варьирование параметра от половины его номинального значения до двукратного. Панель Cancel позволяет отменить введенные ранее указания, а панель Help обеспечивает доступ к файлу помощи при возникновении затруднений во время работы в подрежиме Stepping.

Получите характеристики детектирования амплитудного детектора для значений сопротивления нагрузки, указанных в п. 2.1.2.

Для выполнения п. 2.1.3 необходимо выйти из подрежима варьирования параметров Stepping и в режиме Transient Analysis Limits отменить вывод на экран монитора характеристики детектирования (рис. 14.24) и ввести в таблицу указания о количестве выводимых графиков, характере рассчитываемых параметров, пределах анализа и представления их на мониторе. Пример задания пределов анализа и выводимых на экран характеристик для некоторого значения параметров нагрузки представлен на рис. 14.29. Соответствующий вариант рассчитанных зависимостей приведен на рис. 14.30.

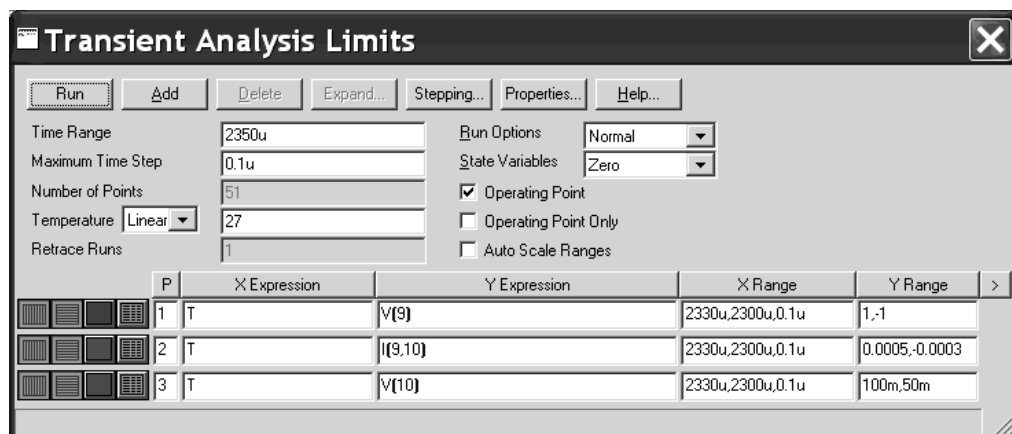


Рис. 14.29

Проведите расчет аналогичных характеристик для сопротивления нагрузки детектора R6 равном 5 кОм. При необходимости проведите коррекцию пределов выводимых величин.

При выполнении п. 2.1.4 задания необходимо на входе детектора включить источник амплитудно-модулированного сигнала. Для этого меню главного окна схем выберем команду Components и на выпадающем меню Analog Primitives, а затем на выдвигающихся вправо закладках последовательно Function Sources и NFV (см. рис. 14.31: простейшие аналоговые устройства → функциональные источники сигналов → зависимый источник напряжения).

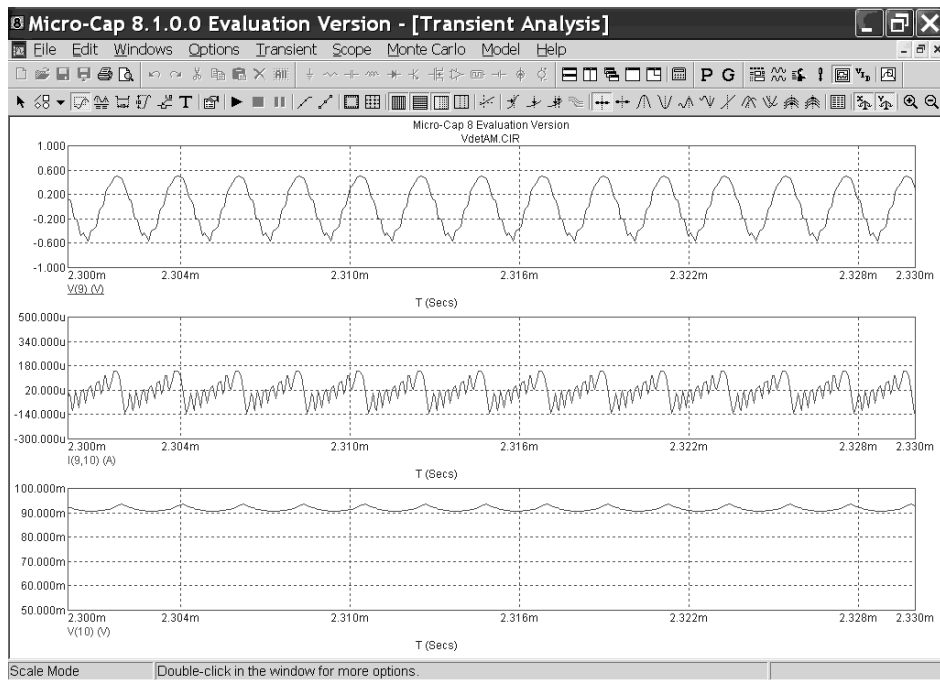


Рис. 14.30

При нажатии на левую кнопку мыши в окне схем появляется графическое изображение функционального источника напряжения. Источник сигнала задается алгебраической формулой для расчета напряжения источника ЭДС. Установив функциональный источник сигнала вместо источника гармонического сигнала (предварительно удалив его) и, нажав левую кнопку мыши, в диалоговом окне (рис. 14.32) NFV: Analog behavioral voltage source задайте параметры источника ЭДС.

Содержание верхней части диалогового окна (рамки Name, Value, Display и их назначение) совпадает с описанным ранее (например, пояснения к рис. 14.15).

В активной левой части окна указывается позиционное обозначение компонента (атрибут PART), которое для зависимых источников ЭДС предлагается как E с некоторым текущим номером (например E1). Следующей строкой является атрибут VALUE, задающий закон изменения ЭДС во времени и используемый только при исследовании временных характеристик электронной схемы. Выражение, описывающее АМ сигнал задает амплитуду несущего колебания величиной 5 мВ и частотой 465 кГц при глубине модуляции 100 %. Модулирующее колебание обладает частотой 1 кГц. Форму сигнала на входе амплитудного детектора можно наблюдать, активизировав строку Plot в правом подсвеченном окне, и нажав на кнопку Plot. Остальные кнопки имеют назначение, описанное в комментариях к рис. 14.15 Атрибут FREQ аналитическим выражением задает характер изменения частоты функционального источника сигнала, используемого лишь при вычислении АЧХ. Названный атрибут, как и все последующие, не используется при анализе временных харак-

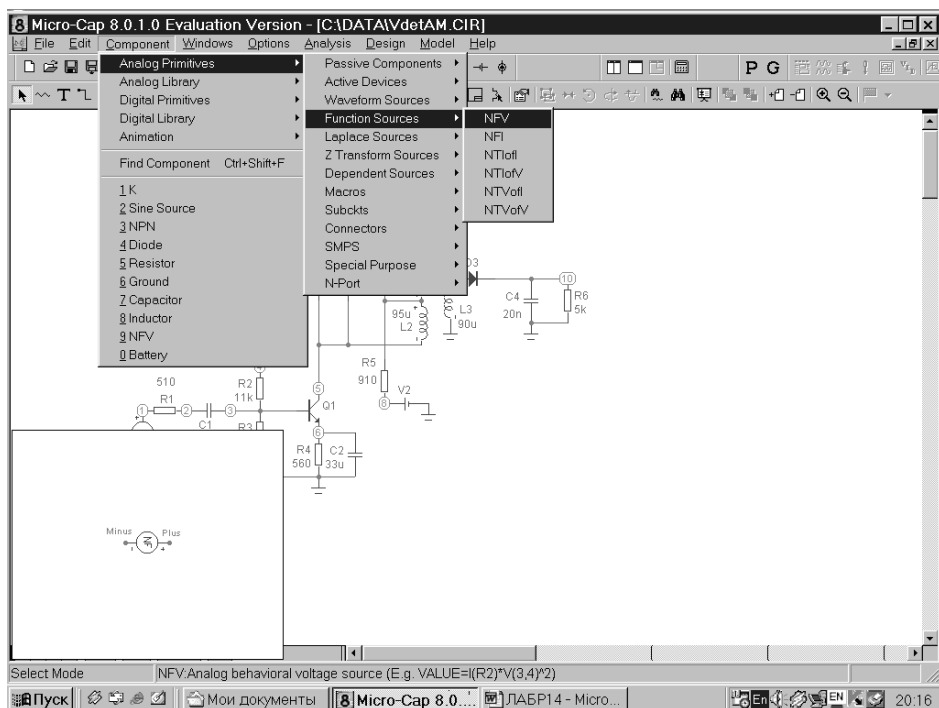


Рис. 14.31

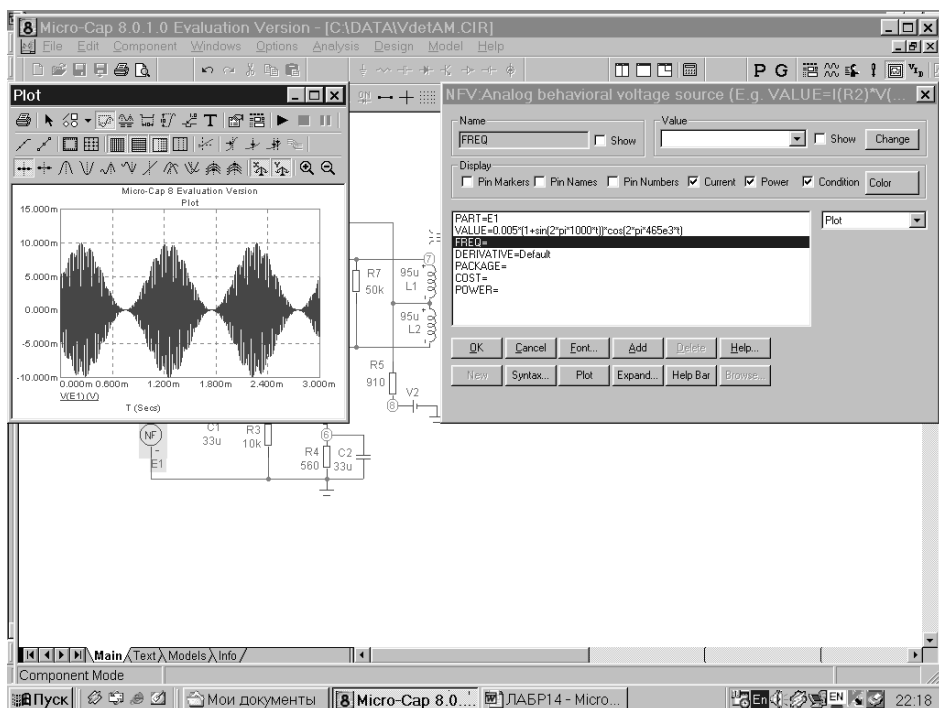


Рис. 14.32

теристик. После описания функционального источника сигналов входим в режим анализа временных характеристик принципиальной схемы амплитудного детектора (рис. 14.1).

Для этого в меню главного окна выбираем команду Analysis, на выпадающем меню Transient и переходим в диалоговое окно задания пределов анализа Transient Analysis Limits (рис. 14.33).

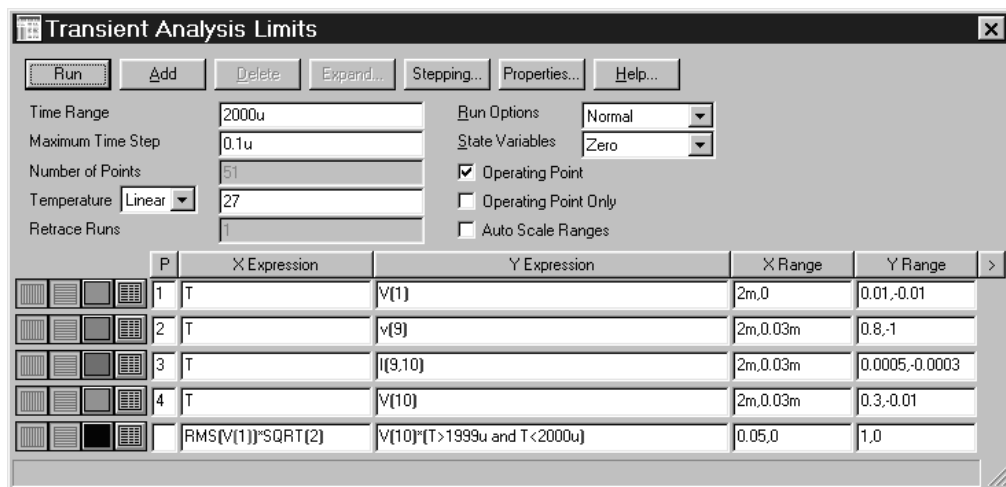


Рис. 14.33

Функции элементов диалогового окна описаны в комментариях к рис. 14.24. Для приведенного на рис. 14.33 перечня выводимых на экран зависимостей и указанных пределов анализа, и некоторых значений сопротивления нагрузки получены переходные характеристики в заданных узлах схемы (рис. 14.34).

Получить спектральные характеристики любой из приведенных на рис. 14.34 временных зависимостей можно выбрав команду Transient и на выпадающем подменю FFT Windows и на выдвигающейся вправо закладке Add FFT Window (рис. 14.35).

Войдя в диалоговое окно Properties(свойства) выбираем закладку Plot (рис. 14.36), которая позволяет выводить на экран монитора кривые (Curves). Число их можно увеличивать, нажимая на панель (Add), или уменьшать — (Delete) при этом на экран всегда будет выводиться автоматически (нажата кнопка Auto) кривая, указанная в рамке Title. В показанном на рис. 14.36 варианте представления кривых на экран будет выводиться только одна кривая (в рамке Plot Group — количество кривых — выбрана 1).

Она будет выводиться на экран (в рамке Curve нажата кнопка Show). В зависимости от требований на экран можно вывести спектр амплитуд (Mag) (в том числе в логарифмическом масштабе — dB) и фаз(Phase), а также действительную (Real) и мнимую (Image) части спектра, нажав соответствующую радиокнопку в рамке Expression. Нажав на указатель в рамке можно выбрать, спектр какой из изображенных на рис. 14.35 кривых, будет представлен на экране. Пролистав закладки диалогового окна Properties, на закладке Format

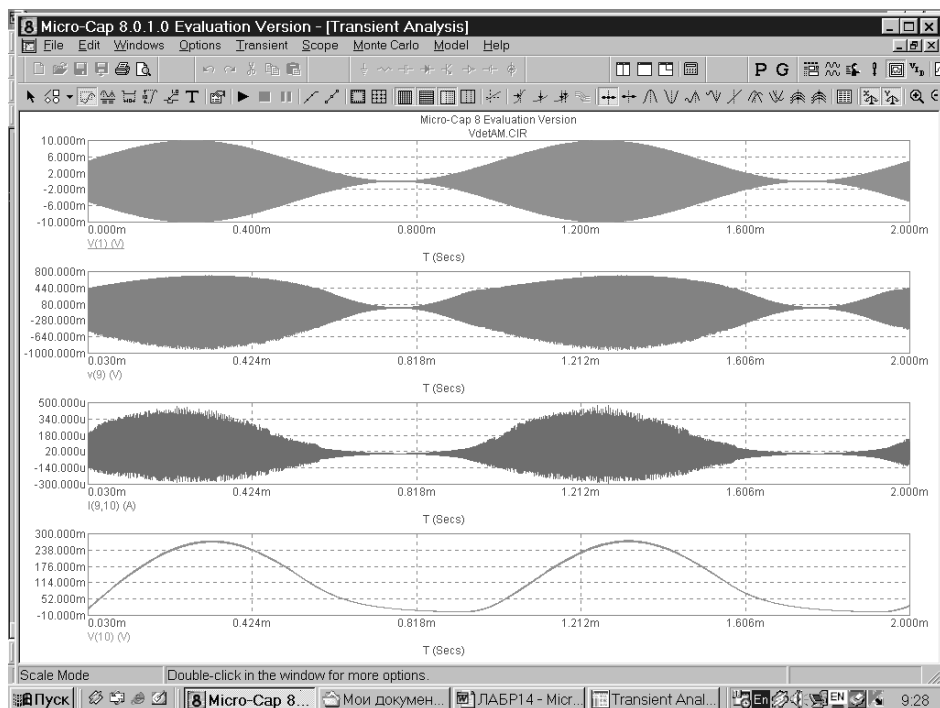


Рис. 14.34

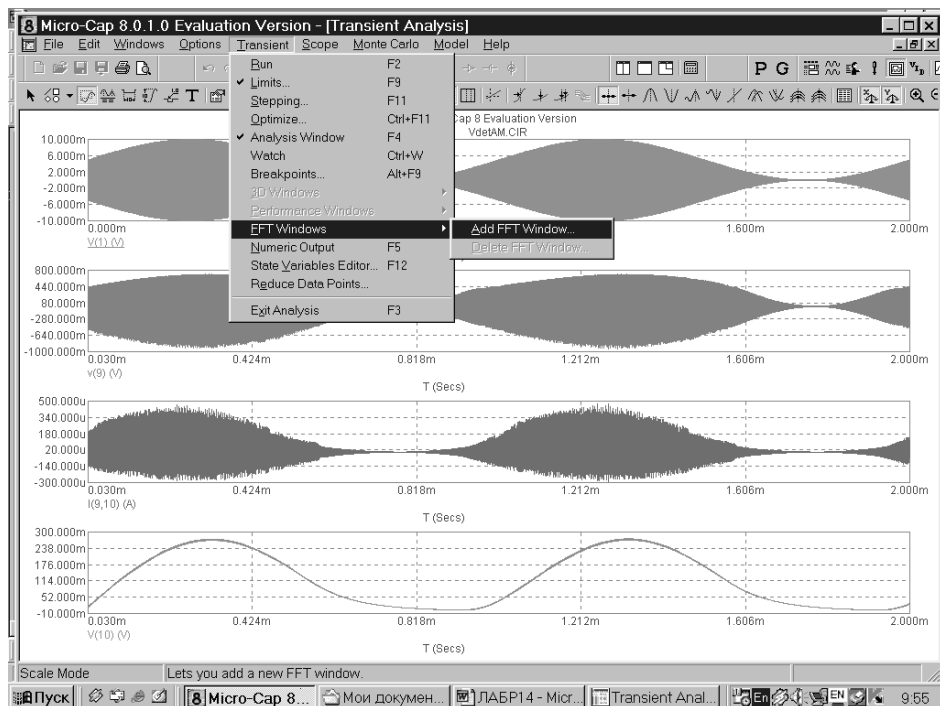


Рис. 14.35

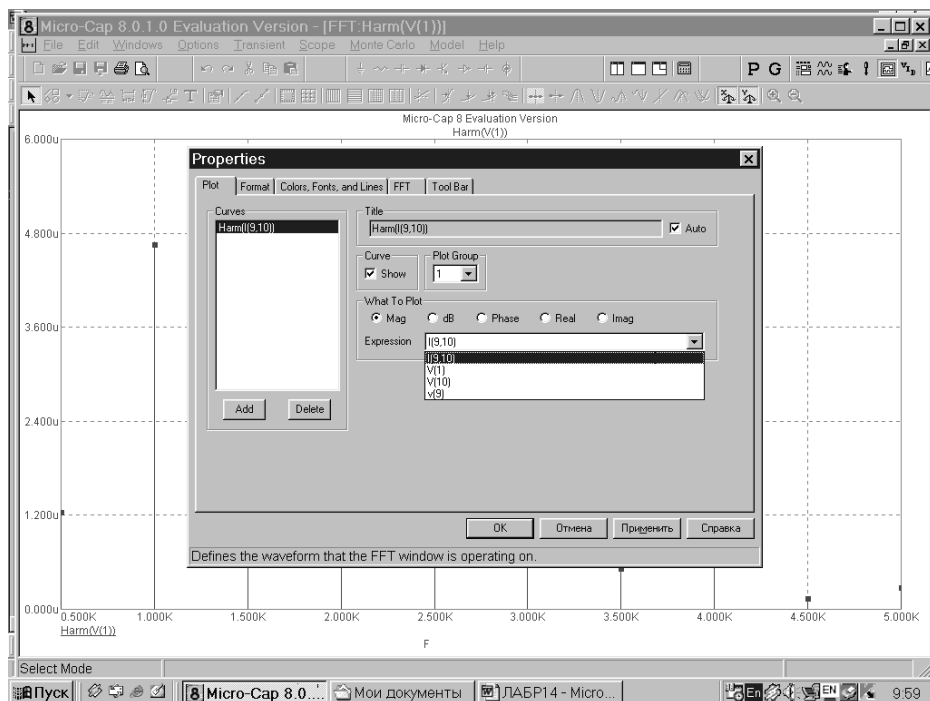


Рис. 14.36

можно изменить пределы анализа, точность и масштаб выводимых кривых; на закладке Colors, Font and Lines можно изменить цвет и толщину линий выводимых графиков; на закладке FFT (рис. 14.37) верхний (Upper) и нижний пределы временного интервала (Time Limit), где определяется спектральный состав. Число выбранных на нем точек (Number of Points) определяет точность вычислений, а число учитываемых и выводимых на экран спектральных составляющих указывается в рамке Auto Scaling. В указанном на рис. 14.37 варианте на экран выводится постоянная составляющая спектра (помечен режим Include DC Harmonic) и первые 10 гармоник спектра (Auto Scale First 10 Harmonics). Панели Default и Set Default используются для подтверждения введенных изменений (указание о выводе на экран спектра выбранной кривой, заданное на закладке Plot, уточняется на закладке FFT). Возвращаясь на закладку Plot, убеждаемся в правильности внесенных изменений и, после нажатия кнопки ОК, получаем выбранную спектральную характеристику. На рис. 14.38 представлен амплитудный спектр тока диода. При этом масштаб по осям абсцисс и ординат выбирается автоматически.

Проделав аналогичные манипуляции получите амплитудный спектр напряжения на нагрузке детектора для параметров схемы заданной на рис. 14.1. Оцените величину коэффициента нелинейных искажений.

Влияние нагрузки на характеристики сигнала на выходе детектора рассмотрим при изменении емкости нагрузки C4 (рис. 14.1).

Выберем в окне главного меню команду Analysis, а затем Transient на выпадающем меню и укажем условия и пределы анализа (рис. 14.39) во временной области.

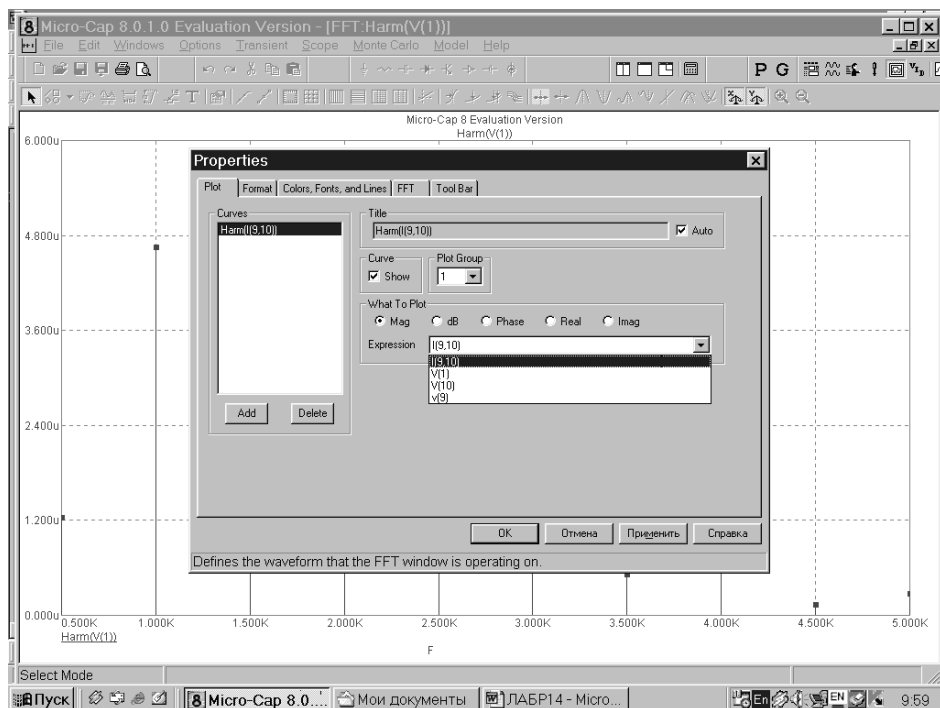


Рис. 14.37

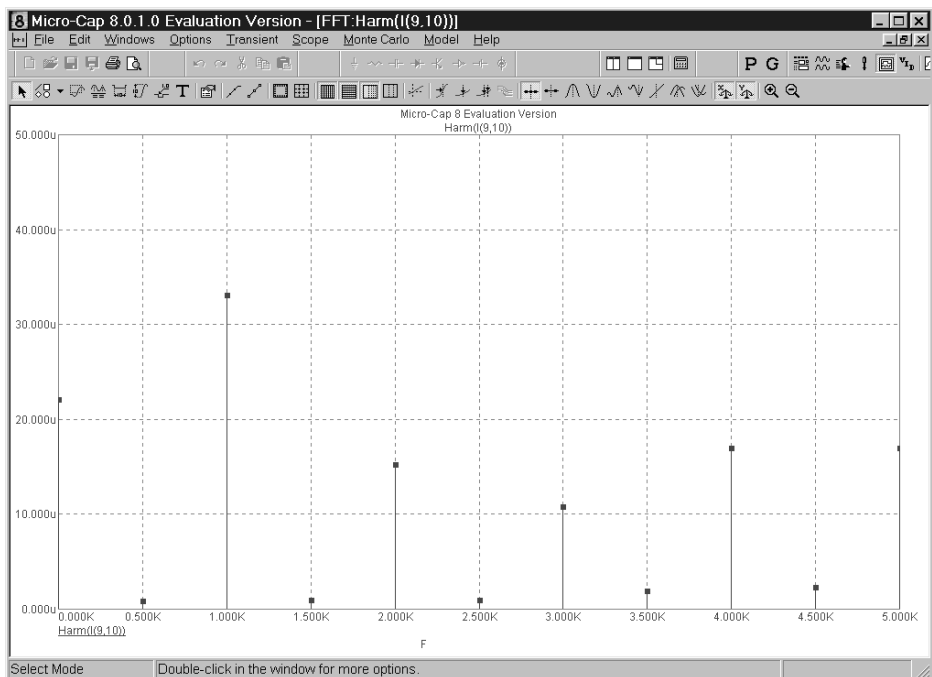


Рис. 14.38



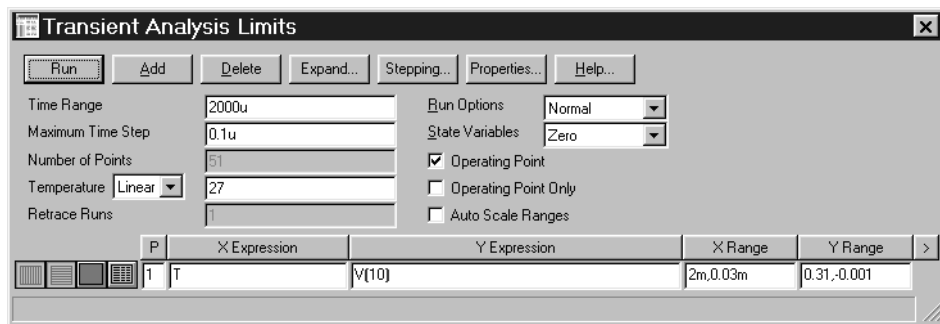


Рис. 14.39

Нажав на кнопку Stepping, в подменю Transient Analysis Limits, войдем в режим пошагового варьирования емкости нагрузки C4 (рис. 14.40).

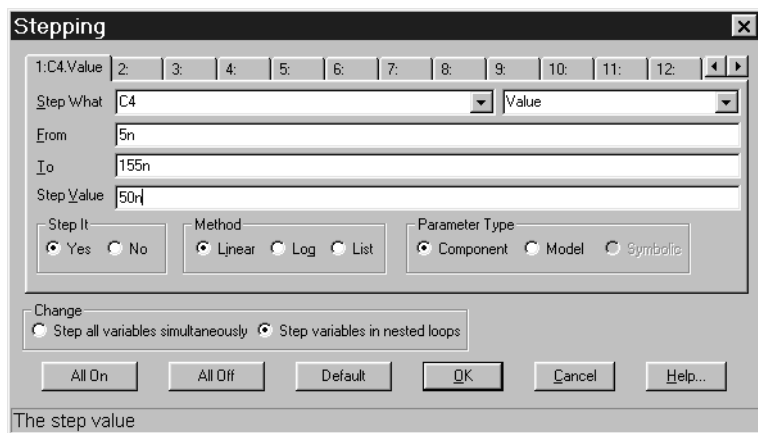


Рис. 14.40

Назначение конкретных директив, радиокнопок, панелей подробно описаны при варьировании амплитуды генератора V1 (рис. 14.28). Изменение емкости нагрузки происходит с шагом 50 нФ. От 5 до 155 нФ. Для указанных значений компонентов схемы напряжение на нагрузке детектора представлено семейством кривых на рис. 14.41.

В соответствие с п. 2.2.4 для значений сопротивления нагрузки R6, изменяющегося от 1 кОм до 5 кОм с шагом в 1 кОм, получить семейство временных характеристик выходного напряжения при величине емкости нагрузки C4 = 20 нФ.

Для каждого значения сопротивления R6 определить коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения детектора. Полученные сведения внести в таблицу 3.

Таблица 3

Сопротивление нагрузки, кОм	1	2	3	4	5
Коэффициент нелинейных искажений, %					

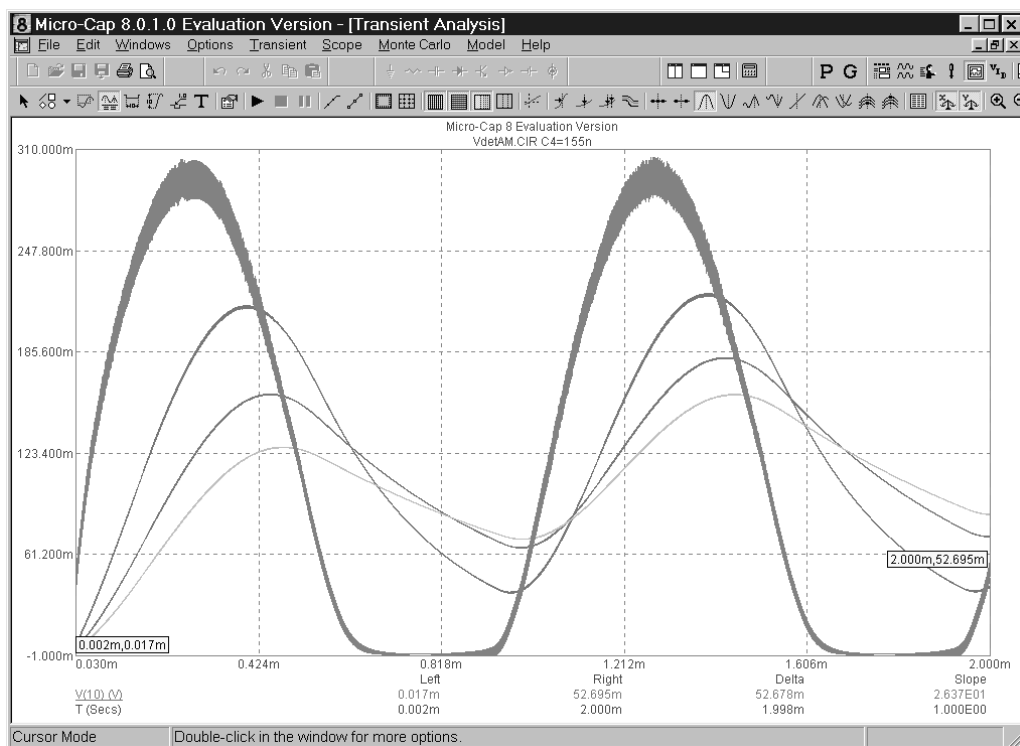


Рис. 14.41

## 5. Содержание отчета

5.1. Принципиальная схема амплитудного детектора.

5.2. Распечатку АЧХ усилителя с указанием значений коэффициента усиления и ширины полосы пропускания (должно обеспечиваться соответствие с таблицей 2).

5.3. Характеристики детектирования, полученные в результате машинного моделирования, для величины сопротивления нагрузки  $R_6 = 1 \text{ кОм}$ ,  $5 \text{ кОм}$  и  $10 \text{ кОм}$ .

5.4. Временные зависимости выходного напряжения в зависимости от сопротивления нагрузки и соответствующие каждому значению коэффициента нелинейных искажений (таблица 3).

5.5. Краткие выводы.

## 6 Контрольные вопросы

6.1. Чем определяется коэффициент передачи амплитудного детектора?

6.2. Как оценить коэффициент передачи детектора по характеристике детектирования?

**6.3.** Назовите причины нелинейных искажений при детектировании АМ-сигналов.

**6.4.** Как зависит значение коэффициента передачи детектора от сопротивления нагрузки?

**6.5.** В чем отличие спектров тока диода детектора и выходного напряжения?

**6.6.** Как зависит величина нелинейных искажений при детектировании АМ-сигналов от нагрузки детектора?

**6.7.** Из каких условий определяется постоянная времени нагрузки детектора.

**6.8.** Что такое характеристика детектирования?

**6.9.** Как влияет на форму напряжения на нагрузке детектора величина емкости в нагрузке детектора?

**6.10.** Поясните принцип получения полезного (низкочастотного) сигнала на нагрузке детектора для известного спектра входного сигнала и частотных свойств детектора.

## 7 Список литературы

1. Радиопремные устройства / Под ред. проф. Н. Н. Фомина. М.: Радио и связь. 2003. С. 170—191.
2. Радиоприемные устройства / Под ред. проф. А. Г. Жуковского. М.: ВШ, 1989. С. 122—137.
3. Головин О. В. Радиоприемные устройства. М.: ВШ, 1997. С. 153—174.
4. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия—Телеком, 2003. 364 с.
5. <http://WWW.spectrum-soft.com/demoform.shtm> (адрес в Internet для получения студенческой версии ССМ МС).

## 8 Краткие теоретические сведения

### 8.1 Общая теория детектирования

Детектор — устройство, создающее выходное напряжение в соответствие с законом модуляции входного сигнала. Амплитудный детектор формирует напряжение в соответствие с законом модуляции амплитуды напряжения на входе амплитудного детектора (АД).

Основной тип АД — нелинейный, состоящий из нелинейного элемента и нагрузки, на которой создается напряжение низкой частоты. Другим вариантом реализации АД является устройство с периодически изменяющимися параметрами — синхронный детектор.

Наибольшее распространение вследствие простоты реализации при достаточно хороших основных показателях (коэффициент передачи, коэффициент гармоник) получил АД на полупроводниковом диоде.

При воздействии на детектор (рис. 14.42) напряжения высокочастотного сигнала  $u_{вх}(t)$  с амплитудной модуляцией в цепи нелинейного элемента НЭ протекает ток сложной формы, содержащий спектр входного сигнала и со-

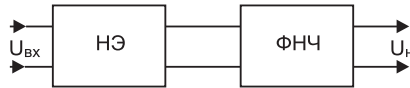


Рис. 14.42

ставляющие, появившиеся в результате умножения составляющих спектра входного сигнала и их взаимного перемножения в НЭ. Реальное число дискретных составляющих спектра тока, амплитуда которых убывает с частотой, бесконечно. Полезная составляющая тока НЭ с частотой огибающей АМ сигнала, полученная в результате перемножения составляющих спектра входного сигнала, выделяется фильтром низкой частоты ФНЧ (рис. 14.43, 14.44). Фильтр реализуется в виде простейшей RC цепочки, позволяющей выделять медленно изменяющееся напряжение низкой частоты (по сравнению с частотой входного воздействия).

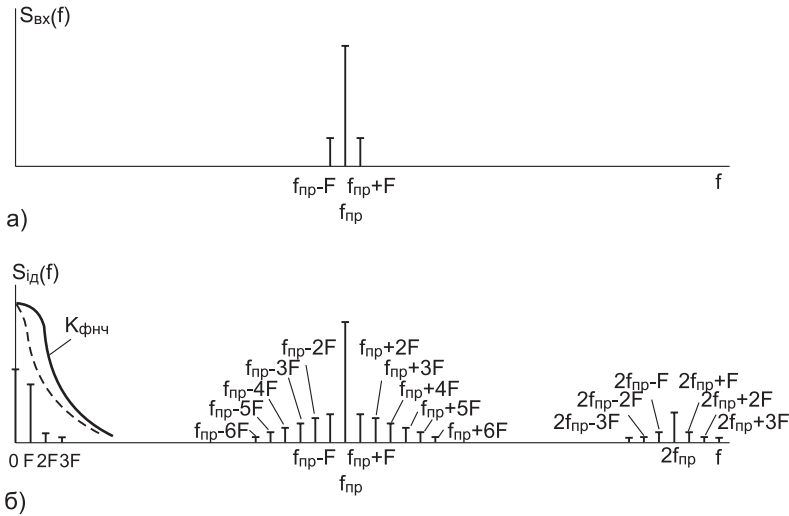


Рис. 14.43

Нелинейный элемент практически безинерционен, т. е. его свойства почти не зависят от частоты действующего сигнала. Выходной ток НЭ определяется напряжением на его входе  $u_{\text{ВХ}}$ , напряжением на нагрузке  $u_{\text{Н}}$  и статической характеристикой

$$i = f(u_{\text{ВХ}}, u_{\text{Н}}). \quad (14.1)$$

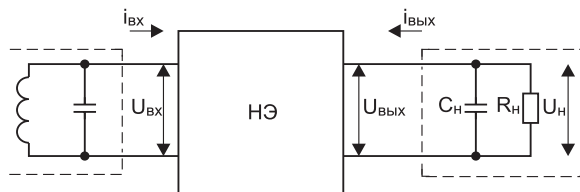


Рис. 14.44

При воздействии на входе детектора (контуре, принадлежащем выходному каскаду УПЧ) сигнала

$$u_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cos \omega t$$

ток четырехполюсника (в общем случае) в установившемся режиме будет содержать постоянную и составляющие с частотой  $\omega$ ,  $2\omega$ ,  $3\omega$ , ... Все эти составляющие тока будут создавать напряжение  $u_{\text{н}}$  на нагрузке (рис. 14.44)  $Z_{\text{н}}$ , также изменяющееся с частотой  $\omega$ :

$$u_{\text{н}} = f_{\text{н}}(i), \quad (14.2)$$

где  $f_{\text{н}}(i)$  — линейная функция, связывающая ток в нагрузке с напряжением на нагрузке.

Совместно решая уравнения (14.1) и (14.2) можно найти ток и напряжение на нагрузке  $u_{\text{н}}$  при воздействии сигнала, если известны  $f(u_{\text{вх}}, u_{\text{н}})$  и  $f_{\text{н}}(i)$ .

Изменение амплитуды входного сигнала  $U_{\text{вх}}$  вызывает приращение постоянного тока  $\Delta I$

$$\Delta I = I_0 - i_0,$$

где  $I_0$  постоянная составляющая тока в цепи детектора при наличии сигнала и равна среднему значению за период сигнала

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt, \quad (14.3)$$

а  $i_0$  — выходной ток 4-полюсника при отсутствии сигнала ( $U_{\text{вх}} = 0$ ), определяется его режимом  $i_0 = f(0, u_0)$ .

Ток  $i_0$  создает падение напряжения на  $R_{\text{н}}$ :  $u_0 = I_0 R_{\text{н}}$ .

Приращение постоянной составляющей напряжения на нагрузке детектора

$$U_{0\text{н}} = I_0 R_{\text{н}}$$

в установившемся режиме при действии сигнала составит:  $\Delta u_{\text{н}} = \Delta I R_{\text{н}}$ .

В общем случае, для детекторов на полупроводниковых диодах  $i = f(u_{\text{р}})$ , где  $u_{\text{р}} = u_{\text{вх}} + E_0$ ,  $E_0$  — начальное напряжение смещения.

Включение параллельно  $R_{\text{н}}$ ,  $C_{\text{н}}$  существенно влияет на величину выпрямленного напряжения. Увеличение  $C_{\text{н}}$  приводит к снижению сопротивления нагрузки на частоте  $\omega$  и при условии

$$1/\omega C_{\text{н}} \ll R_{\text{н}} \quad (14.4)$$

переменная составляющая с частотой входного сигнала будет мала по сравнению с постоянной составляющей выходного напряжения. Однако, слишком большое значение  $C_{\text{н}}$  может привести к искажениям при детектировании АМ сигналов из-за слишком большой постоянной времени цепочки  $C_{\text{н}} R_{\text{н}}$ , когда скорость изменения напряжения на нагрузке оказывается меньше скорости изменения амплитуды входного сигнала. Условием, определяющим значение емкости в цепи нагрузки АД является

$$dU_{\text{вх}}/dt \ll du_{\text{н}}/dt, \quad (14.5)$$

исключающим появление нелинейных искажений огибающей входного сигнала.

Наиболее важной характеристикой АД является характеристика детектирования, позволяющая определить напряжение на выходе, коэффициент передачи, оценить ограничения на амплитуду входного сигнала и глубину модуляции. Характеристика детектирования в общем случае может быть получена при наложении некоторых ограничений на условия анализа: либо при условии, что амплитуда напряжения входного сигнала  $U_{\text{вх}}$  меняется достаточно медленно (и нет ограничений на значение амплитуды), либо для достаточно быстрых изменений  $U_{\text{вх}}$ , но для малых значений амплитуды входного сигнала.

При действии на входе АД немодулированного сигнала с амплитудой  $U_{\text{вх}}$  постоянная составляющая тока детектора  $I_0$  и напряжение на нагрузке  $u_{0\text{н}}$  определяются:

$$I_0 = \varphi(U_{\text{вх}}, u_{\text{н}}); \quad (14.6)$$

$$u_{0\text{н}} = I_0 R_{\text{н}} + E_0, \quad (14.7)$$

где  $E_0$  — начальное смещение.

При медленном за период несущего колебания, изменении амплитуды входного сигнала  $\Delta U_{\text{вх}}$ , напряжение на входе АД можно записать

$$u_{\text{вх}} = (U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}}) \cos \omega t. \quad (14.8)$$

При действии такого сигнала на входе АД среднее значение тока детектора и напряжения на нагрузке будут изменяться во времени и их мгновенные значения будут

$$i_0 = I_0 + \Delta I_0; \quad (14.9)$$

$$u_{\text{н}} = u_{0\text{н}} + \Delta u_{\text{н}}, \quad (14.10)$$

где  $I_0$  и  $u_{0\text{н}}$  — постоянная составляющая тока детектора и напряжение на нагрузке детектора при действии на входе немодулированного сигнала;  $\Delta I_0$  и  $\Delta u_{\text{н}}$  — их приращения при изменении амплитуды входного сигнала на  $\Delta U_{\text{вх}}$ . Приращения  $\Delta I_0$  и  $u_{\text{н}}$  зависят не только от изменения входного сигнала  $\Delta U_{\text{вх}}$ , но и от амплитуды немодулированного сигнала  $U_{\text{вх}}$ .

Определим из (14.10)  $u_{0\text{н}} = u_{\text{н}} - \Delta u_{\text{н}}$  и подставим в (14.6)

$$i_0 = I_0 + \Delta I_0 = \varphi(U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}}, -u_{0\text{н}} - \Delta u_{\text{н}}). \quad (14.11)$$

Разложим мгновенные значения тока АД, зависящего от мгновенной амплитуды входного сигнала и напряжения на нагрузке в степенной ряд по переменным  $\Delta U_{\text{вх}}$  и  $\Delta u_{\text{н}}$

$$\begin{aligned} I_0 + \Delta I_0 = & \varphi(U_{\text{вх}}, -u_{0\text{н}}) + \frac{\partial \varphi}{\partial U_{\text{вх}}} \Delta U_{\text{вх}} + \frac{\partial \varphi}{\partial u_{\text{н}}} \Delta u_{\text{н}} + \\ & + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U_{\text{вх}}^2} \Delta U_{\text{вх}}^2 - 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial U_{\text{вх}} \partial u_{\text{н}}} \Delta U_{\text{вх}} \Delta u_{\text{н}} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial u_{\text{н}}^2} \Delta u_{\text{н}}^2 \right) + \dots \end{aligned} \quad (14.12)$$

Частные производные, входящие в разложение, получены при условии, что функция  $\varphi(U_{\text{вх}} + \Delta U_{\text{вх}}, -u_{0\text{н}} - \Delta u_{0\text{н}})$  дифференцируема и  $U_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $u_{0\text{н}} = \text{const}$ .

В выражении (14.12)

$$\Delta I_0 = \frac{\partial \varphi}{\partial U_{\text{вх}}} \Delta U_{\text{вх}} - \frac{\partial \varphi}{\partial u_{\text{н}}} \Delta u_{\text{н}} + \dots, \quad (14.13)$$

где

$$\frac{\partial I_0}{\partial U_{\text{вх}}} = S_{\text{д}} \left|_{U_{\text{вх}} = \text{const}} \right. \quad \text{— крутизна детектирования;} \quad (14.14)$$

$$\frac{1}{\frac{\partial I_0}{\partial u_{\text{н}}}} = R_{\text{ид}} \left|_{u_{\text{н}} = \text{const}} \right. \quad \text{— внутреннее сопротивление детектора;} \quad (14.15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial U} = \mu_{\text{д}} \left|_{I_0 = \text{const}} \right. \quad \text{— коэффициент передачи амплитудного детектора.} \quad (14.16)$$

Из свойств частных производных двух функций следует

$$\mu_{\text{д}} = S_{\text{д}} R_{\text{ид}}. \quad (14.17)$$

Подставляя (14.14) и (14.15) в (14.13) получим:

$$\Delta I_0 \approx S_{\text{д}} \Delta U_{\text{вх}} - \Delta u_{\text{н}} / R_{\text{ид}}. \quad (14.18)$$

Эта формула обладает тем меньшей погрешностью, чем меньше слагаемые высших порядков  $\partial^2 \varphi / \partial U_{\text{вх}}^2$  и  $\partial^2 \varphi / \partial u_{\text{н}}^2$  в (14.12), чем меньше глубина модуляции входного сигнала или ниже модулирующая частота.

Из (14.18) следует

$$\begin{aligned} R_{\text{д}} \Delta I_0 &= \mu_{\text{д}} \Delta U_{\text{вх}} - \Delta u_{\text{н}} = \mu_{\text{д}} \Delta U_{\text{вх}} - \Delta I_0 R_{\text{н}}, \\ \mu_{\text{д}} \Delta U_{\text{вх}} &= \Delta I_0 (R_{\text{н}} + R_{\text{ид}}). \end{aligned} \quad (14.19)$$

Это уравнение (14.19) может быть представлено эквивалентной схемой (рис. 14.45а) детектора для низкочастотных переменных составляющих выпрямленных токов и напряжений. Полученная при указанных допущениях, эквивалентная схема не позволяет объяснить процесс детектирования или оценить нелинейные искажения, возникающие при детектировании. На основании теоремы об эквивалентном генераторе схему (рис. 14.45а) можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 14.45б), позволяющую оценить

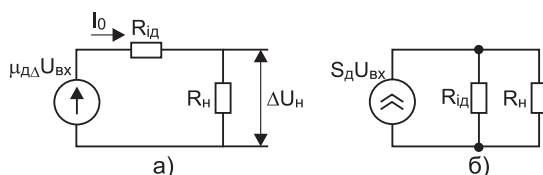


Рис. 14.45

шунтирующее влияние детекторной цепи на контур усилителя промежуточной частоты, представленного генератором тока.

Соотношения, описывающие свойства АД  $\mu_d$ ,  $S_d$ ,  $R_{ид}$ , могут быть получены для любых значений амплитуды сигнала и любой схемы АД. Параметры конкретной схемы АД должны быть определены для выбранной схемы АД и режима работы нелинейного элемента. Параметры АД могут быть определены с помощью семейства характеристик выпрямления детектора, полученных экспериментально.

## 8.2 Детектирование сильных сигналов. Установившийся режим

Одной из наиболее важных характеристик АД является **характеристика детектирования**: зависимость приращения постоянного напряжения на нагрузке в установившемся режиме  $\Delta u_n$  от амплитуды немодулированного сигнала  $U_{вх}$

$$\Delta u_n = f(U_{вх}).$$

Эта характеристика позволяет определить величину выпрямленного напряжения в установившемся режиме  $\Delta u_n$  для любого значения амплитуды входного сигнала. Она позволяет определить величину коэффициента передачи детектора  $K_d$ :

$$K_d = \Delta u_n / U_{вх}.$$

Характеристикой детектирования можно пользоваться для определения выходного напряжения и при воздействии амплитудно-модулированного АМ сигнала при небольшой глубине модуляции ( $m \ll 1$ ) или когда период модулирующего колебания значительно больше постоянной времени цепи нагрузки ( $\tau = R_n C_n$ ).

Типичная характеристика детектирования диодного АД представлена на рис. 14.46.

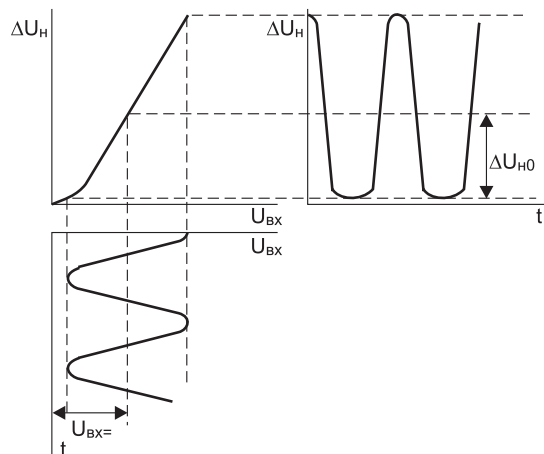


Рис. 14.46



Воздействие на АД амплитудно-модулированного сигнала

$$u_{\text{вх}} = U_{\text{вх0}}(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (14.20)$$

огибающая которого, изменяется по гармоническому закону с частотой  $\Omega$ , а  $U_{\text{вх0}}$  — амплитуда несущего колебания,  $m$  — глубина модуляции,  $\omega$  — частота несущего колебания,  $\Omega$  — частота модулирующего колебания,  $U_{\text{вх}} =$  — постоянная составляющая огибающей входного сигнала

$$U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх0}}(1 + m \cos \Omega t)$$

приводит при малых амплитудах к искажению формы выходного напряжения нелинейным искажениям, что говорит о появлении нелинейных искажений при детектировании.

Графический способ определения напряжения низкой частоты на выходе АД с помощью характеристики детектирования позволяет оценить, например методом 5 ординат, величину нелинейных искажений при детектировании.

Как следует из (14.19), приращение постоянной составляющей тока детектора определяется соотношением

$$\Delta I_o = \mu \Delta U_{\text{вх}} / (R + R_{\text{ид}}).$$

При гармонической модуляции амплитуды входного сигнала, когда нагрузкой является ФНЧ ( $R_{\text{н}} C_{\text{н}}$ ) амплитуда тока первой гармоники низкой частоты АД

$$I_{\Omega} = \mu_d m U_{\text{вх0}} (R_{\text{ид}} + Z_{\text{н}}).$$

Воздействие АМ сигнала на АД (рис. 14.44) отражается эквивалентным генератором ЭДС (рис. 14.45а)  $e_r = \mu m U_{\text{вх0}}$ , а свойства детектора описываются двухполюсником с внутренним сопротивлением  $R_{\text{ид}}$ , зависящим от выходного напряжения на нагрузке.

При условии малой глубины модуляции входного сигнала  $m \ll 1$  задача определения выходного напряжения  $U_{\Omega}$  сводится к линейной

$$\underline{U}_{\Omega} = I_{\Omega} \underline{Z}_{\text{н}} = \mu_d m U_{\text{вх0}} (\underline{R}_{\text{ид}} + \underline{Z}_{\text{н}}).$$

Модуль коэффициента передачи для типовой нагрузки  $1/\underline{Z}_{\text{н}} = 1/R_{\text{н}} + j \Omega C_{\text{н}}$

$$K_d = \mu_d / \sqrt{(1 + R_{\text{ид}}/R_{\text{н}})^2 + (\Omega C_{\text{н}} R_{\text{ид}})^2}.$$

Рассмотрим работу АД на полупроводниковом диоде при действии на входе немодулированного сигнала:

$$u_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} \cos \omega t. \quad (14.21)$$

Часто используемая в радиоприемных устройствах принципиальная схема АД (рис. 14.47) на полупроводниковом диоде работает без дополнительного смещения (напряжения задержки). Для малой амплитуде входного напряжения (**режим слабых сигналов**) начальный участок вольт-амперной характеристики ВАХ диода точнее всего аппроксимируется экспонентой, что позволяет достаточно легко определить основные характеристики АД и построить харак-

теристику детектирования. Исходя из общей теории детектирования входное сопротивление АД

$$R_{\text{вх д}} = U_{\text{вх}}/I_1 = 1/S, \quad (14.22)$$

где  $I_1$  — амплитуда первой гармоники разложения в ряд Фурье тока диода, а  $S$  — крутизна статической характеристики диода. Малая величина входного сопротивления вызывает сильное шунтирование контура. Коэффициент передачи АД  $K_d$  при слабых сигналах  $K_d \cong \mu_d = S'U_{\text{вх}}/S$  пропорционален амплитуде входного сигнала, т. е.  $K_d \ll 1$ . Линейная зависимость  $K_d$  от амплитуды входного сигнала приводит к квадратичной детекторной характеристике

$$\Delta u_n = mU_{\text{вх0}}K_d = mS'U_{\text{вх0}}^2/S,$$

что указывает на значительные нелинейные искажения, создаваемые при работе с входным сигналом малой амплитуды.

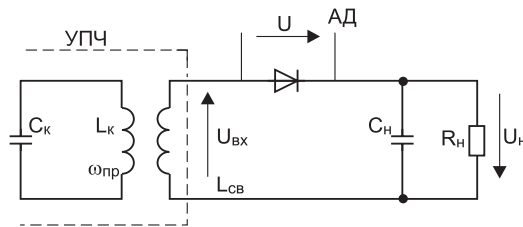


Рис. 14.47

Использование линейной части характеристики детектирования, что соответствует **режиму сильных сигналов**, уменьшает уровень нелинейных искажений. В реальных условиях амплитуда сигнала на входе АД составляет не менее 0,5—1 В, что соответствует режиму сильного сигнала и обеспечивает минимум нелинейных искажений, и поэтому получил наибольшее распространение.

Полупроводниковые диоды, применяемые в АД для реальных значений амплитуды входного сигнала, используют отрезок прямой ветви статической ВАХ, который с достаточной для практики точностью, может быть аппроксимирован прямой. Влиянием обратной ветви диода, крутизна которой примерно на два-три порядка меньше крутизны в рабочей области прямой ветви, можно пренебречь.

Будем считать, что ток диода однозначно определяется напряжением на диоде  $i = f(u)$ , без учета его инерционных свойств (отсутствует влияние на формирование процесса в данный момент времени предшествующих ему). В этом случае  $i = f(u)$  — является статической ВАХ диода. Нагрузка должна обладать малым сопротивлением на частоте входного сигнала, т. е. для входного сигнала (14.20) выходное напряжение  $u_n = \text{const}$  (пульсации напряжения отсутствуют при постоянстве амплитуды на входе АД). Это достигается выполнением условия, при котором постоянная времени цепи нагрузки  $\tau_n = C_n R_n$  значительно больше периода высокочастотных колебаний

$$\tau_n \gg T, \quad (14.23)$$

где  $T = 2\pi/\omega_{\text{пр}}$ .

Напряжение, создаваемое на нагрузке будет определяться постоянной составляющей тока диода  $I_0 = U_{H0}/R_H$ , где  $U_{H0}$  — напряжение постоянной составляющей.

Для ВАХ реальных полупроводниковых диодов с принятыми допущениями и линейно-ломаной аппроксимацией ВАХ (рис. 14.48) можно записать:

$$i = 0, u < U_0; \quad (14.24)$$

$$i = S(u - U_0), u > U_0,$$

где  $U_0$  — напряжение отсечки.

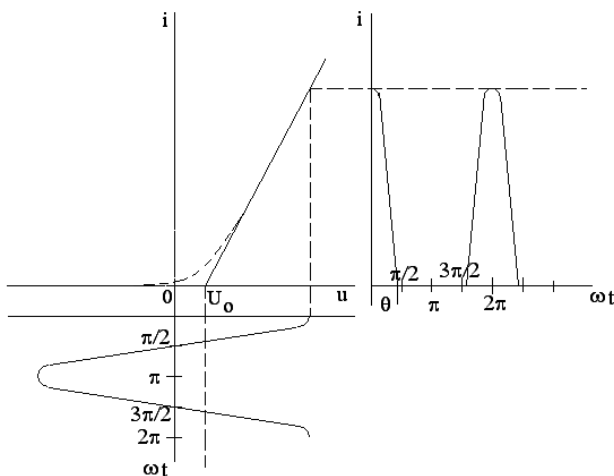


Рис. 14.48

Форму тока диода в виде усеченных косинусоидальных импульсов находят методом проекции. Половина части периода, выраженной в радианах или градусах, в течение которой существует ток диода, называют углом отсечки.

С учетом полярности напряжений, указанных на рис. 14.47:

$$u_{BX} = U_{BX} \cos \omega t = u + u_H; \quad (14.25)$$

$$u = U_{BX} \cos \omega t - u_H; \quad (14.26)$$

входное косинусоидальное напряжение создает ток диода на промежутке времени  $0 - \theta$ , т. е.

$$i = S(u - U_0), \quad 0 < \omega t < \theta; \quad (14.27a)$$

$$i = 0, \quad \theta < \omega t < 2\pi - \theta. \quad (14.27b)$$

При  $\omega t = \theta$ , из (14.25) следует:

$$u_{BX} = U_{BX} \cos \theta = u - u_H \quad (14.28)$$

и напряжение на диоде равно напряжению отсечки  $u = U_0$ :

$$U_0 = U_{BX} \cos \theta + u_H. \quad (14.29)$$

Подставляя (14.28) и (14.29) в выражение (14.27) получаем:

$$i = S(U_{\text{вх}} \cos \omega t - U_{\text{вх}} \cos \theta). \quad (14.30)$$

Тогда постоянная составляющая разложения в ряд Фурье тока диода:

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\theta S(U_{\text{вх}} \cos \omega t - U_{\text{вх}} \cos \theta) d\omega t = \frac{SU_{\text{вх}}}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta).$$

Напряжение на нагрузке детектора, обусловленное постоянной составляющей тока диода, при отсутствии модуляции входного сигнала (14.21):

$$\begin{aligned} u_{\text{н}} &= I_0 R_{\text{н}} = \frac{SR_{\text{н}}}{\pi} (U_{\text{вх}} \sin \theta - U_{\text{вх}} \theta \cos \theta) = \\ &= \frac{SR_{\text{н}} U_{\text{вх}} \cos \theta}{\pi} (\text{tg } \theta - \theta). \end{aligned} \quad (14.31)$$

Подставляя из (14.28)  $U_{\text{вх}} \cos \theta = U_0 - u_{\text{н}}$ , получаем:

$$\frac{\text{tg } \theta - \theta}{\pi} = \frac{u_{\text{н}}}{SR_{\text{н}}(U_0 + u_{\text{н}})} = \frac{1}{SR_{\text{н}}(1 + U_0/u_{\text{н}})}. \quad (14.32)$$

Как следует из (14.32) при  $U_0 = 0$  угол отсечки определяется лишь нагрузкой и крутизной диода и, при выбранных  $S$  и  $R_{\text{н}}$ , является постоянной величиной, не зависящей от амплитуды входного сигнала. Параметры АД, у которого аппроксимированная ВАХ проходит через начало координат (напряжение отсечки равно нулю) формулы (14.13–14.15) принимают вид:

$$S_{\text{д}} = S \sin \theta / \pi; \quad (14.33)$$

$$R_{\text{ид}} = \pi / S \theta; \quad (14.34)$$

$$R_{\text{вх д}} = U_{\text{вх}} / I_1 = 2\pi / S(2\theta - \sin 2\theta); \quad (14.35)$$

$$K = U_{\text{н}} / U_{\text{вх}} = \cos \theta, \quad (14.36)$$

где

$$I_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\theta i(\omega t) \cos \omega t \, d\omega t = SU_{\text{вх}} (\theta - \sin \theta \cos \theta) / \pi -$$

амплитуда первой гармоники разложения в ряд Фурье тока диода.

Как видно из (14.32) увеличение  $SR_{\text{н}}$  (при  $U_0 = 0$ ) уменьшает угла отсечки и, соответственно, (14.34), (14.35) увеличивает входное сопротивление и коэффициент передачи детектора. Отсюда для повышения коэффициента передачи и уменьшения шунтирующего действия детектора надо обеспечивать максимум произведения  $SR_{\text{н}}$ . Выбор диода с большей крутизной увеличивает амплитуду импульса тока диода ( $i_{\text{макс}}$ , рис. 14.49),  $I_0$ ,  $u_{\text{н}}$ , что приводит к отрицательному смещению на диоде при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$ . Аналогично угол отсечки изменяется по отношению к вариации  $R_{\text{н}}$ . Поскольку  $u_{\text{н}} = U_{\text{вх}} \cos \theta$ , то характеристика детектирования будет прямолинейной и детектирование будет происходить без нелинейных искажений.

Напряжение отсечки отличное от нуля ( $U_0 > 0$ , рис. 14.49) исключает необходимость применения дополнительного источника смещения в схеме АД. Для амплитуд входного сигнала  $U_{\text{вх}} < U_0$  диод заперт и детектирование входного сигнала не происходит. Таким образом, в паузах между сигналами слабые посторонние воздействия не проходят через приемник.

Сложное трансцендентное уравнение (14.32) не позволяет в явном виде получить зависимость угла отсечки от напряжения на нагрузке. Для малых углов отсечки  $\theta < 45^\circ$  и  $U_0 = 0$  формулу (14.32) можно заменить приближенным выражением.

Так как

$$\operatorname{tg} \theta \approx \theta + \theta^3/3, \quad (14.37)$$

тогда

$$\theta \approx \sqrt[3]{\frac{3\pi}{SR_n(1 + U_0/u_n)}}. \quad (14.38)$$

Из (14.38) следует, что для получения малого угла отсечки (большого коэффициента передачи детектора) необходимо выбирать большую величину нагрузки  $R_n$ .

**Характеристика детектирования** получается путем совместного решения уравнений (14.29) и (14.32). Для известного напряжения отсечки ( $U_0$ ), полученного при аппроксимации ВАХ диода отрезками двух прямых, и, выбранного значения выходного напряжения  $u_n$ , по формуле (14.32) определяем величину  $(\operatorname{tg} \theta - \theta)/\pi$  и рассчитываем угол отсечки  $\theta$  (упрощенный вариант расчета можно проводить с использованием формулы (14.38)). По полученному значению  $\theta$  находим по формуле (14.29) значение амплитуды входного сигнала  $U_{\text{вх}}$ :

$$U_{\text{вх}} = U_0(1 + u_n/U_0)\cos \theta,$$

а затем строим (рис. 14.46) зависимость  $\Delta u_n = f(U_{\text{вх}})$ .

Полученная зависимость будет отличаться от линейной, особенно вблизи значений амплитуд входного сигнала  $U_{\text{вх}} = U_0$ .

### 8.3 Детектирование АМ колебаний

Рассмотрим детектирование АМ колебаний при действии на входе напряжения

$$u_{\text{вх}} = U_{\text{вх}0}(1 + m\cos \Omega t)\cos \omega t.$$

Как было показано ранее для линейно-ломаной аппроксимации ВАХ диода и при напряжении отсечки равно нулю ( $U_0 = 0$ ), детектирование происходит без искажений  $K_d = \cos \theta = \text{const}$  и  $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}0}(1 + m\cos \Omega t)$ . Следовательно, напряжение на нагрузке детектора

$$u_n = K_d U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}0}(1 + m\cos \Omega t)\cos \theta,$$

повторяет (см. рис. 14.50) закон изменения огибающей входного сигнала (идеальная характеристика детектирования).

Постоянство угла отсечки для известных  $S$  и  $R_n$  (напряжение отсечки  $U_0 = 0$ ) АД при действии на его входе АМ сигнала создает на нагрузке напряжение, постоянная составляющая которого, изменяется по закону положительной полуволны огибающей. Так как диод является двухполюсником, то эта постоянная составляющая создает запирающее напряжение на диоде, уменьшая амплитуду импульса тока диода, обеспечивая при этом постоянство угла отсечки (рис. 14.49,  $\theta = \text{const}$ ).

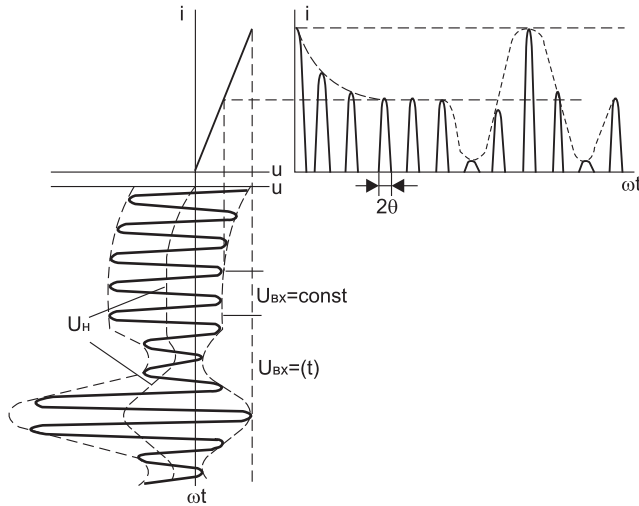


Рис. 14.49

Реально в АД возникают нелинейные искажения вследствие неидеальности характеристики детектирования, выбора нагрузки детектора без учета влияния параметров входного сопротивления усилителя низкой частоты и принимаемого сигнала.

#### Искажения из-за нелинейности характеристики детектирования.

Характеристика детектирования реальных АД отлична от идеальной, что вызвано достаточно сложной зависимостью угла отсечки от параметров нагрузки и выходного напряжения. Следствием этого является нелинейный участок характеристики детектирования при малых значениях амплитуды входного сигнала (рис. 14.50).

Начальный участок нелинейности этой характеристики  $U_{\text{нел}}$  для германиевых диодов составляет величину напряжения около 0,1 В. Для значений амплитуды входного сигнала меньше  $U_{\text{нел}}$  возникают искажения формы протектированного напряжения, что указывает на нелинейные искажения выходного сигнала. Снизить искажения, обусловленные нелинейностью характеристики детектирования, можно увеличивая  $U_{\text{вх min}}$  и обеспечивая выполнение условия  $U_{\text{вх min}} > U_{\text{нел}}$ .

Практически для снижения искажений необходимо уменьшить значение глубины модуляции  $m$  принимаемого сигнала, чтобы выполнить условие

$$U_{\text{вх0}} \geq (U_{\text{нел}} / (1 - m)). \quad (14.39)$$

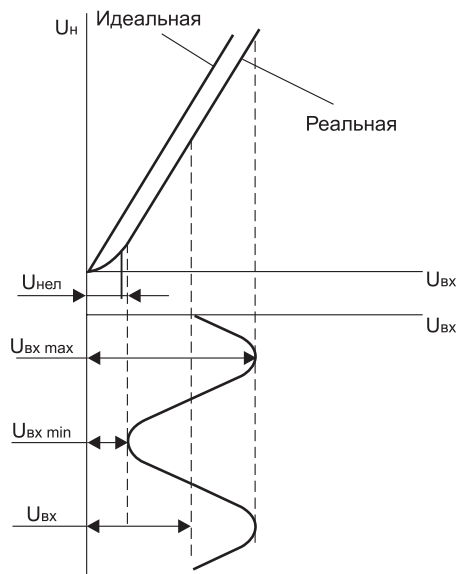


Рис. 14.50

**Искажения из-за большой постоянной времени нагрузки.** Рассматривая, в первом приближении, ток диода в виде последовательности косинусоидальных импульсов, амплитуда которых меняется в соответствии с законом огибающей входного сигнала, опишем временной процесс на нагрузке АД (рис. 14.51а). Импульс тока диода в момент времени  $t_1$  создает зарядный ток через конденсатор, опережающий напряжение на нем (параллельное соединение  $C_H R_H$ ) примерно на  $90^\circ$ . Постепенный заряд конденсатора (напряжение возрастает по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau_z = r_d C_H$ , где  $r_d$  — сопротивление открытого диода) приводит к возрастанию на нем напряжения, являющегося запирающим для диода. В момент времени  $t_2$  входное и напряжение на нагрузке выравниваются и диод запирается. Напряжение на нагрузке (конденсаторе) запертого диода создает разрядный ток через  $R_H$  с постоянной времени ( $\tau_p = C_H R_H$ ) значительно большей  $\tau_z$ , т. к.  $R_H \gg r_d$ .

При правильном выборе параметров нагрузки ( $\tau_p = \tau_{p \text{ опт}}$ ) формирующееся напряжение успевает следить за изменениями огибающей входного сигнала.

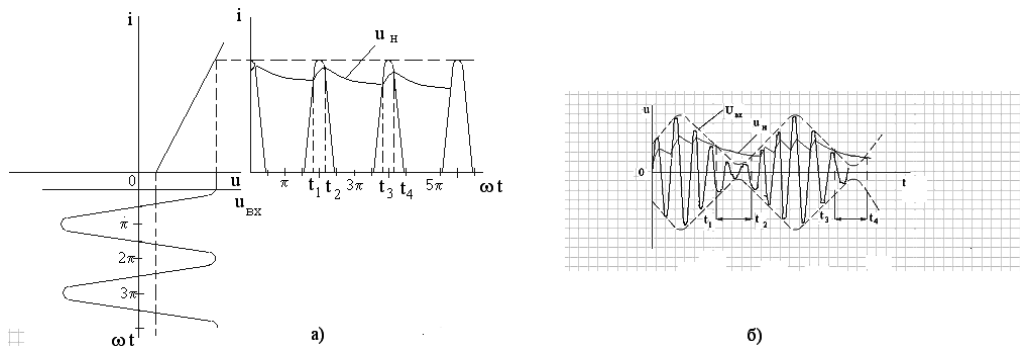


Рис. 14.51

При слишком большой  $C_n$  или  $R_n$  (рис. 14.51б) выходное напряжение (из-за большой постоянной времени,  $\tau_p \rightarrow \infty$ ) становится по форме ближе к постоянному значению с некоторыми колебаниями вокруг него. В этом случае подавляется полезная составляющая выходного напряжения с частотой  $\Omega$  и выделяется в основном постоянная составляющая из-за сужения полосы пропускания ФНЧ (рис. 14.43б, штриховая линия). Условием обеспечения неискаженного детектирования АМ сигнала является: скорость разряда конденсатора  $C_n$  должна быть больше скорости изменения огибающей входного сигнала

$$|du_n/dt| > |dU_{вх}/dt|. \quad (14.40)$$

Напряжение на нагрузке в момент времени  $t_2$ , с которого начинается разряд конденсатора  $u = u_{12}e^{-t/RnC_n}$ , а напряжение огибающей на входе АД  $U_{вх} = U_{вх0}(1 + m\cos\Omega t)$ .

Вычислив производные и подставив в (14.40), получим условие получения неискаженного детектирования через параметры сигнала и нагрузки:

$$\sqrt{1 - m^2} / m\Omega. \quad (14.41)$$

Из (14.41) следует, что постоянная времени разряда должна быть тем меньше, чем выше модулирующая частота входного сигнала  $\Omega$  и больше глубина модуляции  $m$ . Малая глубина модуляции как и низкая модулирующая частота приводят к медленному изменению амплитуды входного сигнала и выходной процесс (напряжение на нагрузке) успевает следить за этим изменением. Необходимость выбора большего сопротивления нагрузки  $R_n$  для получения большего коэффициента передачи (меньшего угла отсечки, (38)) требует уменьшения емкости нагрузки  $C_n$ . Ее величина должна быть всегда существенно больше емкости диода, т. к. в противном случае  $K_d$  уменьшается.

**Искажения обусловленные соизмеримостью частоты модуляции и частоты несущего колебания.** Выполнение условия  $f \gg F$  ( $\omega \gg \Omega$ ) и правильный выбор параметров нагрузки (14.40) обеспечивает неискаженное детектирование АМ сигнала. При уменьшении частоты несущего колебания ( $f \approx 2+3F$ ) напряжение на нагрузке не успевает следить за изменением  $U_{вх}$  и будет представлять последовательность импульсов близких по форме току диода (рис. 14.52). Получение выходного напряжения повторяющего закон изменения огибающей входного сигнала с допустимыми искажениями обеспечивается при условии  $f > (5+10)F_{\max}$ , где  $F_{\max}$  — максимальная частота модуляции.

**Искажения, обусловленные влиянием разделительной цепи.** Сигнал на нагрузке детектора ( $u_n$ , рис. 14.49) содержит кроме полезной составляющей ( $F$ ) также и постоянную составляющую, влияющую на режим работы первого каскада усилителя низкой частоты УНЧ. Для исключения влияния по постоянному току АД и каскада УНЧ между ними включают разделительный конденсатор  $C_p$  достаточно большой величины, обладающего на частоте полезного сигнала малым сопротивлением (рис. 14.53).

На рис. 14.53а резистор  $R_{вх}$  является входным сопротивлением каскада УНЧ. Напряжение на выходе детектора  $u_n$  теперь формируется с участием разделительной цепи  $C_p R_{вх}$ . Импульс тока диода заряжает одновременно два конденсатора  $C_n$  и  $C_p$ . Заряд конденсатора  $C_p$  происходит значительно медленнее



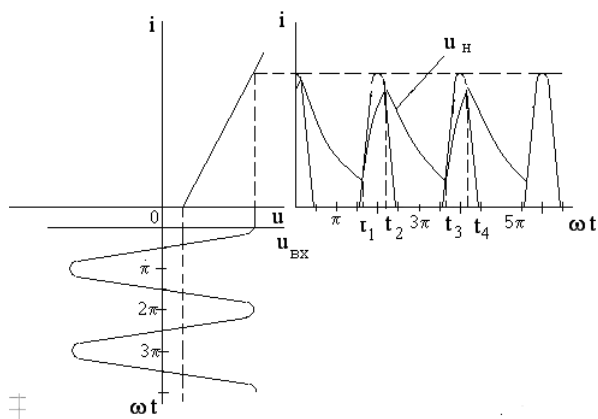
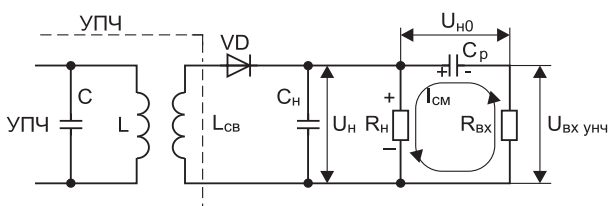
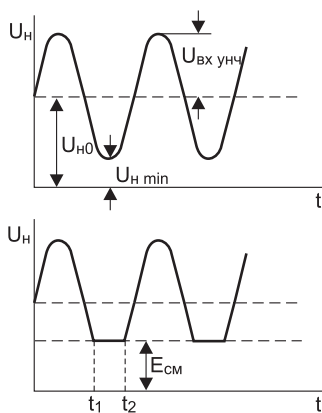


Рис. 14.52



а



б

Рис. 14.53

из-за наличия резистора  $R_{\text{вх}}$ . Импульс тока диода создает результирующее напряжение  $U_H + U_{C_p}$ , являющееся запирающим напряжением на диоде. Равенство амплитуды входного сигнала и результирующего напряжения приводит к запирающему диода и появлению токов разряда. Напряжение на  $C_p$ , создающее за счет тока разряда дополнительное напряжение смещения  $E_{\text{см}}$  на резисторе  $R_H$ . Напряжение смещения из-за большой постоянной времени разряда

$\tau_{\text{см}} = C_p(R_H + R_{\text{вх}})$  практически не изменяется на периоде модулирующего колебания, создавая на диоде постоянное запирающее напряжение ( $U_{Cp} = U_{H0}$ ):

$$E_{\text{см}} = U_{Cp} R_H / (R_H + R_{\text{вх}}). \quad (14.42)$$

Искажения выходного сигнала проявляются в виде среза вблизи минимальных значений амплитуды входного сигнала (рис. 14.53б). Так как это искажения напряжения на выходе АД (низкочастотного сигнала), то они проявляются на всех частотах модуляции и заметны на слух.

Искажения такого рода можно заметно уменьшить выполнив условие  $U_{\text{вх min}} \geq E_{\text{см}}$ . Для известных значений глубины модуляции ( $m$  — параметр, определяемый требованиями стандартов на сигнал передатчика) и сопротивлений нагрузки  $R_H$  и входного сопротивления каскада УНЧ  $R_{\text{вх}}$  это можно записать

$$U_H (1 - m) \geq U_H R_H / (R_{\text{вх}} + R_H),$$

где  $U_H(1 - m) = U_{\text{вх min}}$  или

$$(1 - m) \geq R_H / (R_H + R_{\text{вх}}).$$

Отсюда следует, что для борьбы с такими искажениями можно варьировать сопротивлением нагрузки или входным сопротивлением каскада УНЧ. Для заданной величины  $R_H$  выбор входного сопротивления каскада УНЧ определяется условием  $R_{\text{вх}} \geq m R_H (1 - m)$ .

Уменьшения величины  $E_{\text{см}}$  можно добиться применением разделенной нагрузки, когда общее сопротивление нагрузки, выбранное из условий минимума искажений, сохраняется, а напряжение смещения создается лишь на небольшой его части (рис. 14.54).

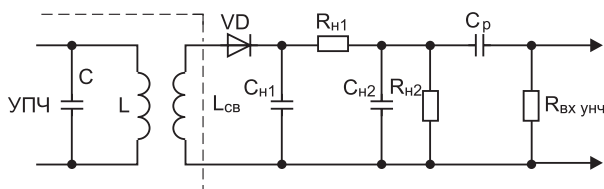


Рис. 14.54

Сопротивление нагрузки по постоянному току  $R_H = R_{H1} + R_{H2}$ . Напряжение смещения создается лишь на резисторе  $R_{H2}$  за счет тока разряда конденсатора  $C_p$ , что значительно меньше чем при полном сопротивлении  $R_H$  (14.42). Однако такое деление сопротивления нагрузки снижает коэффициент передачи АД, т. к. напряжение на входе УНЧ является лишь частью полного напряжения на нагрузке. Применение П-образного фильтра из  $R_{H1}$  и конденсаторов  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$  улучшает подавление промежуточной частоты (несущего колебания).