

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБНОГО ДЕТЕКТОРА

1 Цель работы

Изучение физических принципов построения частотных детекторов, особенностей реализации и технических характеристик дробного детектора; машинное моделирование дробного детектора на основе принципиальной схемы, изучение технических особенностей настройки и эксплуатации и определение его основных технических характеристик с использованием системы схемотехнического проектирования Micro Cap 8 (МС).

2 Задание

2.1 Расчетная часть

Используя сведения о величине элементов принципиальной схемы (рис. 5.1), параметров применяемого транзистора и диодов (приведенных в приложении), рассчитать:

- параметры колебательной системы частотного детектора (ЧД);
- величину индуктивности катушки связи.

2.2 Экспериментальная часть

Для компьютерной модели дробного детектора, содержащего также окончный каскад усилителя промежуточной частоты получить:

2.2.1. Амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) окончного каскада усилителя, настроенного на промежуточную частоту, при отсутствии влияния последующей схемы.

2.2.2. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) на выходных зажимах фазосдвигающего трансформатора (ФСТ) при точной настройке контуров.

2.2.3. Амплитудно-частотные характеристики нагруженного каскада усилителя промежуточной частоты (УПЧ) для случаев расстроенного и настроенного контура ЧД, оценить полосу пропускания каскада для обоих случаев.

2.2.4. Форму напряжения на коллекторе транзистора каскада УПЧ и на нагрузке детектора при воздействии на входе частотно-модулированного (ЧМ) сигнала. Оценить величину нелинейных искажений.

2.2.5. Зависимость амплитуды выходного напряжения и коэффициента гармоник от величины коэффициента связи согласующей индуктивности и катушки контура каскада УПЧ.

2.2.6. Характеристику подавления амплитудной модуляции.

2.2.7. Зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала.

3 Описание принципиальной схемы частотного детектора

Дробный детектор, часто называемый детектором отношений, реализует принцип преобразования изменения частоты входного сигнала в изменение фазовых сдвигов напряжений на выходе ФСТ, создающих различные по амплитуде напряжения, приложенные к диодам. Различие значений приложенных напряжений создает на нагрузке каждого из диодных амплитудных детекторов различные по величине напряжения низкой частоты, определяющие результирующее напряжение.

Принципиальная схема ЧД (рис. 5.1) содержит усилительный каскад, нагрузкой которого является линейная цепь, состоящая из двух индуктивно связанных контуров первичного $L1C1$ и вторичного $(L2 + L3)C10$, настроенных на среднюю частоту сигнала 10,7 МГц, и катушка связи $L4$. В качестве актив-

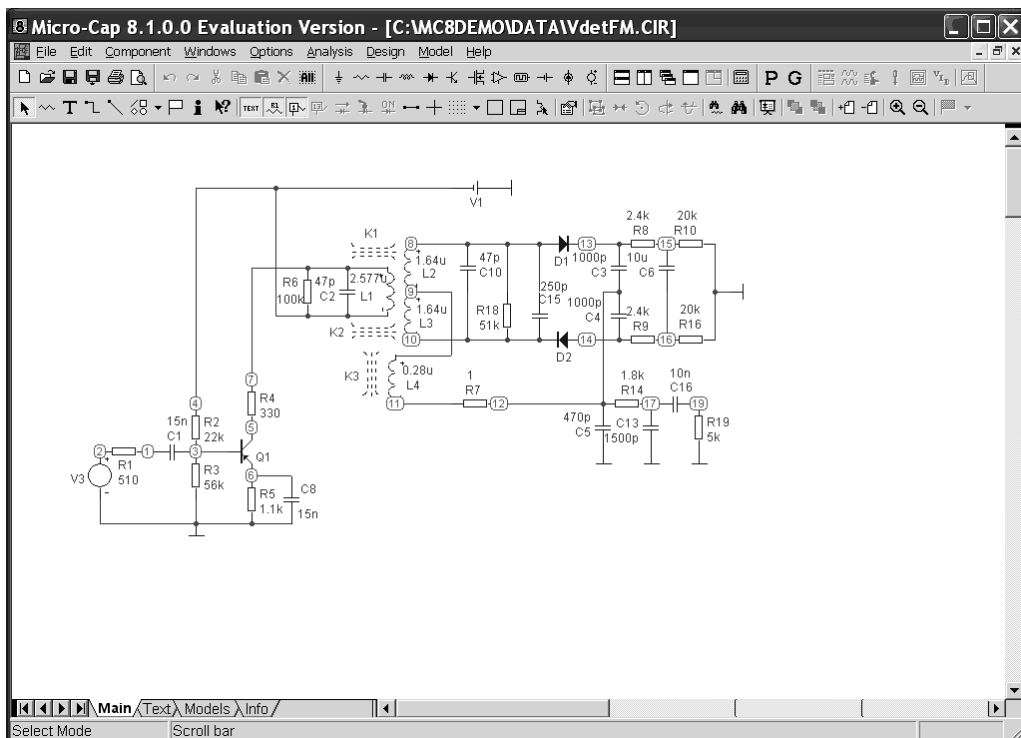


Рис. 5.1

ного элемента усилителя используется транзистор 2Т 363В с проводимостью р-п-р типа, включенный по схеме с общим эмиттером.

Резистор R1 выполняет роль внутреннего сопротивления источника сигнала и в реальных схемах отражает свойства предыдущего каскада. Конденсатор C1 является разделительным и исключает взаимное влияние режимов по постоянному току предыдущего каскада, представленного в виде источника ЭДС, и, реализованного на транзисторе Q1.

Делитель R2, R3 напряжения источника питания V1 задает режим работы транзистора и обеспечивает параметрическую стабилизацию положения рабочей точки транзистора на семействе входных динамических характеристик. Повышение стабильности режима работы транзистора и параметров усилителя достигается введением отрицательной обратной связи по постоянному току, создаваемой за счет включения в эмиттерную цепь резистора R5. Шунтирование его конденсатором C8 исключает возникновение отрицательной обратной связи по переменному току и, при высокой стабильности режима работы транзистора и параметров усилителя, обеспечивает на рабочей частоте коэффициент усиления равный коэффициенту усиления каскада без обратной связи.

Резистор R4 в коллекторной, а R5 в эмиттерной цепи обеспечивают выбранный режим работы транзистора по постоянному току: R4 — в основном напряжение коллектор—эмиттер $U_{кэ0}$, а R5 — постоянный ток коллектора $I_{к0}$. Источником питания служит батарея V1 с напряжением 6 В.

Колебательный контур L1C1, включенный в коллекторную цепь, шунтирован резистором R6, вторичный (L2 + L3)C10 резистором R18, отражающим потери в реактивных элементах контура. Катушка связи L4, подключенная к средней точке катушки индуктивности вторичного контура, индуктивно связана с катушкой L1 первичного контура.

Диоды D1 и D2 включены последовательно и вместе с элементами вторичного колебательного контура и катушкой связи образуют два диодных амплитудных детектора. Низкочастотные фильтры включают C3 и R8, R10 для детектора на диоде D1 и C4 вместе с резисторами R9, R16 для второго диодного детектора. Емкость C6 служит для устранения влияния паразитной амплитудной модуляции входного сигнала на процесс детектирования ЧМ сигнала. Нагрузкой детектора ЧМ сигнала является резистор R19, моделирующий входное сопротивление каскада усилителя низкой частоты (УНЧ). На входе УНЧ включен П-образный фильтр C5, R14, C13 и разделительный конденсатор C16.

На вход исследуемой схемы подключается источник гармонического сигнала V2 или частотно-модулированного колебания V3.

4 Методические указания по выполнению работы

4.1 Расчетная часть

Расчет параметров колебательной системы проводится с использованием исходных данных, приведенных в приложении для частоты несущего сигнала $f = 10,7$ МГц и частоты модуляции 15 кГц.

4.2 Машинное моделирование

Исследование свойств дробного частотного детектора проводится на основе его принципиальной схемы широко используемой в реальных приемных устройствах с применением системы схемотехнического моделирования Micro Cap 8 (MC 8). Элементы электрической принципиальной схемы описываются с помощью встроенных математических моделей компонентов, которые не могут быть изменены пользователями и можно изменять лишь значения их параметров.

Предполагается, что:

- студенты знакомы с основами операционной системы WINDOW'S 98 или более поздними версиями;
- имеют доступ к сети INTERNET и в состоянии по указанному в п. 8 описания адресу получить инсталляционные файлы демонстрационной (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. 5.2).

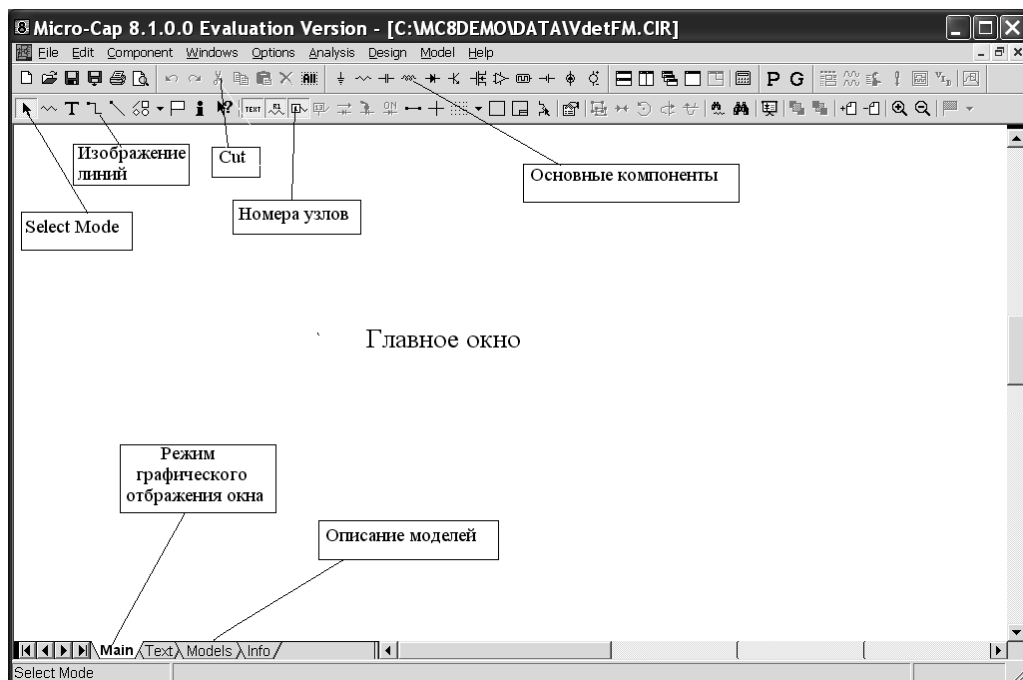


Рис. 5.2

Меню главного окна представлено второй строчкой сверху. Оно состоит из команд:

File, Edit, Components, Windows, Options, Analysis, Help. Верхняя строчка главного окна укажет присвоенное ЭВМ или, выбранное Вами, имя вводимой схемы в подкаталоге \DATA 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) выбираются курсором (рис. 5.2), активируются левой кнопкой (например, резистор) мыши и затем помещаются в выбранном месте главного окна при повторном нажатии на левую кнопку. Удерживая нажатой левую 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. 5.3). При вводе значения параметров допускается использование масштабных коэффициентов:

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

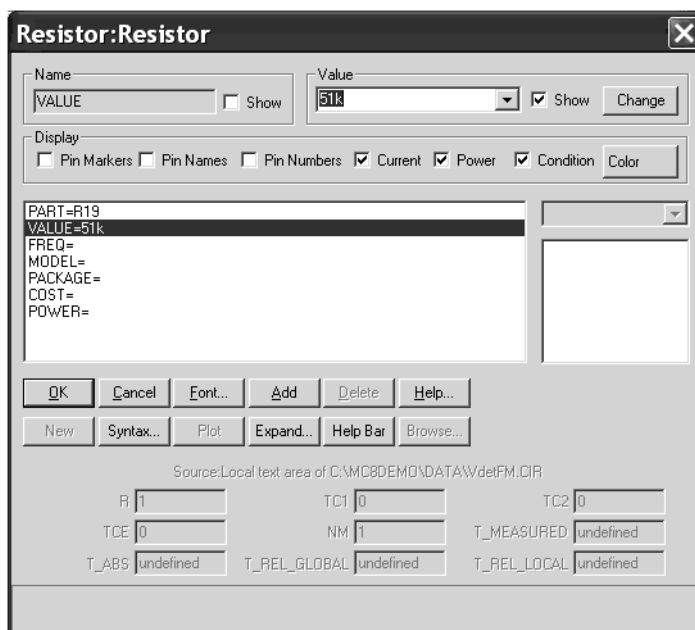


Рис. 5.3

Масштабный коэффициент может содержать и другие дополнительные символы, которые программа игнорирует. То есть величина емкости в 5пФ 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.

Альтернативным вариантом ввода параметров компонентов является использование меток (labels), когда на принципиальной схеме какому-либо резистору задается в качестве параметра не значение его сопротивления, (например 50 Ом), а вводится метка (например, R2) и затем с помощью текстовой директивы DEFINE задается значение этого сопротивления в виде

.DEFINE R2 50

Эта директива вводится в текстовом режиме меню инструментов.

В рамке Display (рис. 5.3) 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 в левом высвеченном окне строку Part, позиционное обозначение компонента, Value — величина вводимого резистора подтверждаете предложенный вариант, переходя на следующую строку, или вводите новое значение соответствующего параметра. Строки FREQ — определяющую частотную зависимость сопротивления резистора, MODEL — тип применяемого резистора, его стоимость — COST, и рассеиваемую на нем мощность — POWER можно не заполнять, поскольку в лабораторной работе не исследуется влияние частотной или температурной зависимости параметров резистора не свойства каскада. Не проводится также и конструктивная разработка макета частотного детектора, когда является важным параметром тепловые характеристики компонентов и их стоимость.

Активные кнопки внизу ниспадающего меню Resistor позволяют при их нажатии:

ОК — подтвердить правильность введенной информации и продолжить выполнение задачи;

Cancel — отказаться от введенной на этом подменю информации;

Font — изменить шрифт и стиль выбранного атрибута;

Add — добавить атрибуты к описанию компонента;

Help — файл помощи;

Syntax — показывает описания простейших компонентов в формате Spice;

Expand — вызывать файл данных и в выбранном курсором текстовом поле проводить редактирование или вводить большой объем текстовой информации;

Help Bar — переключает дисплей в режим Help. Дает краткое описание ключам окна схем и описывает возможности управления курсором.

При необходимости коррекции отдельных элементов принципиальной схемы необходимо сначала его удалить. Для этого вначале активизируют режим редактирования элементов и компонентов схемы (Select Mode, рис. 5.2).

Затем, подведя курсор к компоненту, нажать левую кнопку мыши. При этом подсвечивается, обычно зеленым светом, компонент или соответствующий текст в окне схем и затем, войдя в меню EDIT, на выпадающем подменю выбирают CUT (рис. 5.4) и удаляют необходимый атрибут схемы. Альтернативным вариантом при удалении компонентов является применение пиктограммы CUT (или Ctrl-X) на панели инструментов (ножницы) в окне схем, которая активизируется только при нажатии кнопки Select Mode (рис. 5.2).

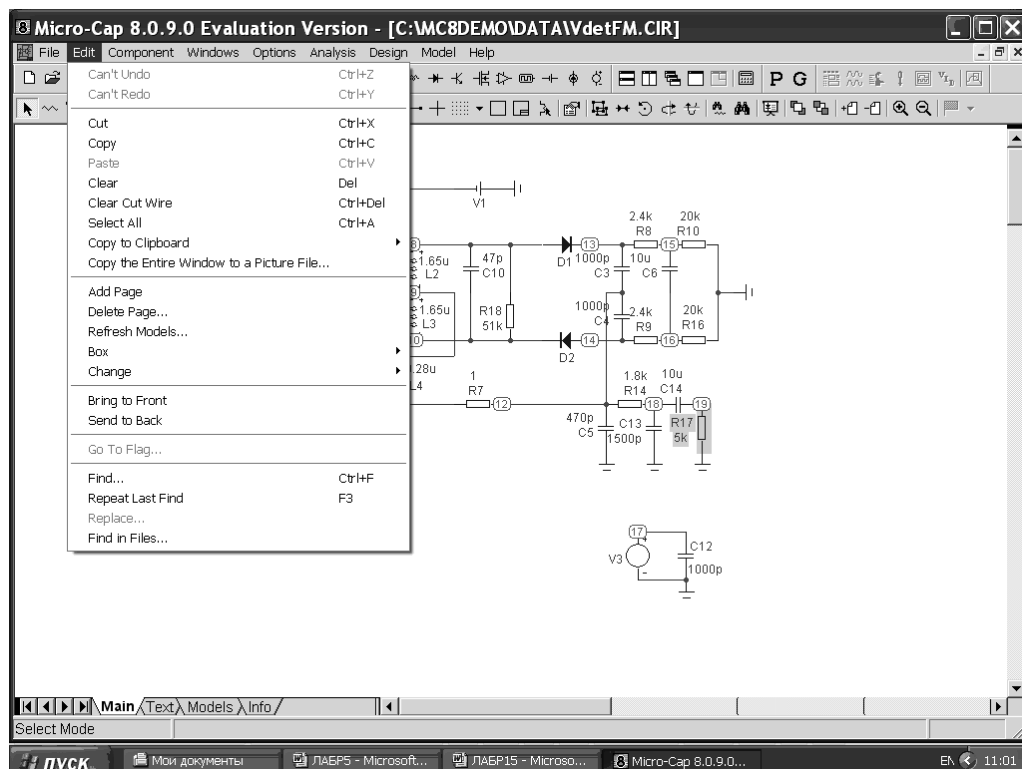


Рис. 5.4

Аналогично вводятся конденсаторы. На панели инструментов главного окна активизируется пиктограмма конденсатора и на выпадающем меню Capacitor: Capacitor задаются параметры конденсатора.

Соединительные линии между компонентами «прочерчивают» выбрав на панели инструментов главного окна пиктограмму линии (рис. 5.2). Установить курсор в начале будущей линии и нажать левую кнопку мыши. Удерживая кнопку в нажатом положении, проводят линию до вывода очередного компонента или местом соединения с другой линией.

Катушки индуктивности первичного (L1), вторичного (L2, L3) контуров и катушки связи (L4) ФСТ вводятся нажатием на левую кнопку мыши при помещении курсора на пиктограмму индуктивности панели инструментов меню главного окна (рис. 5.2). На выпадающем подменю (рис. 5.5) Inductor:Inductor указывают параметры катушек индуктивности. Перечень параметров и их

описание аналогичны использовавшимся ранее в подменю Resistor:Resistor при вводе резисторов. По окончании ввода параметров (нажатие на кнопку ОК) в главном окне схем появляется графический символ катушки индуктивности с указанием начала (+) и конца (–) намотки. Вращением с помощью правой кнопки мыши устанавливают катушку индуктивности в нужном положении.

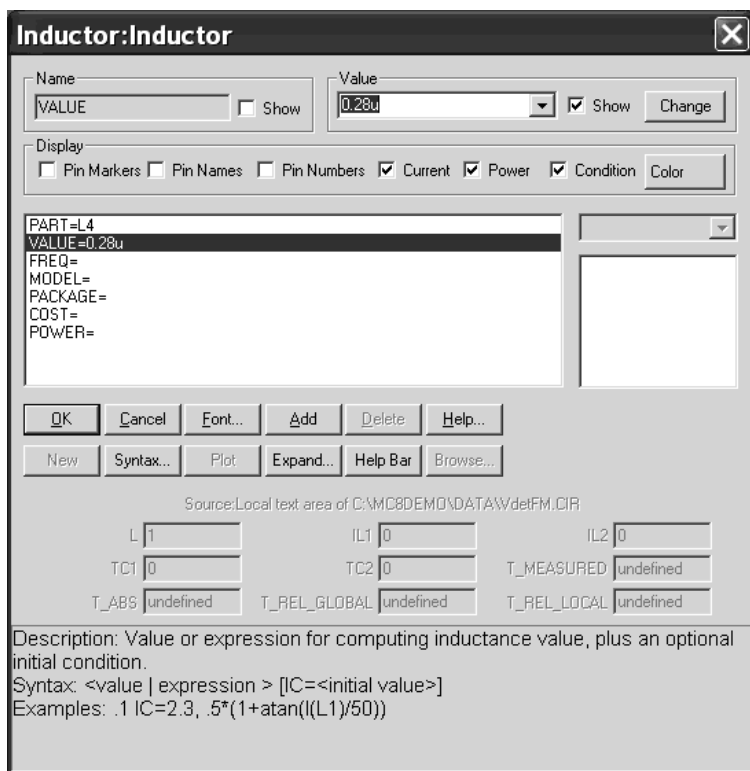


Рис. 5.5

Существование магнитной связи между катушками ФСТ отображается применением модели трансформатора. Исследование свойств ЧД проводится с использованием модели трансформатора без сердечника. Для установки трансформатора в принципиальную схему используют команду Component главного меню программы с последующим выбором на выдвигающихся вправо подменю последовательно: Analog Primitives → Passive Components → K (рис. 5.6).

Нажатием на левую кнопку мыши подтверждается выбор трансформатора K: Mutual inductance/Nonlinear magnetic core model (взаимоиндукция/модель нелинейного магнитного сердечника). Появляющееся обозначение трансформатора, выполняющее роль курсора, может быть установлено в любом месте окна схем повторным нажатием левой кнопки мыши с сохранением функций трансформатора (целесообразно размещать символ трансформатора вблизи реально организованной связи). На выпадающем меню (рис. 5.7), обладаю-

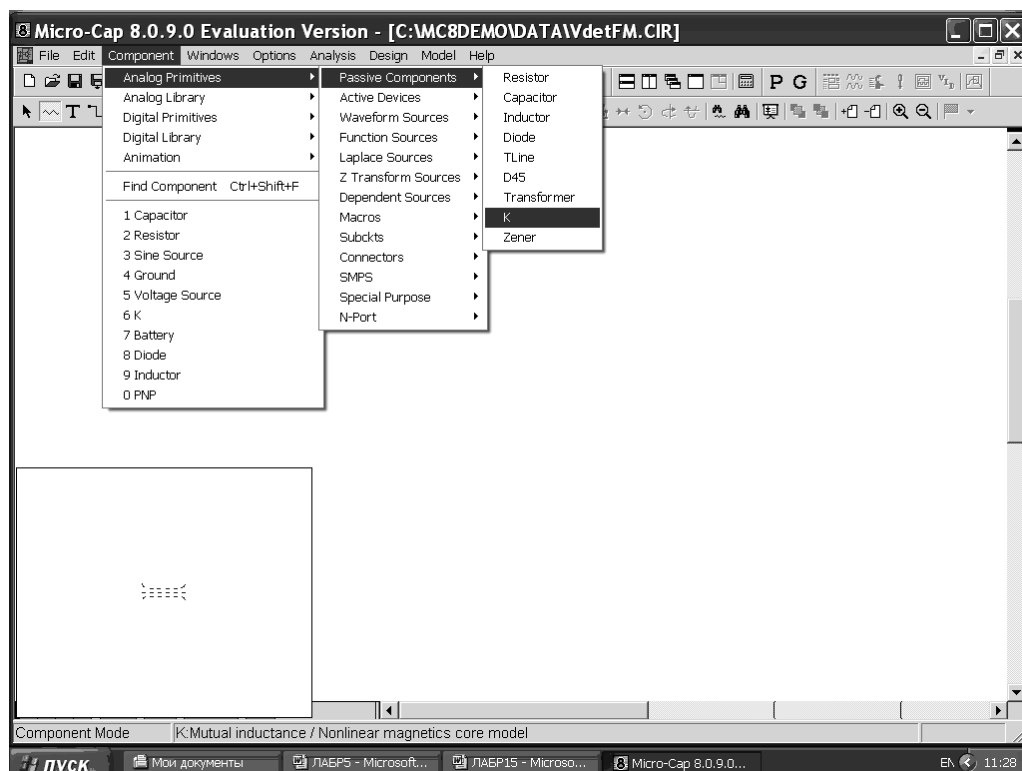


Рис. 5.6

шем описанием аналогичным описанию вводимых резисторов, конденсаторов в левой колонке содержатся: перечень индуктивностей (L1,L4), обладающих индуктивной связью (INDUCTORS) и величина связи (COUPLING). Значение коэффициента связи (COUPLING) для катушек L1 и L2, а так же L1 и L3 задается равной 0,05, а для L1 и L4 — 0,99. Строка MODEL не заполняется (модель ЧД предполагает использование воздушного трансформатора). Применение сердечника требует ввода его параметров (геометрических размеров, материала и др.) или выбора из, предлагаемого в правой колонке, списка типовых конструкций трансформаторов.

При вводе транзистора типа PNP, которого нет в списке основных компонентов окна схем, необходимо сначала выполнить команду Components в меню главного окна и на дополнительном меню, разворачивающемся вправо, выбрать Analog Primitives, а из предлагаемого перечня устройств выбрать Active Devices, а затем, на закладке активных компонентов, PNP (рис. 5.8).

В дальнейшем, при повторном вводе транзистора такого типа, выполняемая команда Components уже содержит данный тип транзистора на выпадающем меню и достаточно лишь активизировать в нем соответствующую строку.

При нажатии на левую кнопку мыши на ниспадающем меню (рис. 5.9) PNP Transistor выбирается позиционное обозначение (PART), начинающееся по умолчанию с буквы Q, затем его характеристика VALUE, определяющая активный режим, и официальное название транзистора MODEL. Активизаци-



ей строки в правой колонке меню можно выбрать тип транзистора из предложенного перечня.

Поскольку в библиотеке MC8, представленных в колонке справа, нет отечественных транзисторов, то необходимо ввести параметры модели транзистора 2Т363В. Для этого, после ввода позиционного обозначения транзистора (PART), характеристики, определяющей активный режим (VALUE, можно не вводить), выбирается строка MODEL (рис. 5.9) и нажатием на кнопку NEW задаете переход в режим ввода параметров новой модели транзистора.

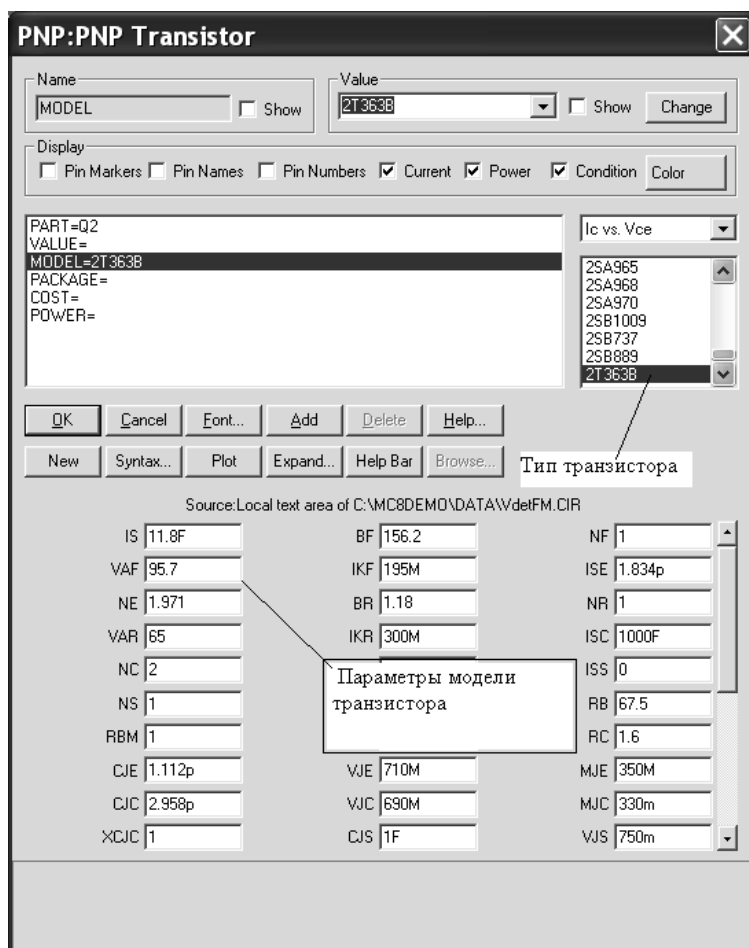


Рис. 5.9

В строке MODEL появляется надпись New Model1, что дублируется подсвеченной строкой в верхнем окне Value. Находящийся там курсор позволяет ввести название нового типа транзистора. Введя тип транзистора (2Т363В) затем приступаете к редакции параметров модели транзистора Гумеля — Пуна, представленных таблице параметров IS, BF, NF и т. д. Для этого курсор левой кнопкой мыши помещаете в одном из окон массива:

Source: Local text area of C:\DATA\VdetFM.CIR, где VdetFM — имя файла, использующегося для ввода принципиальной схемы смесителя и последующего анализа (имя задается пользователем). Содержащиеся в каждом окне числового массива значения удаляются «стрелкой» вверх клавиатуры и затем вводятся из описания модели транзистора 2Т 363В: IS = 11.8F, BF = 156.2, VAF = 95.7, IKF = 0.195, ISE = 1.834P, NE = 1.971, BR = 1.18, VAR = 65, IKR = 0.3, ISC = 1P, NC = 2, RB = 67.5, RC = 1.6, CJE = 1.112P, VJE = 0.71, MJE = 0.35, CJC = 2.958P, VJC = 0.69, MJC = 0.33, FC = 0.5, TF = 41.32P, XTF = 2, VTF = 10, ITF = 0.12, TR = 6.149n, EG = 1.11, XTB = 1.5, XTI = 3 (рис. 5.10). Смысл обозначений и способы определения указанных параметров можно выяснить в [2].

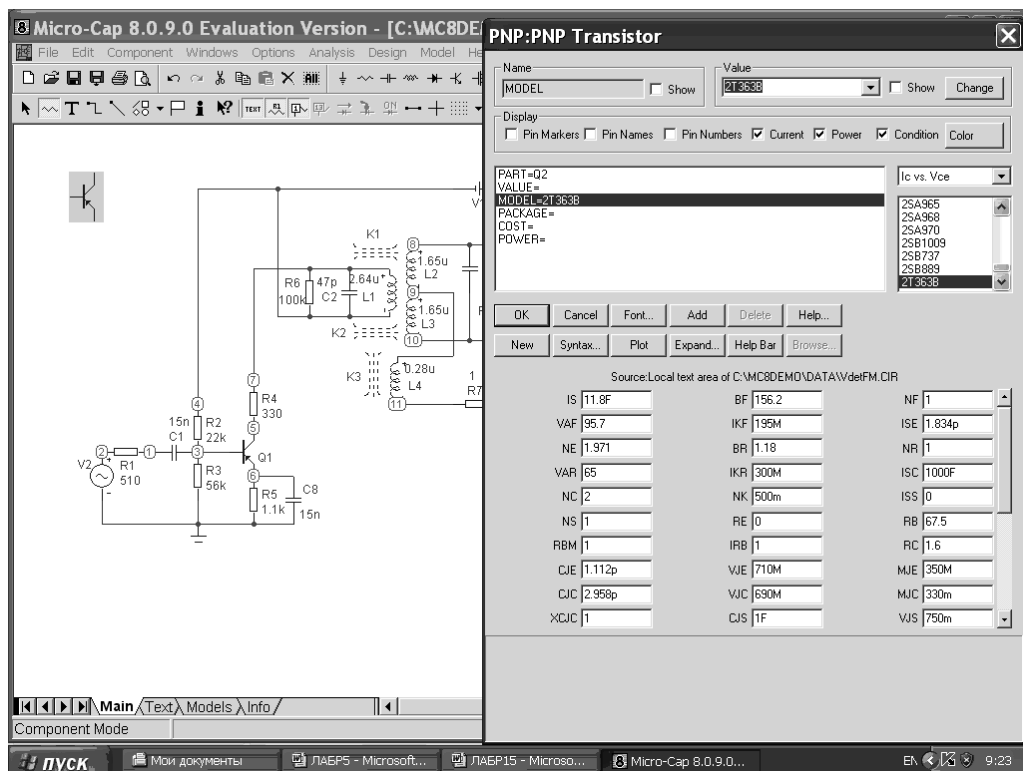


Рис. 5.10

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 Models внизу главного окна (рис. 5.2), активизируя режим описания моделей используемых активных устройств (Active Devices). Содержание текстового файла (рис. 5.9) с параметрами транзистора 2Т 363В совпадает со сведениями представленными в таблице (рис. 5.11).

Отсутствующие некоторые параметры в текстовом файле по сравнению с рис. 5.9 принимаются по умолчанию и могут не вводиться.

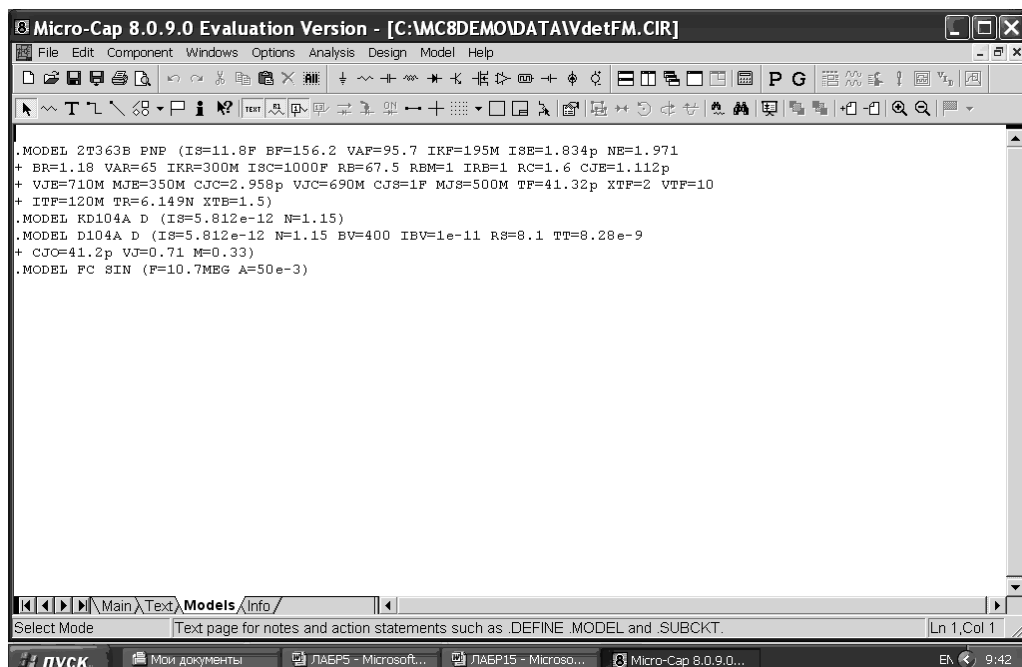


Рис. 5.11

Включение диода в принципиальную схему ЧД начинается с выбора на строке основных компонентов окна схем условного обозначения диода и нажатием на левую кнопку мыши. Появившийся символ диода устанавливаем в нужном месте принципиальной схемы и, нажав на левую кнопку мыши, на выпадающем меню Diode:Diode вводим параметры модели диода (рис. 5.12). Поскольку в библиотеке MC8, представленных в колонке справа, нет отечественных элементов, нажатием на кнопку New, при подсвеченной строке Model, активизируем режим редактирования параметров. Появление в окне Value надписи New Model1 (как и в строке MODEL) позволяет ввести тип диода Д104А, а помещение курсора в окна параметров диода — заменить, приведенные в окне, на требуемые (используя упрощенную модель диода LEVEL 1): $IS = 5.812E-12$, $N = 1.15$, $RS = 9.1$, $CJO = 41.2P$, $TT = 8.28E-9$, $M = 0.33$, $VJ = 0.71$, $FC = 0.5$, $BV = 300$, $IBV = 1E-11$, $EG = 1.11$, $XTI = 3$. Остальные параметры диода принимаются по умолчанию. Описание диода совокупностью параметров позволяет, используя возможности MC8, получить вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода (прямую и обратную ветвь). Для получения, например, прямой ветви необходимо нажать кнопку расширения окна на строке над библиотекой диодов и выбрать If vs. Vf (ток прямой ветви в зависимости от прямого напряжения). Аналогично можно получить обратную ветвь диода, выбрав Ir vs. Vr, и затем, нажав кнопку Plot под левым окном подменю Diode:Diode.

Завершив ввод активных и пассивных компонентов принципиальной схемы, проверьте их на соответствие со схемой на рис. 5.1. При необходимости проведите коррекцию элементов схемы.

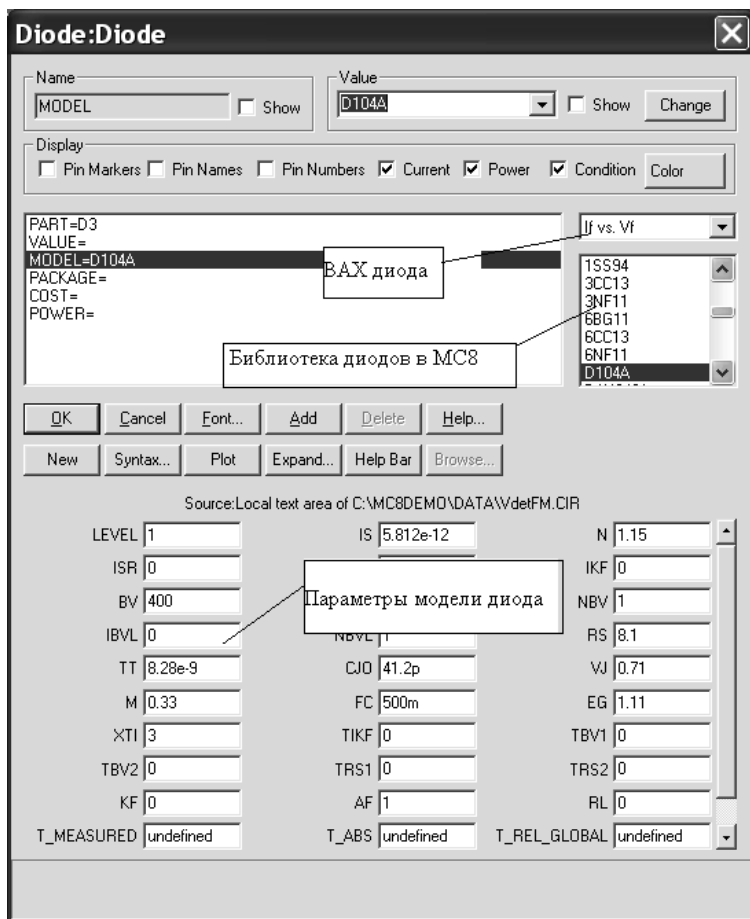


Рис. 5.12

Для получения частотных характеристик настроенного или расстроенного каскада УПЧ необходимо включить на его вход генератор гармонических колебаний.

Тип генератора можно выбрать, используя строку основных компонентов в главном окне, и затем выбрать из большого числа моделей генераторов с различной формой сигнала, с модуляцией или без модуляции и т. д. Поскольку можно ограничиться моделью генератора гармонических колебаний без какой-либо модуляции то, выбрав команду Component меню главного окна последовательно выбрать на выдвигающихся вправо подменю: Analog Primitives → Waveform Sources → Sine Source (рис. 5.13). Появляющееся изображение модели генератора и подменю параметров Sine Source: Sine Source позволяет задать его параметры (рис. 5.14).

Подменю Sine Source построено по традиционной форме, использовавшейся ранее при вводе резисторов, конденсаторов и др., поэтому назначение кнопок, пиктограмм и вводимых параметров известно.

Параметры генератора (частота, амплитуда и др.) отличны от предлагаемых в библиотеке MC8 поэтому ввод начинают с выбора названия компонен-

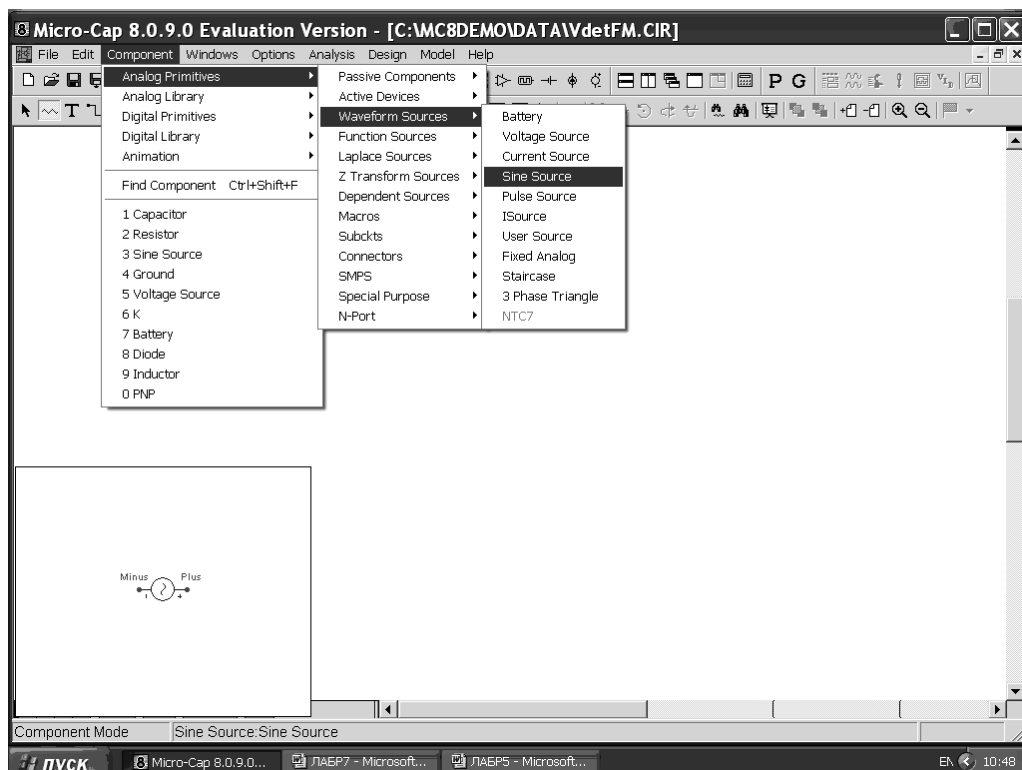


Рис. 5.13

та (PART предлагается V4), а в строке MODEL указать на ввод новой модели генератора, нажав кнопку New под левым окном. Ведя затем название генератора (например, FC) в окне Value установить последовательно курсор в окнах параметров генератора ввести требуемые параметры, организовав файл данных источника сигнала: Source Local text area of C:\MC8\DATA\VdetFM.CIR (рис. 5.14). В качестве параметров генератора задаются (рис. 5.15):

F — частота несущего колебания — 10,7 МГц;

A — амплитуда несущего колебания — 50 мВ;

DC — значение постоянной составляющей сигнала — 0 В;

PH — начальная фаза несущего колебания — 0 рад;

RS — внутреннее сопротивление генератора — $10 \cdot 10^{-3}$ Ом;

RP — период повторения (для сигнала, имеющего форму отрезка синусоиды) — 0 с;

TAU — постоянная времени затухания огибающей сигнала (при экспоненциальной форме затухания амплитуды сигнала) — 0 с.

После ввода параметров генератора FC можно наблюдать на экране монитора форму сигнала, действующего на входе усилителя (рис. 5.16), нажав на кнопку расширения окна над библиотекой моделей генераторов, и выбрав Voltage vs. Time и кнопку Plot.

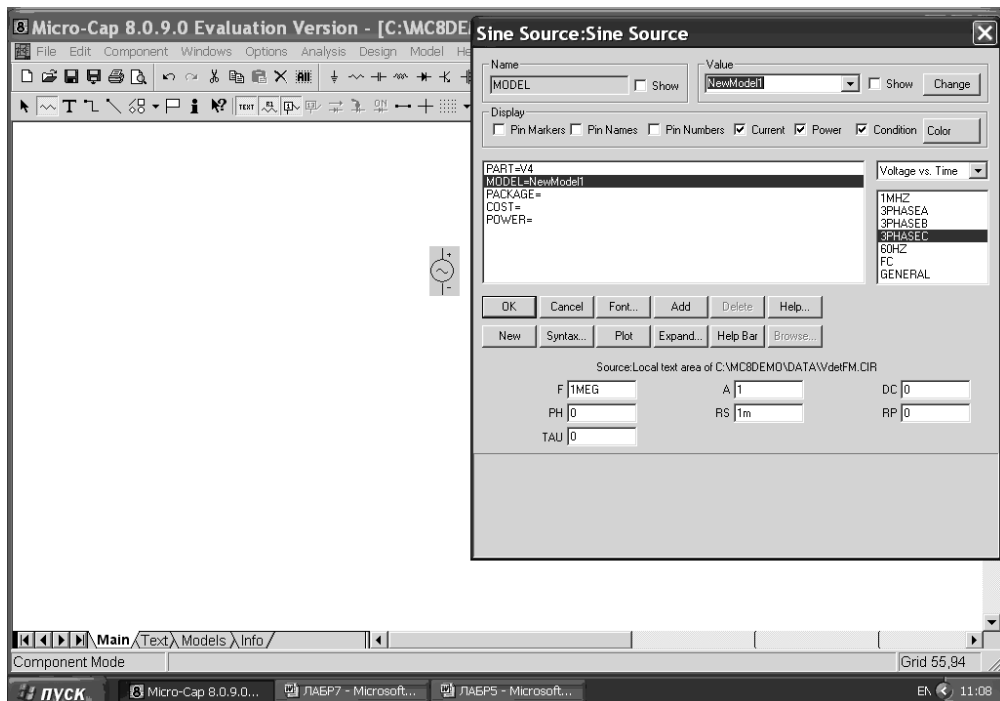


Рис. 5.14

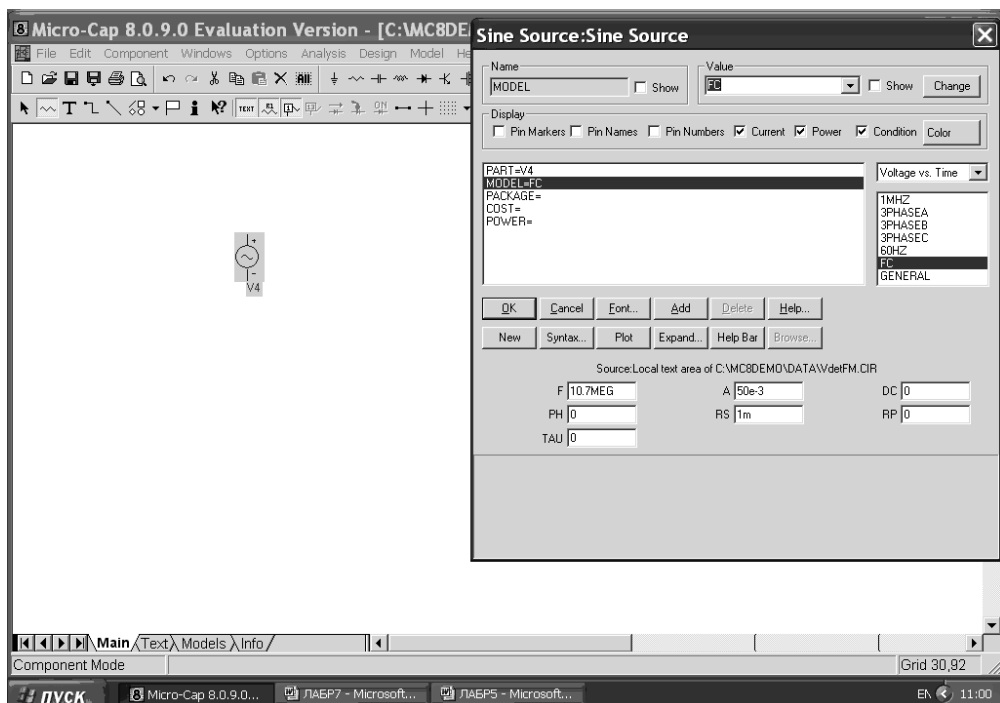


Рис. 5.15

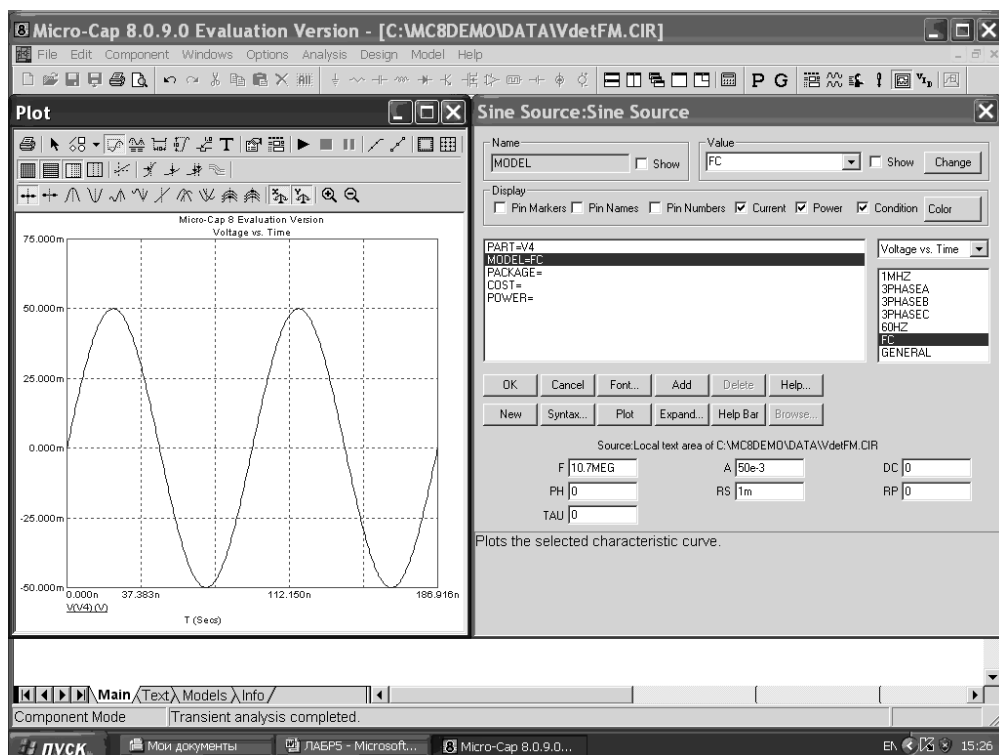


Рис. 5.16

Подключение батареи источника питания завершает ввод принципиальной схемы ЧД.

Выбрав нажатием на левую кнопку мыши пиктограмму батареи панели инструментов (рис. 5.2) переходят на выпадающем меню в режим задания параметров батареи (рис. 5.17).

Выбрав позиционное обозначение батареи на принципиальной схеме V1(PART) и величину создаваемого напряжения 6V (VALUE 6V), нажатием на кнопку ОК подтверждают правильность ввода параметров (PACKAGE, COST, POWER не вводятся). Появившееся изображение батареи устанавливают в принципиальную схему с учетом типа проводимости транзистора.

Общая электрическая шина («земля») обеспечивает протекание токов в цепях с разным количеством выводов (двухполюсники, трехполюсники, четырехполюсники) и различным функциональным назначением. «Земля» вводится установкой курсора на ее условное обозначение на панели инструментов главного окна и нажатием на левую кнопку мыши. Устанавливая курсор в виде символа «земля» в нужном месте схемы, повторным нажатием на левую кнопку мыши фиксируют его положение.

После завершения ввода элементов принципиальной схемы она должна иметь вид, изображенный на рис. 5.1 (размещение условно графического обозначения трансформаторов К может быть произвольным). Проверьте соответствие значения величин введенных вами элементов рис. 5.1 и при необходимости проведите коррекцию.

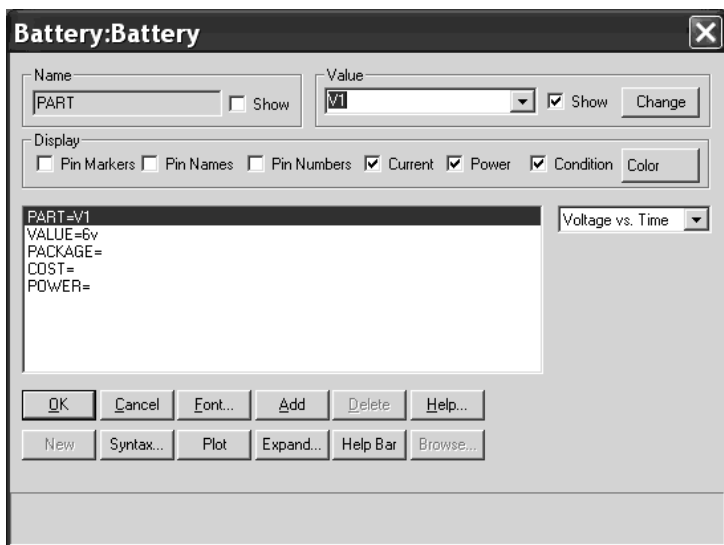


Рис. 5.17

Для выполнения п. 2.2.1 необходимо исключить влияние выходного контура детектора. Для этого его расстраивают шунтируя конденсатором большой емкости ($C_{15} = 250$ пФ). В этом случае принципиальная схема ЧД (рис. 5.1) приобретает вид (рис. 5.18).

Проведение анализа частотных свойств УПЧ предваряет нумерация узлов принципиальной схемы нажатием на пиктограмму Node Numbers (может отличаться от указанной на рис. 5.1). Вход в режим анализа происходит при активизации левой кнопкой мыши команды Analysis меню главного окна.

На выпадающей закладке выбирается режим анализа частотных характеристик АС. Нажатием левой кнопкой мыши при подсвеченной строке АС переходим к заданию условий анализа на выпадающем подменю AC Analysis Limits.

Нажатием левой кнопки мыши переходят к заданию пределов анализа, способа проведения анализа и представления на экране монитора результатов анализа.

В окне AC Analysis Limits (рис. 5.19) задается следующая информация:

Frequency Range — значения верхнего и нижнего пределов частот анализа;

Number of Points — количество точек разбиения интервала исследуемых частот на подинтервалы с равномерным разделением (Linear, в строке Frequency Range), логарифмическим (Log) или автоматическим (Auto), в которых производится расчет частотных характеристик и, полученные значения выводятся в форме таблицы (если это указывается). Выбор автоматического режима может приводить к существенным неточностям в расчете;

Temperature — диапазон изменения температур (может задаваться одно значение, 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);

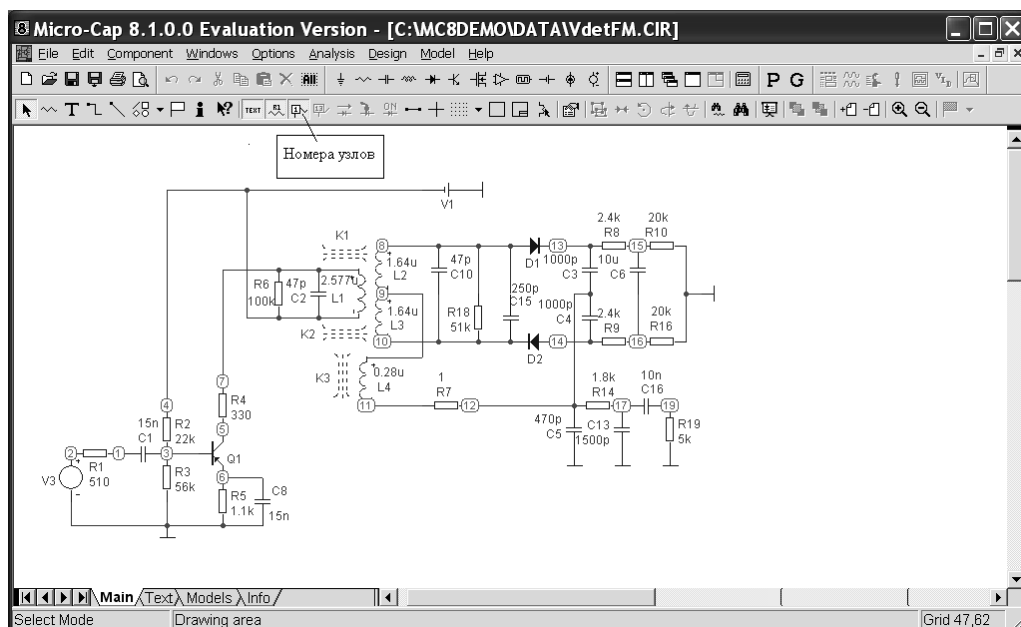


Рис. 5.18

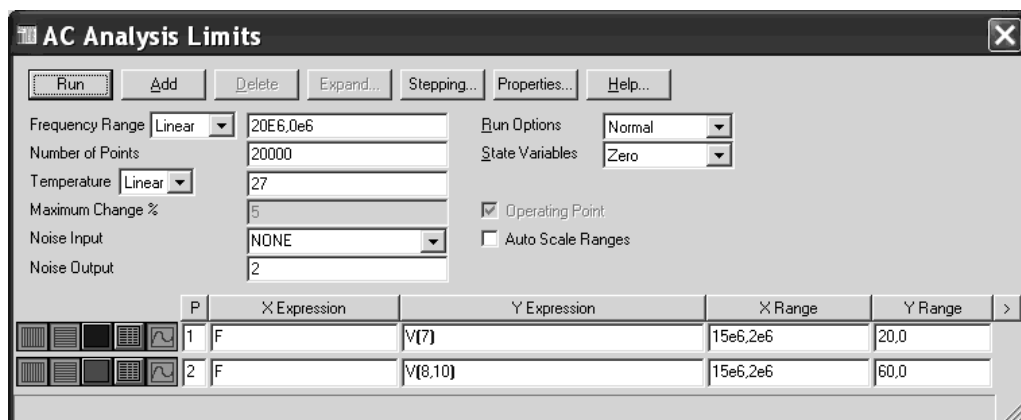


Рис. 5.19

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

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. 5.19, выводится график коэффициента усиления (YExpression) в зависимости от частоты (XExpression) в узле 7 и разность напряжений в узлах 8 и 10 с пределами значений для каждой из них, определяемой форматом: максимальное значение выводимой переменной, ее минимальное значение и шаг сетки значений соответствующей оси (частота, коэффициент передачи). Характер изменения значений по осям — линейный, что выбирается нажатием двух левых крайних кнопок в строке выводимых значений. Для значений компонентов, указанных на рис. 5.18, производится расчет АЧХ каскада УПЧ практически без влияния детектора (первичный и вторичный контур сильно расстроены), нажатием кнопки Run. Результаты вычислений представлены на рис. 5. 20. Как видно из рисунка, резонансная частота отлична от 10,7 МГц (точное значение максимума АЧХ находится следующим образом: нажимается кнопка Peak, курсор располагается вблизи вершины АЧХ и еще раз нажимается кнопка Peak). Влияние контура детектора сказывается появлением выброса на АЧХ первичного контура. Разностное напряжение в узлах 8 и 10 ($V(8,10)$) определяет резонансную характеристику вторичного контура.

***Примечание:** для увеличения числа графиков выводимых на экран монитора необходимо нажать на кнопку Add, а для уменьшения — размещаете курсор в одном из окон удаляемой строки и нажимаете кнопку Del. Графики выводятся в одной системе координат при вводе в колонке P (Plot) одинаковой цифры с максимальным масштабом по осям.*

Подстройка резонансной частоты осуществляется использованием подрежима Stepping в окне AC Analysis Limits. Активизацией кнопки Stepping переходят в режим многовариантного анализа, позволяющего в расширенной версии MC8 изменять, по выбранному закону, параметры компонентов (активных и пассивных), параметры зависимых и независимых источников сигналов. При этом могут одновременно изменяться до двадцати параметров. В версии MC8demo возможно одновременное изменение лишь одного параметра одного компонента или модели. В качестве варьируемого компонента выбираем индуктивность первичного контура L1 нажатием на кнопку разворачивающегося окна в строке Step What и с помощью линейки прокрутки представить на экране монитора список компонентов. Индуктивность L1 подсвечивается курсором, а нажатие левой кнопки мыши переводит ее в категорию варьируемых (рис. 5.21).

Затем указываем нижний (From) и верхний (To) пределы его изменения индуктивности L1 и величину шага (Step Value) (рис. 5.22).

Затем в рамке (Step It), нажимая на кнопку Yes, подтверждаем вариацию параметров выбранного компонента. В рамке Method отмечаем кнопкой закон изменения компонента Linear (Linear — линейный, Log — логарифмический или List — в соответствии со списком). В рамке Parameter Type кнопкой помечаем вид варьируемого элемента: Component — компонент (Model — модель, например, источника сигнала).

В рамке Change (изменение) выбирается (помечается точкой) способ изменения шага при вариации параметра элементов: только во вложенных циклах программы (Step variables in nested loops) или всех подлежащих изменению

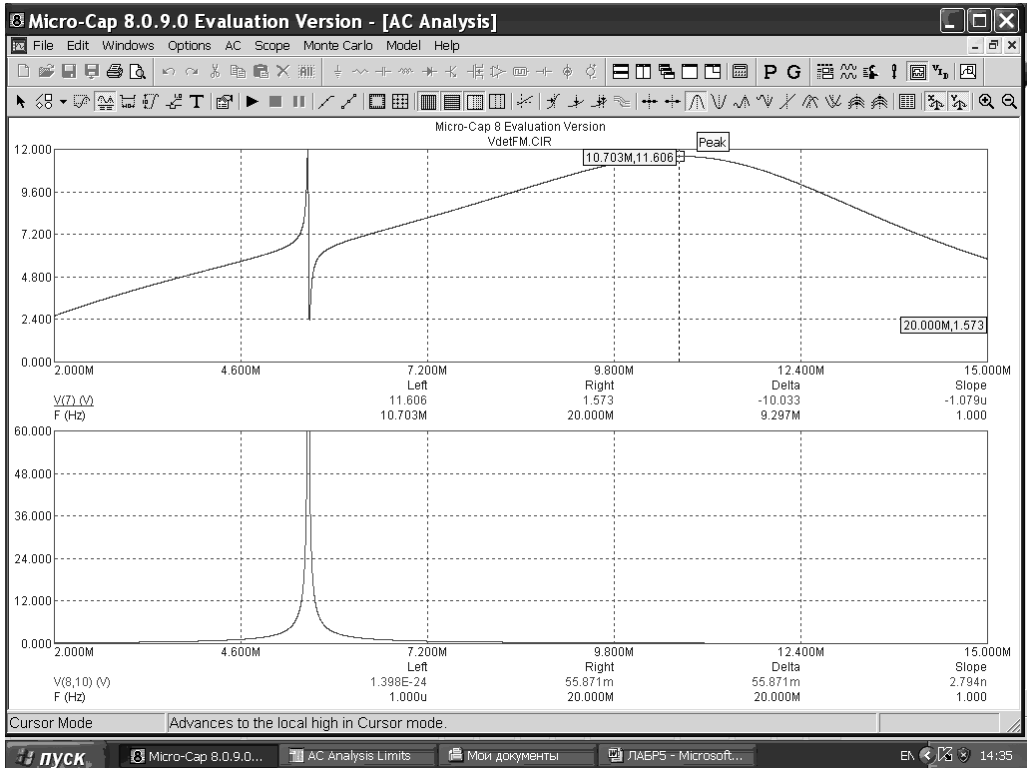


Рис. 5.20

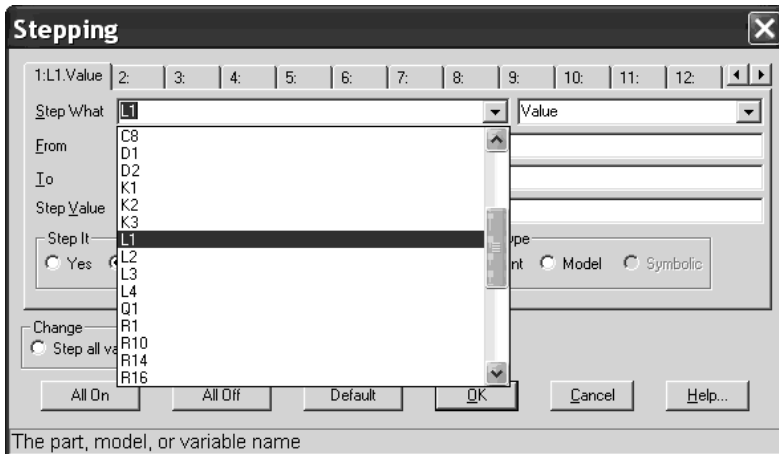


Рис. 5.21

параметров одновременно (Step all variables simultaneously). В первом случае существует возможность независимого выбора шага для каждого параметра. Во втором случае необходимо изменять варьируемые параметры с одинаковым шагом, что ограничивает анализ всего одним возможным вариантом. Кнопки в нижнем ряду All On, All Off включают режим варьирования (Step It)

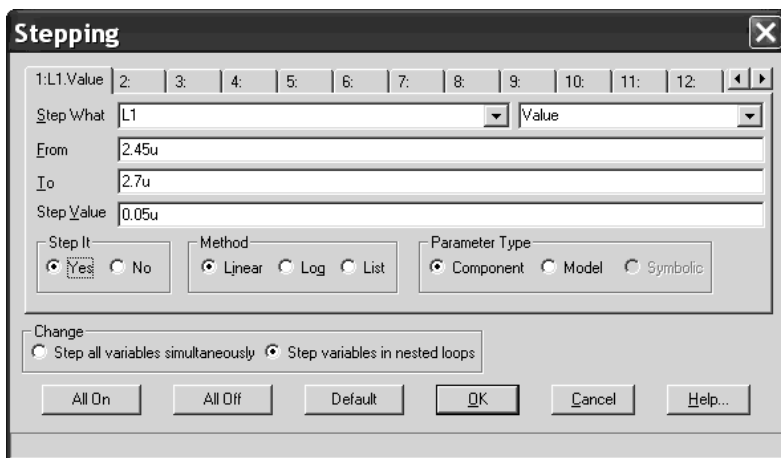


Рис. 5.22

перечисленных на всех закладках в режиме Stepping параметров. Кнопка Default по умолчанию задает изменение варьируемого параметра от половинного до двойного значения от его номинальной величины. Подтверждение выбранного режима анализа и вход в него осуществляется нажатием кнопки ОК. Для варианта значений индуктивности L1, указанного на рис. 5.22, получается семейство (рис. 5.23) кривых (последовательно войдя в режим AC и затем Run).

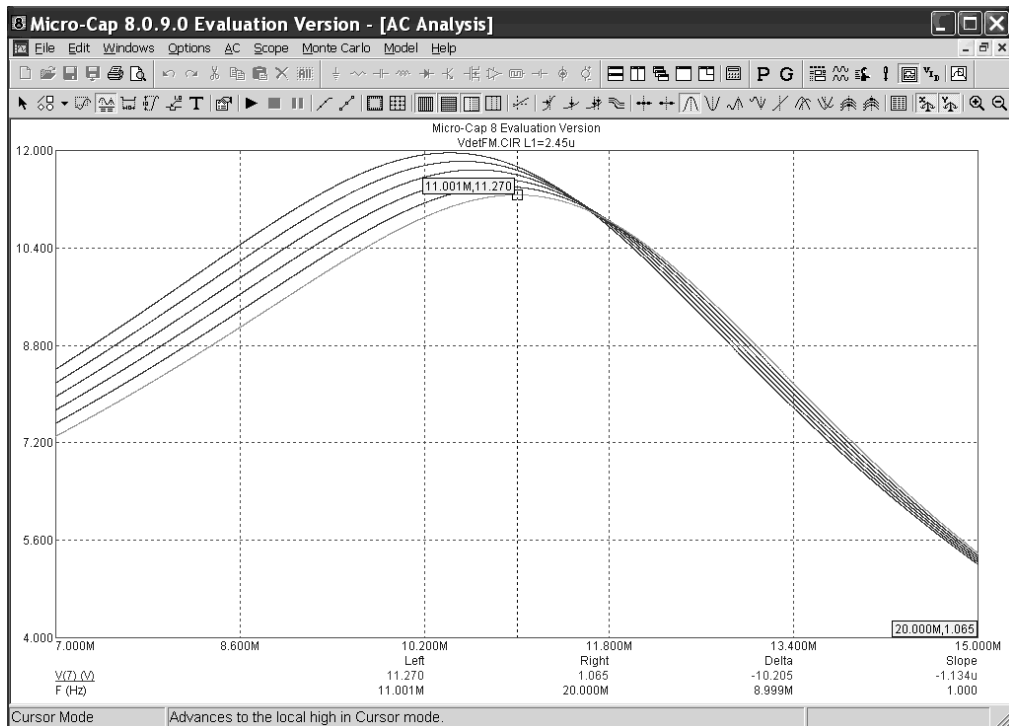


Рис. 5.23

Поскольку изменение резонансной частоты происходит в небольших пределах, то для достаточного заметного отличия АЧХ при различных значениях L_1 изменены пределы анализа по частоте (введите коррекцию в подменю AC Analysis Limits — рис. 5.19). Для определения точного значения резонансной частоты первичного контура при пошаговом изменении индуктивности L_1 необходимо последовательно выполнить (находясь в окне AC Analysis): нажать дважды на пиктограмму Peak (рис. 5.20), что поместит маркер с указанием максимального значения АЧХ и частоты, ей соответствующей, для одной из кривых. Значение параметра компонента указывается вверху семейства кривых, а соответствующая кривая выделяется цветом, нажать на пиктограмму Go To Branch (перейти на другой график) (рис. 5.23).

На выпадающем подменю (рис. 5.24) нажать кнопку разворачивающегося окна и курсором выбрать интересующее значение L_1 , нажать на кнопку Right (правый), затем закрыть подменю, нажав Close (при этом появляется второй, выделенный цветом график), двукратное нажатие на пиктограмму Peak помещает второй маркер на максимум второй выделенной цветом кривой.

Используя режим Stepping добиться отличия значения резонансной частоты контура каскада УПЧ от номинального 10,7 МГц не более чем на 10 кГц. Привести распечатку амплитудно-частотной характеристики для вычисленного значения L_1 , аналогичную рис. 5.20.

При выполнении п. 2.2.2 в первичном контуре устанавливается уточненное значение индуктивности L_1 , оставляя значения остальных компонентов

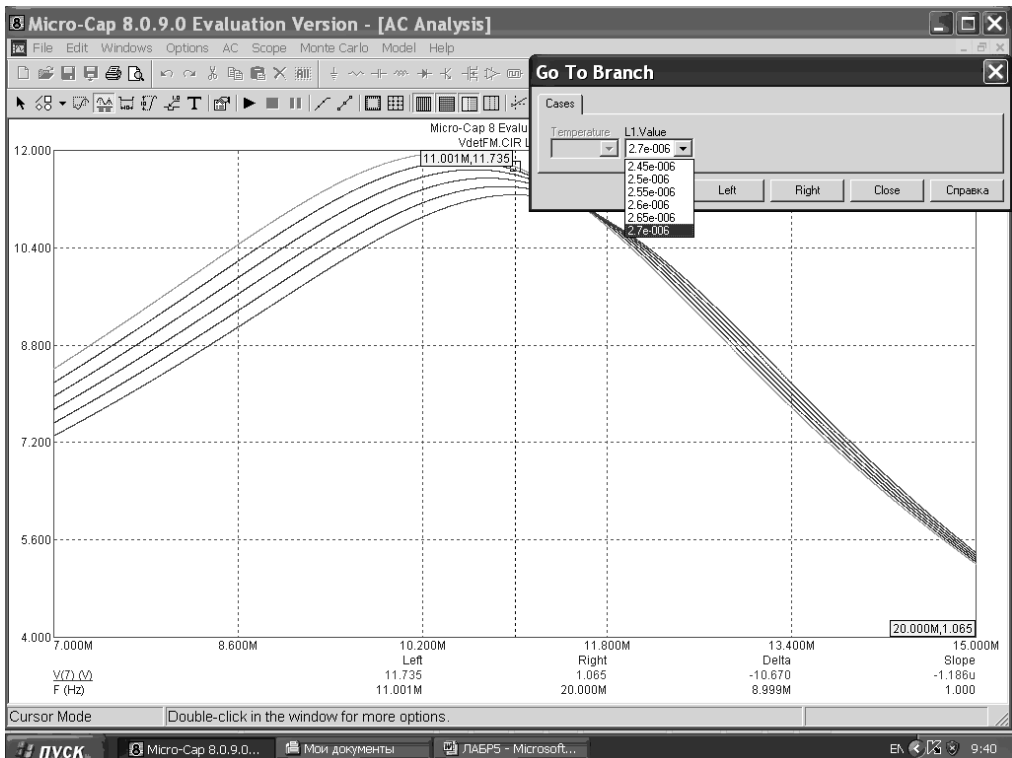


Рис. 5.24

принципиальной схемы ЧД как на рис. 5.1. Проводите расчет амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, используя в качестве выходного, разностное напряжение на выходе ФСТ $V(8) - V(10)$. Характер выводимых на экран монитора зависимостей определяется подменю AC Analysis Limits (рис. 5.25).

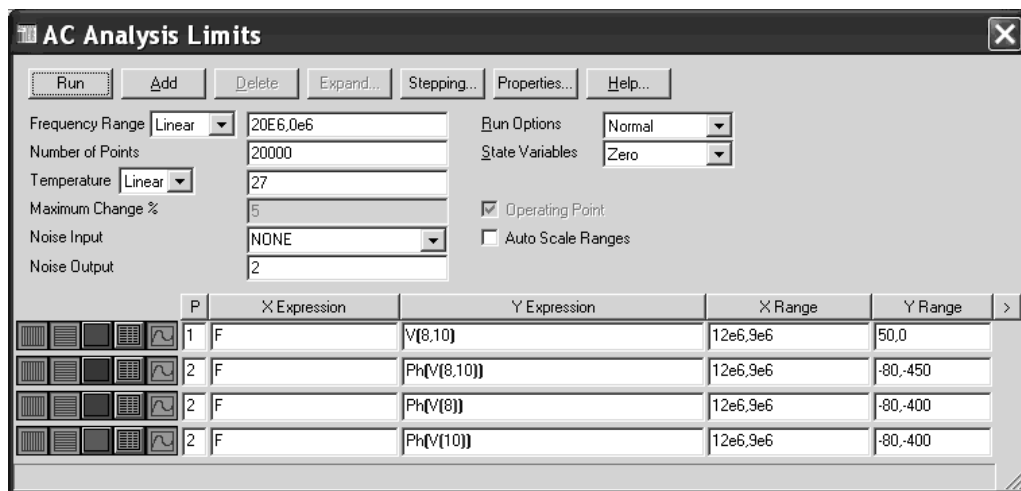


Рис. 5.25

Для некоторого значения величины индуктивности второго контура ($L2 + L3$, значения индуктивностей $L2 = L3 = 1,64$ мкГн) характер рассчитанных кривых имеет вид (рис. 5.26).

Используя маркер определите значение резонансной частоты на АЧХ контура (f_p) и фазового сдвига на этой частоте ($Ph(V(8,10))$), измерьте значения частоты, соответствующие максимуму (минимуму) каждой из ФЧХ в узлах 8 и 10 по ним определите по среднее значение частоты (f_{cp}) и величину фазового сдвига на ней ($Ph(f = f_{cp})$). Полученные результаты занесите в таблицу 1. Определение максимального и минимального значений фазы напряжений $V(8)$, $V(10)$ можно упростить, представив их в отдельных системах координат и используя маркер.

Таблица 1

L2, мкГн	f_p , МГц	$Ph(f = f_p)$, град	f_{cp} , МГц	$Ph(f = f_{cp})$, град	Π , кГц	K_r , %
1,64						
1,658						

Повторите эксперимент для величины индуктивности $L2 = L3 = 1,658$ мкГн. Установить новое значение индуктивностей второго контура можно используя процедуру удаления: активизируя режим редактирования Select Mode → нажать левую кнопку мыши, на удаляемом компоненте → нажать на пиктограмму удаления (ножницы) на панели инструментов. Затем, ис-

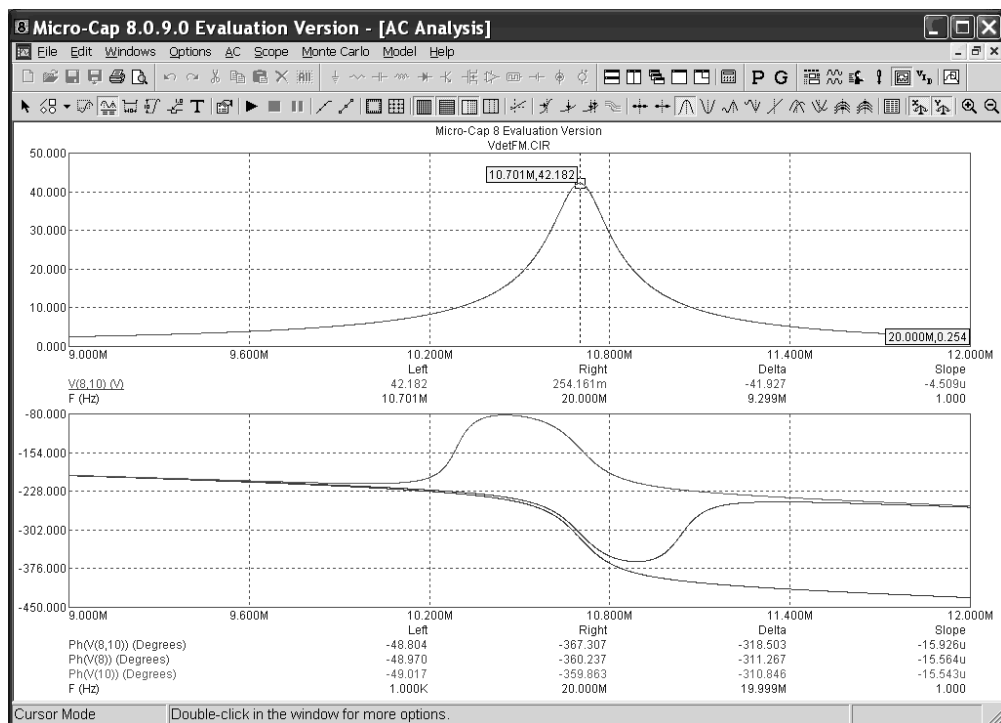


Рис. 5.26

пользуя строку основных компонентов (рис. 5.2), введите индуктивность с новым значением ее величины. Результаты моделирования занесите в таблицу 1.

Выполнение п. 2.2.3 основано на использовании методики, применявшейся при выполнении п. 2.2.1. Амплитудно-частотная характеристика каскада УПЧ, нагруженного на контур ЧД, для указанных на рис. 5.1 значениях компонентов получается при задании на подменю AC Analysis Limits пределов анализа (рис. 5.27).

Полоса пропускания каскада по уровню $0,707K_{\max}$ определяется после нахождения максимального значения АЧХ с помощью пиктограммы Peak (рис. 5.20) и, определенного по нему, требуемого уровня (рис. 5.28).

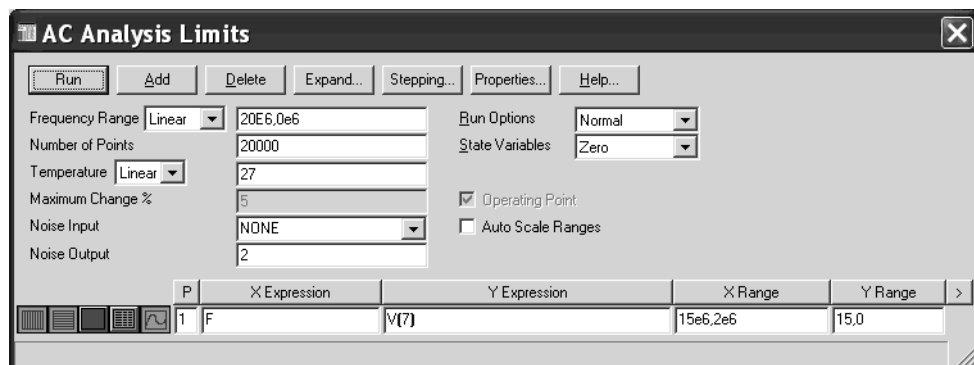


Рис. 5.27

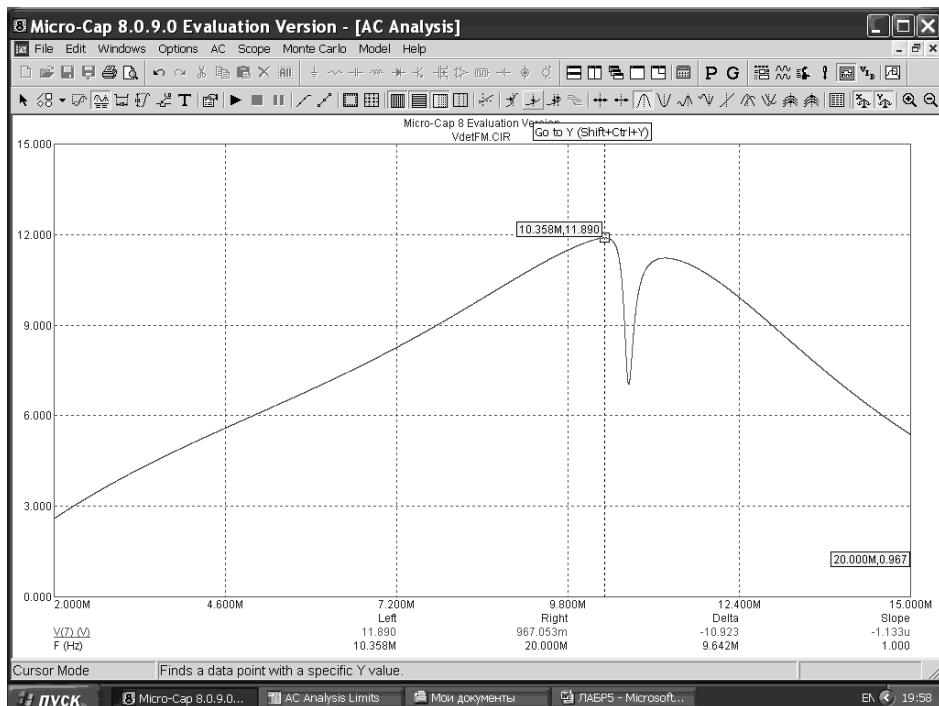


Рис. 5.28

Вычисленный уровень указывается на выпадающем подменю после нажатия пиктограммы *Go to Y*. На подменю *Go to Y* (рис. 5.29) в строке Value указывается значение $0.707Y_{\max}$ ($0,707 V(7)$) и нажатием на кнопку *Right* последовательно устанавливается правый маркер в точках, соответствующих указанному значению. Это позволяет легко определить значение полосы пропускания каскада УПЧ (П), отсчитав крайнее левое и крайнее правое, значения частот.

Установив значения $L2 = L3 = 1,658$ мкГн повторить эксперимент. Результаты свести в таблицу 1.

Исследование временных характеристик ЧД проводят при действии на входе ЧМ сигнала. Модель генератора ЧМ сигнала можно задать аналитическим выражением или использовать модели генераторов, входящих в библиотеку MC8, с соответствующей коррекцией.

Модель генератора выбирают во встроенной библиотеке, войдя в команду *Component* в меню главного окна и затем, на выдвигающихся вправо подменю, последовательно: *Analog Primitives* → *Waveform Sources* → *Voltage Source* (рис. 5.30). Нажатием левой кнопки мыши на активизированную строку *Voltage Source* входим в подменю задания параметров модели независимого источника.

Содержание верхней части подменю (рис. 5.31) *Voltage Source: Voltage Source* по содержанию аналогично использовавшихся ранее при вводе компонентов принципиальной схемы и источника гармонического сигнала. Ряд закладок, расположенных под функциональными кнопками, позволяет выби-

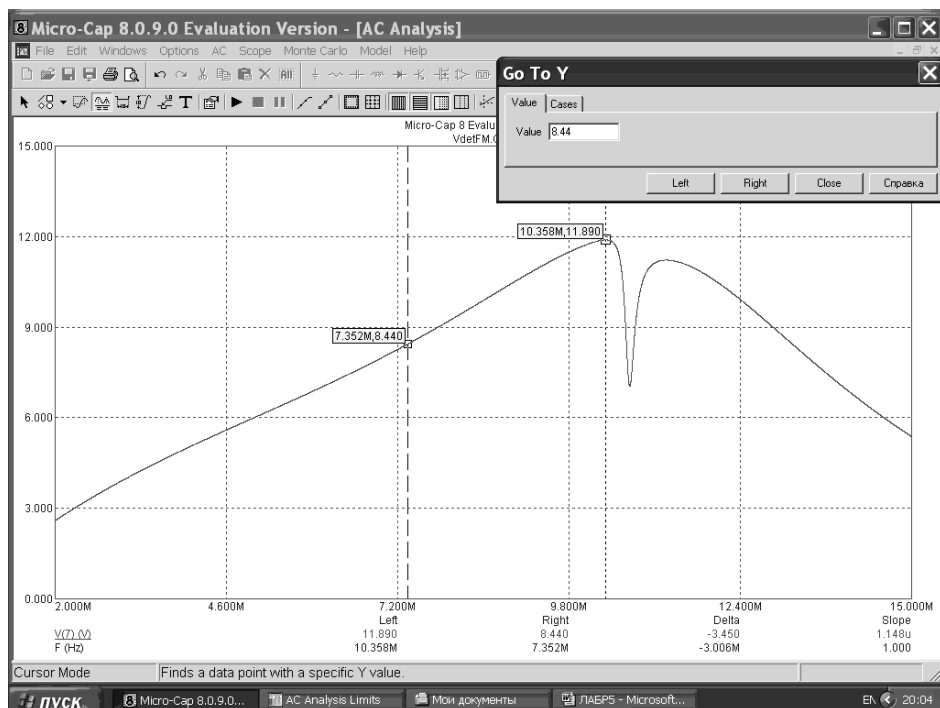


Рис. 29

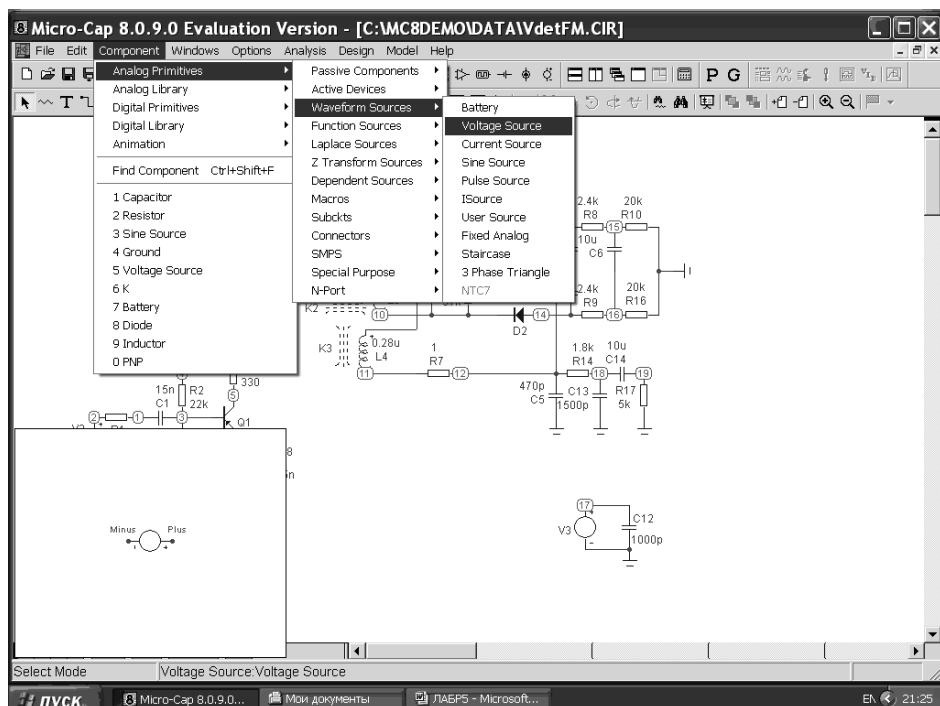


Рис. 5.30

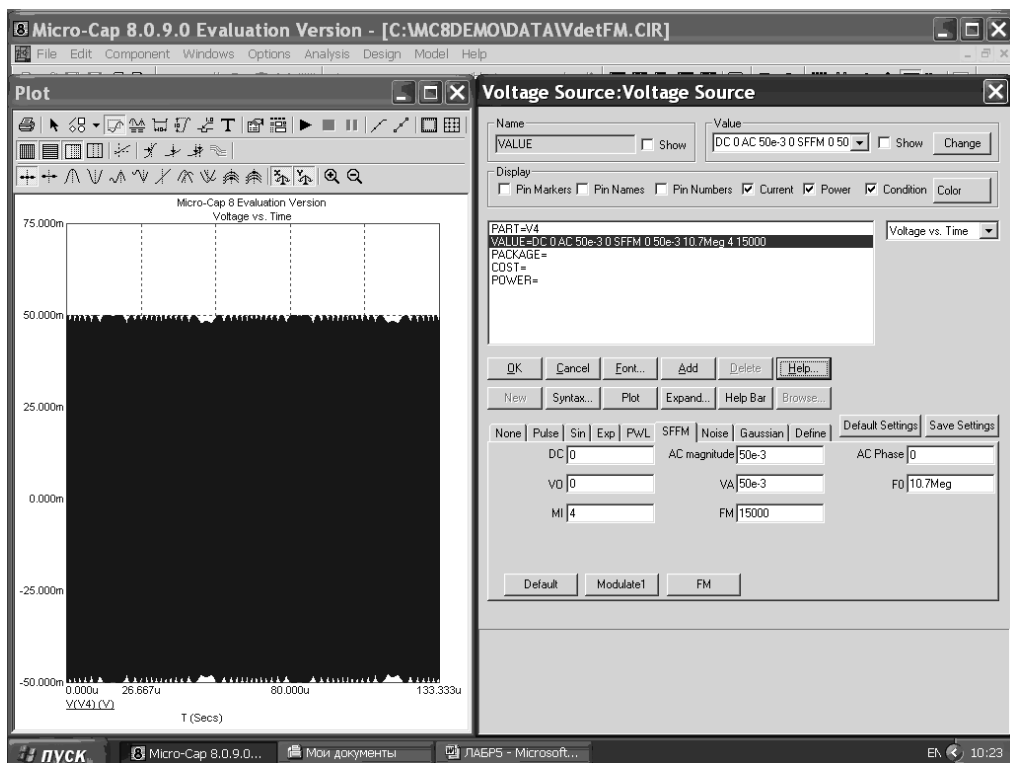


Рис. 5.31

рать модели источников различных типов сигналов (None — источник постоянного напряжения, заданной величины, Pulse — источник сигнала по форме близкой к прямоугольной с конечным временем нарастания и спада, Sin — источник гармонического сигнала, Exp — источник импульсного сигнала, процесс установления и спада которого, описывается экспонентой, PWL — Piece Wise Linear type — источник, форма сигнала которого описывается отрезками прямых, Noise — источник шумоподобного сигнала, Gaussian — источник импульсного сигнала, форма которого определяется законом Гаусса, Define — источник сигнала, закон изменения которого определяется пользователем). Зкладка SFFM — Single Frequency FM type (источник ЧМ сигнала при модуляции несущей гармоническим сигналом) — открывает описание параметров источника, где:

DC — амплитуда напряжения, используемая при анализе свойств схемы на постоянном токе;

AC magnitude — амплитуда несущего колебания, используемая при моделировании процессов в частотной области;

AC phase — начальная фаза несущего колебания при моделировании процессов в частотной области;

V0 — напряжение смещения;

VA — амплитуда несущего колебания, используемая при анализе схемы во временной области;

F0 — частота несущего колебания;

MI — индекс модуляции;

FM — частота модуляции.

Выражение, определяющий выходное напряжение генератора:

$$v(t) = V0 + VA * \sin(2 * \pi * f0 * TIME + m_i * \sin(2 * \pi * f_m * TIME)),$$

где TIME — время анализа переходных процессов.

Нажатие на кнопку Default присваивает значения указанных параметров по умолчанию, Modulate 1 — модуляция несущей тоном с частотой fm, FM — вид модуляции (частотная).

Новые параметры, вместо значений, представленных программой по умолчанию, вводятся при помещении курсора в окно (рис. 5.31) соответствующего параметра (V0, VA и т. д.) и замене на требуемое значение. Осциллограмму сигнала генератора, включенного на входе детектора, и, использующегося для получения переходных характеристик в различных узлах ЧД, можно наблюдать на экране монитора, нажав на кнопку Plot (кнопка расширения окна содержит надпись Voltage vs. Time — временная зависимость напряжения).

Принципиальная схема дробного ЧД при включении на его входе генератора с ЧМ сигналом имеет вид (рис. 5.32).

Для выполнения п. 2.2.4 необходимо войти в режим анализа временных характеристик выбрав команду Analysis в меню главного окна и на выпадающем подменю — строку Transient (рис. 5.33).

На выпадающем подменю Transient Analysis Limits (рис. 5.34) указываем параметры, определяющие процедуру анализа и вид выводимых кривых.

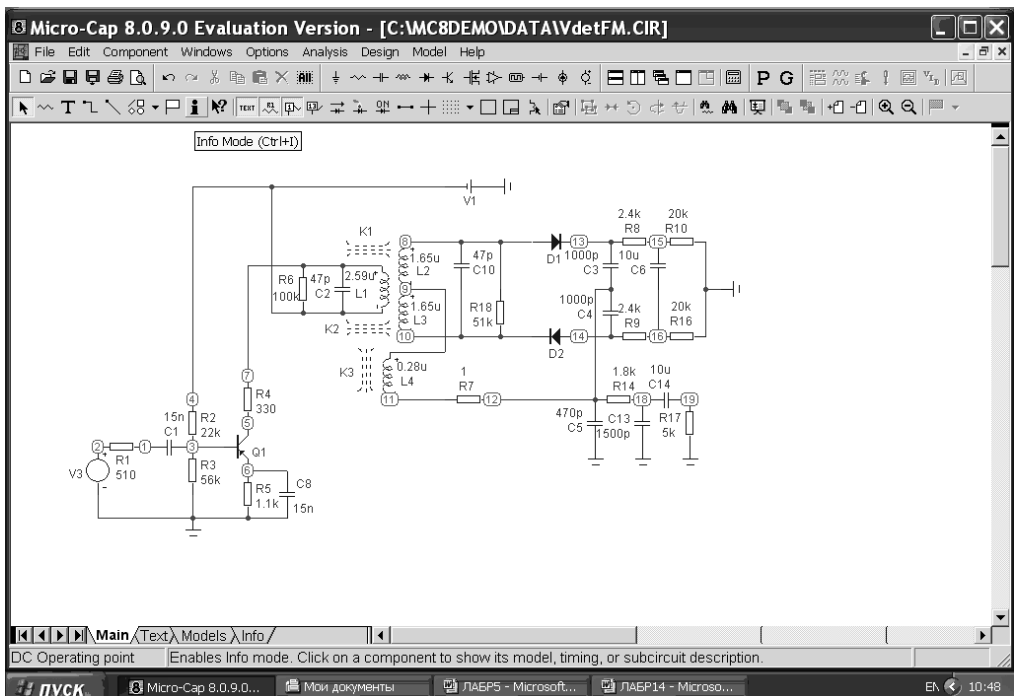


Рис. 5.32

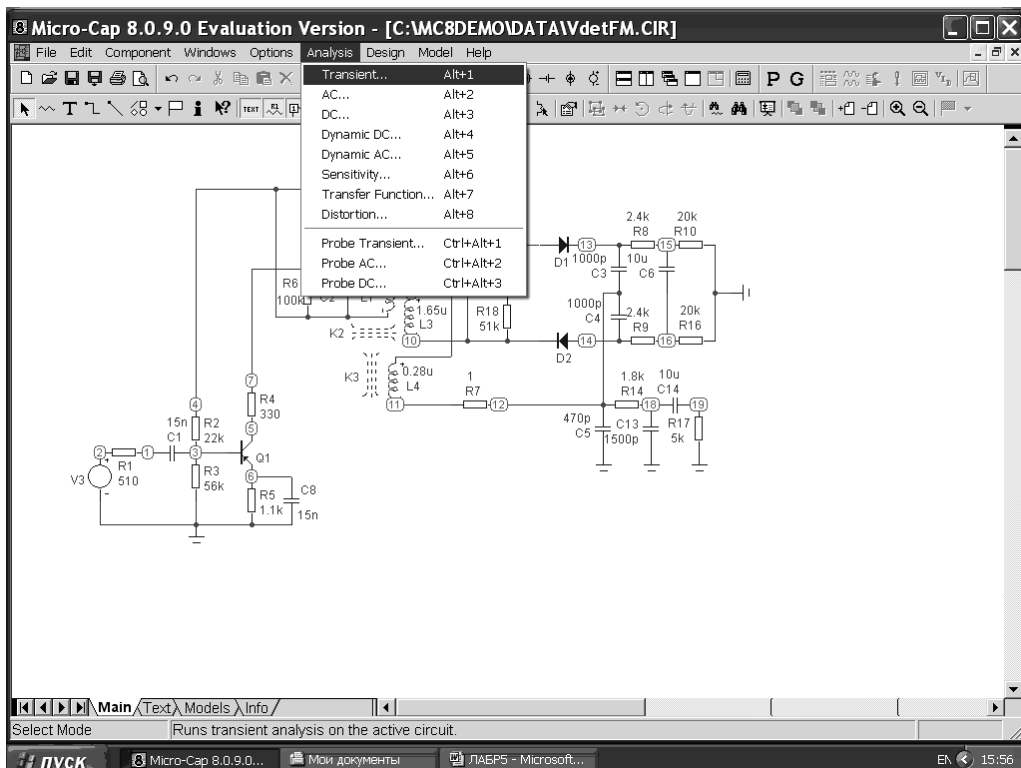


Рис. 5.33

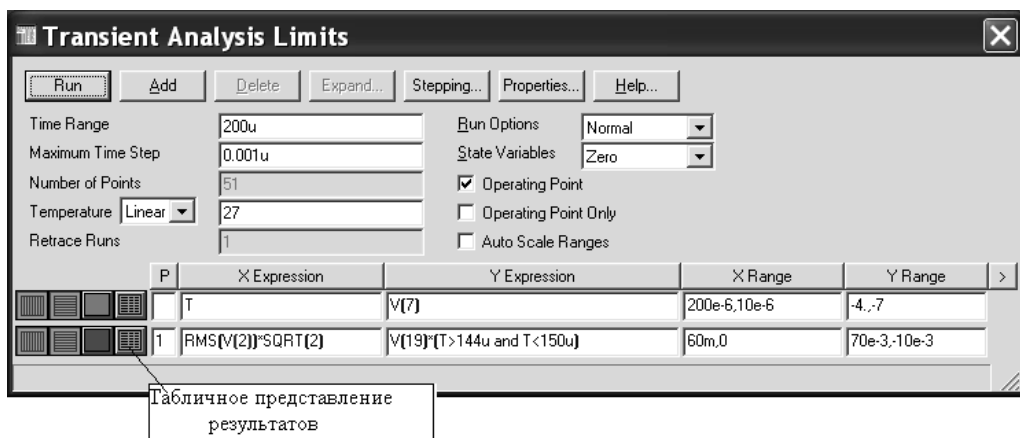


Рис. 5.34

Командные кнопки в верхнем ряду подменю означают:

Run — вход в режим анализа;

Add — добавить (строку внизу подменю) график, выводимый на экран монитора;

Delete — удалить (не выводить график) строку;

Expend — расширить объем текстовой информации размещаемой в диалоговом окне для редактирования или просмотра. Для использования этого признака курсор помещают в подлежащем редактированию текстовом поле, нажимают левую кнопку мыши и затем кнопку Expand;

Stepping — проводить анализ для ряда значений параметра выбранного компонента (модели);

Properties — вызывает диалоговое окно, которое позволяет управлять режимом анализа и вывода кривых на дисплей;

Help — режим помощи.

Левая колонка подменю определяет числовые пределы:

Time Range — верхний предел времени моделирования;

Maximum Time Step — максимальный шаг интегрирования;

Number of Points — число точек выводимых на печать (если задается такой режим);

Temperature — кнопка разворачивающегося окна определяет закон, по которому задается изменение температуры устройства в процессе анализа (пределы анализа задаются в строке справа);

Retrace Run — определяет кратность проводимого анализа (когда указывается опция Retrace в строке State Variables раскрывающегося окна).

В правом столбце подменю задаются опции кривых.

Run Options — на раскрывающемся окне выбираются режимы:

Normal — процесс моделирования заканчивается выводом на экран монитора (без записи на жесткий диск);

Save — процесс моделирования заканчивается записью результатов на жесткий диск в файл с расширением .TSA;

Retrieve — результаты моделирования, проведенного ранее, и записанного на диск, воспроизводятся на экране монитора как после процесса моделирования;

State Variables — на раскрывающемся окне выбираются начальные значения для процесса моделирования;

Zero — задаются нулевые значения напряжений в узлах и токи через индуктивности;

Read — в качестве исходных задаются предварительно записанные данные;

Leave — начальными являются текущие значения предыдущего расчета, а для первого расчета выбираются нулевые начальные условия;

Retrace — обеспечивает повторение расчета столько раз, сколько указано в строке Retrace Run;

Operating Point — нажатая кнопка против этой опции предваряет любой анализ расчетом по постоянному току;

Operating Point Only — нажатие кнопку обеспечивает расчет параметров устройства только по постоянному току;

Auto Scale Ranges — нажатая кнопка обеспечивает автоматический выбор масштаба для всех выводимых кривых;

Опции кривых

Две крайние слева пиктограммы, определяют изменение масштаба выводимой переменной вдоль оси X или Y, соответственно. Нажатие на пиктограмму позволяет выбирать линейный или логарифмический (Log/Linear) законы изменения по осям. Устанавливаемый порядок изменения масштаба действует только на одной строке.

Следующая пиктограмма на каждой строке позволяет выбирать цвет кривой, выводимой на экран. Нажатие на пиктограмму обеспечивает доступ к меню цвета, содержащему 64 цвета. Цвет пиктограммы соответствует выбранному цвету для кривой, выводимой на экран.

Последняя пиктограмма (Numeric Output) в нажатом положении формирует цифровой файл с расширением.TNO, в виде таблицы результатов расчета кривой. Число выводимых значений определяется цифрой, указанной в строке Number of Points числовых пределов.

Plot Group — колонка (P) определяет порядковый номер системы координат, в которой будет выводиться кривая. Одновременно может выводиться от 1 до 9 графиков в своей системе координат. Присвоение одной цифры нескольким строкам позволяет получать несколько графиков в одной системе координат.

Expressions — выражения, определяющие тип переменной (или выражения), выводимой по каждой оси. Допустимые при временном анализе переменные можно выбрать на выпадающем подменю, нажав правую кнопку мыши (рис. 5.35). По оси абсцисс (XExpression) обычно в качестве перемен-

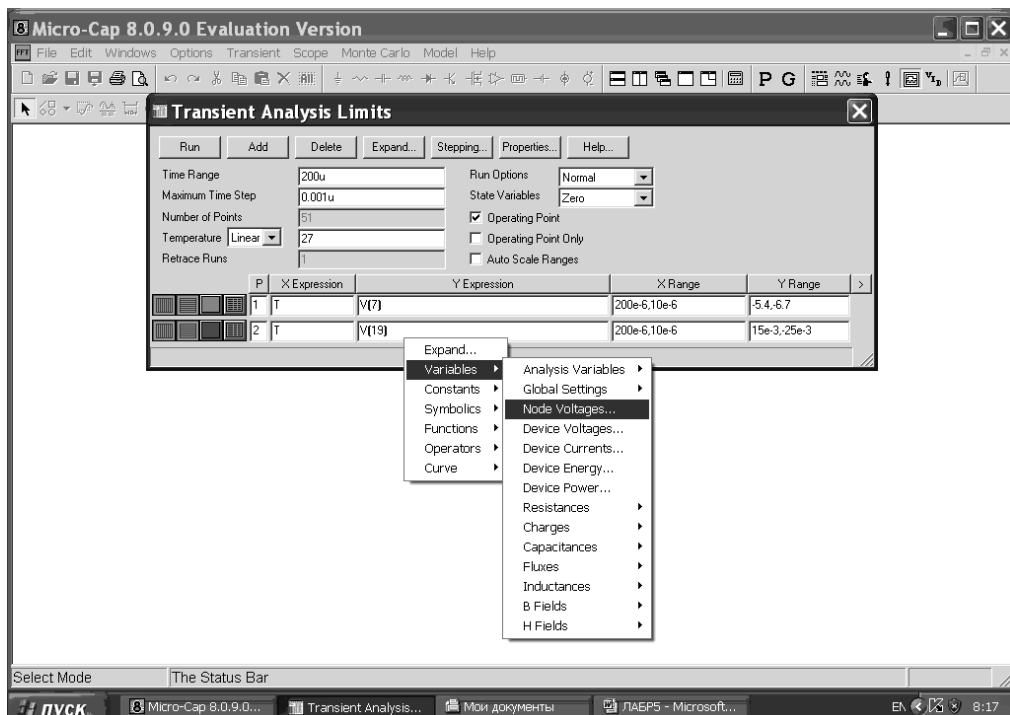


Рис. 5.35

ной выбирают время (T), а по оси ординат (YExpression) из предлагаемого перечня переменных (например, напряжений в узлах).

Пределы значений переменных, выводимых на экран, и шаг масштабной сетки указывается в колонках XRange, YRange, если не используется автоматический выбор пределов изменения переменных и шага сетки (нажата кнопка Auto Scale Ranges). Вначале указывается верхнее значение, затем нижнее. Шаг сетки можно не указывать.

Для указанных на рис. 5.34 и рис. 5.35 параметров моделирования начальный участок переходных характеристик, описывающий нестационарный процесс в узлах 7 и 19, на экран не выводится. Достаточно большой интервал моделирования (200 мкс) выбран для снижения влияния нестационарных процессов на спектр амплитуд выходного напряжения.

Результаты моделирования во временной области в узлах 7 и 19 принципиальной схемы ЧД (рис. 5.32) при действии на входе ЧМ сигнала представлены на рис. 5.36.

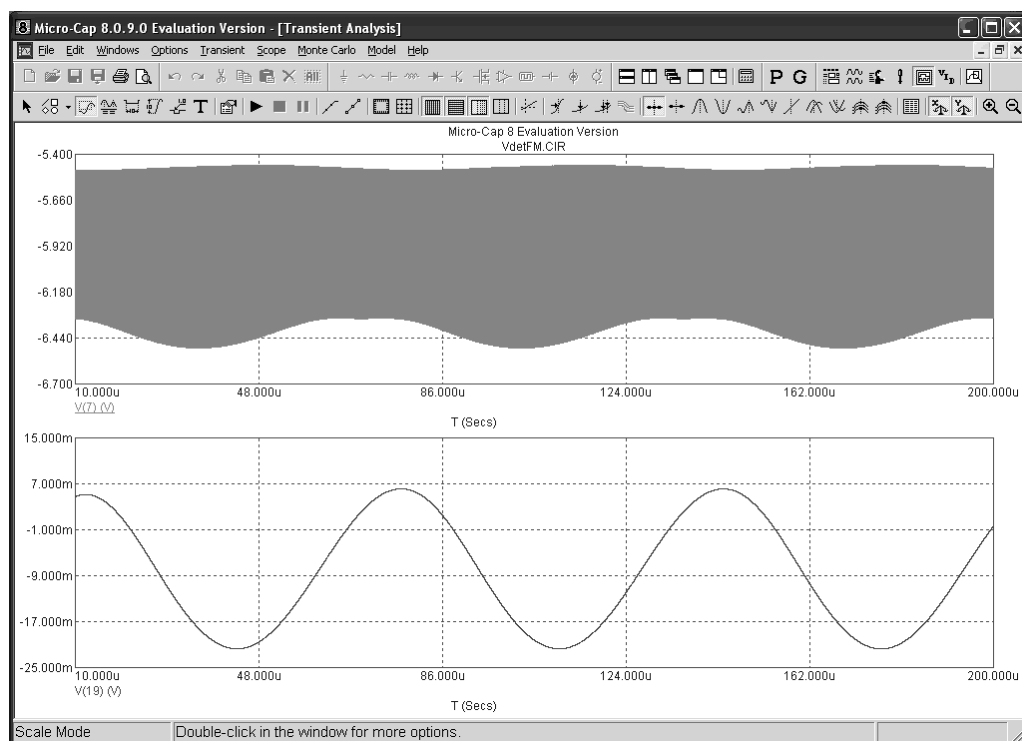


Рис. 5.36

Для получения амплитудного спектра выходного напряжения и определения коэффициента гармоник воспользуемся встроенной процедурой быстрого преобразования Фурье (FFT). По завершению процесса моделирования в окне главного меню выбираем команду Transient и на выпадающем подменю выбираем строку FFT Windows и режим добавления окна (Add FFT Window), содержащего частотные характеристики указанного процесса (рис. 5.37). На

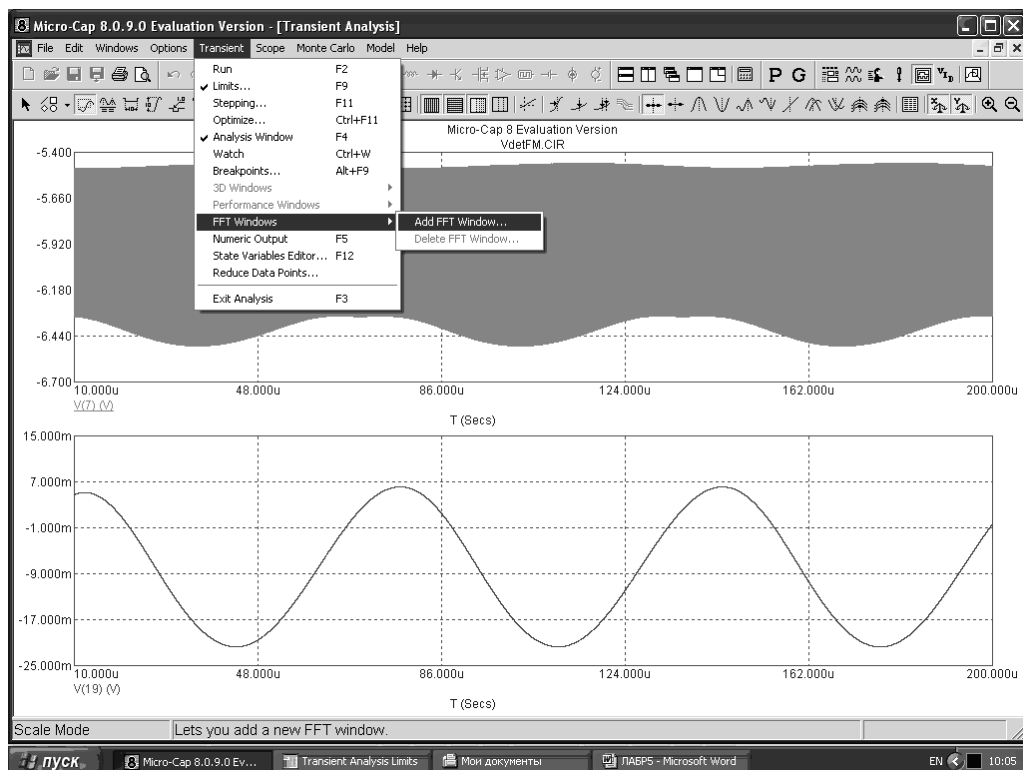


Рис. 5.37

выпадающем подменю Properties (свойства) выбираем закладку Plot (рис. 5.38). В левом окне (Curves) укажем спектр какого напряжения будем находить (Harm(V(19))). Для этого в рамке What To Plot (что выводить на рисунок) нажмем радиокнопку (Mag-амплитуда) и в раскрывающемся окне Expression выберем V(19). Выбрав режим вывода на экран (Show) амплитудного спектра (Curve) одним графиком (на раскрывающемся окне в рамке Plot Group выбирается цифра 1), в рамке Title указываем автоматическое присвоение спектру амплитуд в узле 19 обозначения Harm(19)). Нажав на кнопку Add, указываем на вывод перечисленных в окне зависимостей на экран монитора. Подтверждением завершения ввода информации является нажатие кнопки OK.

Спектр амплитуд выходного напряжения в узле 19 представлен на рис. 5.39.

Для оценки коэффициента гармоник воспользуемся маркером, нажав на пиктограмму Peak. Установив маркер вблизи значения модулирующей частоты (12—14 кГц на оси абсцисс), нажав на левую кнопку мыши определяем значение амплитуды первой гармоники в выходном сигнале (на частоте 15 кГц). Амплитуду второй гармоники можно определить таким же образом или использовать правый маркер. Для этого, оценив значение амплитуды первой гармоники, нажать на пиктограмму Go To X (рис. 5.40) и на закладке Go To X в рамке Value установить значение частоты второй гармоники (30 кГц) и правый маркер укажет значение амплитуды второй гармоники. Составляющими

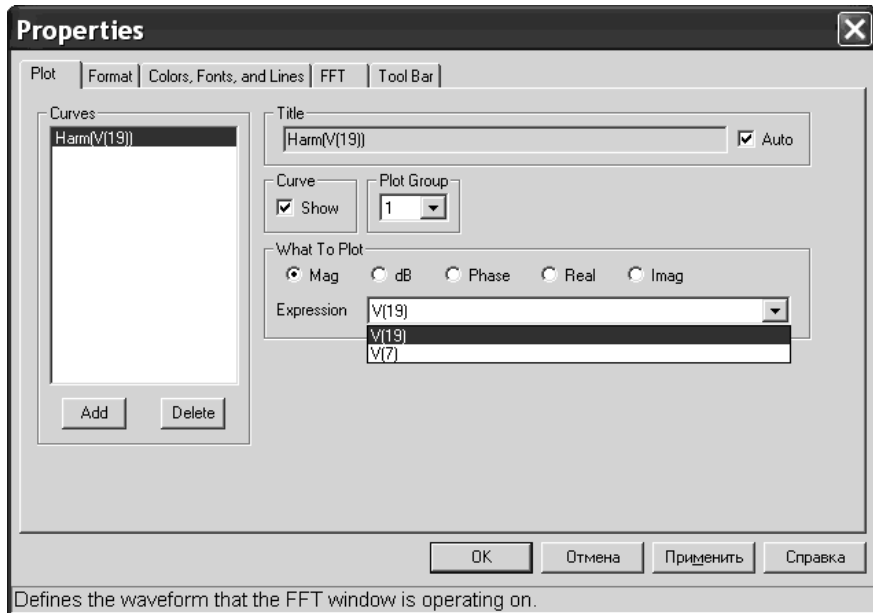


Рис. 5.38

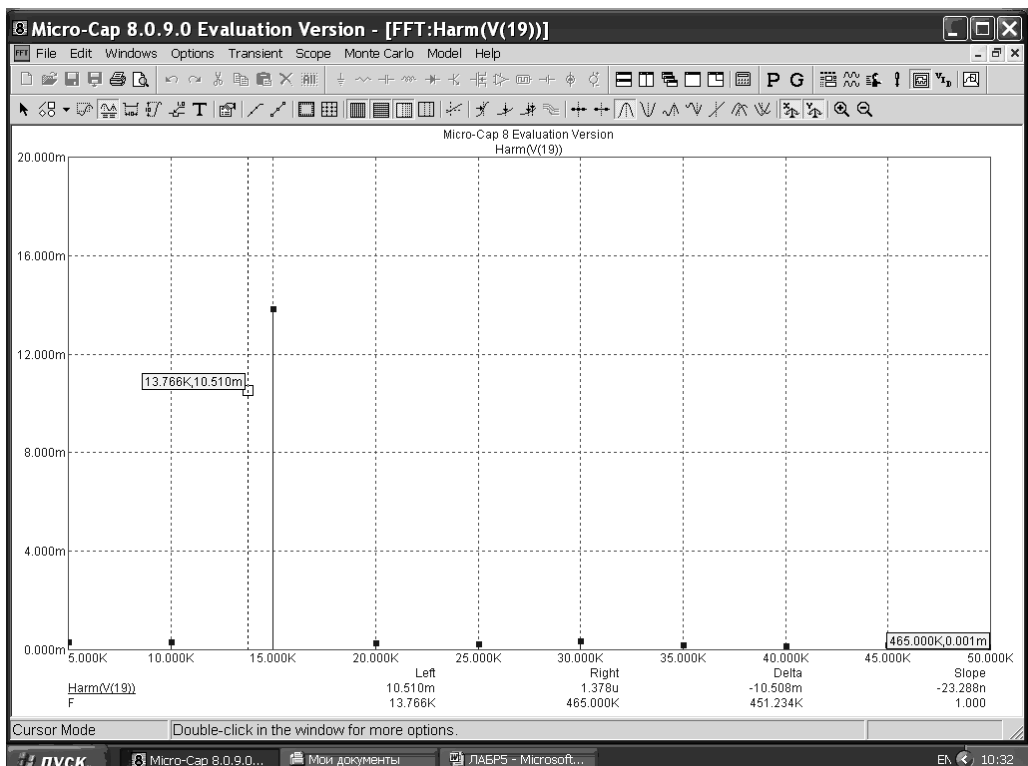


Рис. 5.39

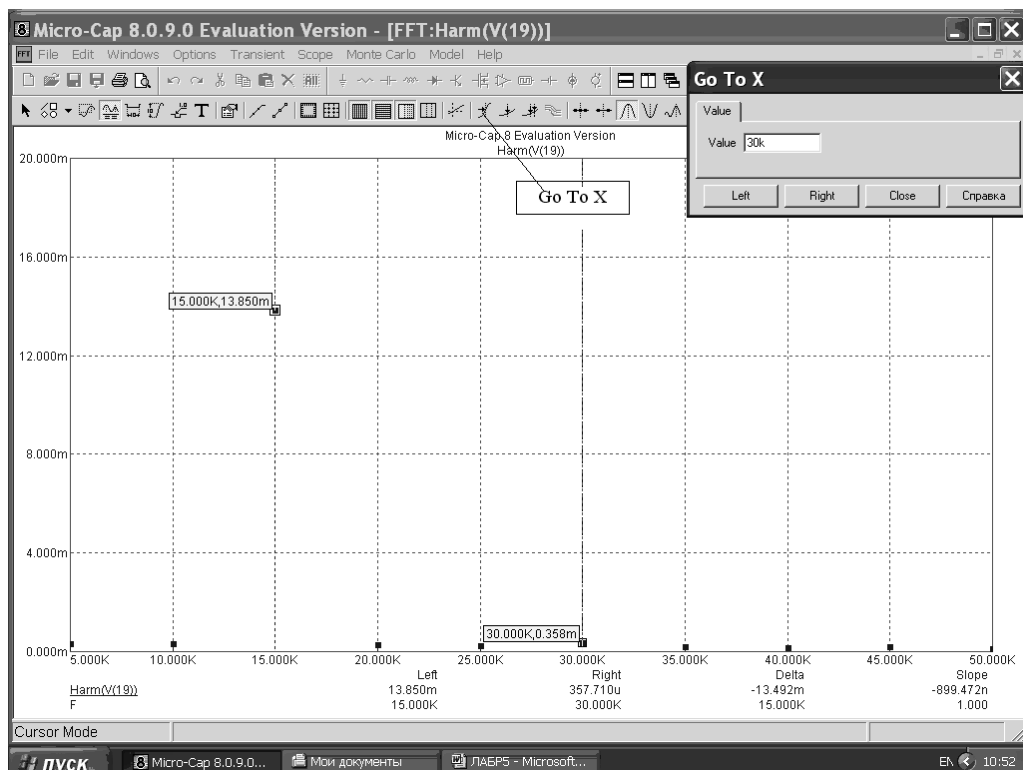


Рис. 5.40

спектра более высокой кратности можно пренебречь. Результаты занесите в таблицу 1.

Проделанные выше расчеты амплитудного спектра выходного напряжения проводились для условий, описанных на закладке FFT подменю Properties (рис. 5.41), где определяются верхний (Upper Time Limit) и нижний (Lower Time Limit) пределы анализа выходного напряжения во времени, а также число точек (Number of Points) на этом интервале (выбирается стандартным). Увеличение числа точек приводит к увеличению времени анализа переходных характеристик. Режим автоматического (Auto Scaling) выбора масштаба (Auto Scale First) по оси абсцисс (оси частот) определяет количество выводимых на экран монитора составляющих спектра амплитуд (10 гармоник) с включением постоянной составляющей (Include DC Harmonic) или без нее. Кнопка Default выводит на монитор ограничения, задаваемые программой по умолчанию, при которых проводится анализ. Нажатие на кнопку Set Default позволяет редактировать, вводимые по умолчанию ограничения, для конкретной схемы (следует пользоваться с осторожностью).

Вычислите значение коэффициента гармоник при значении индуктивности вторичного контура $L_2 = L_3 = 1,658$ мкГн. Результаты расчета занесите в таблицу 1.

Для выполнения п. 2.2.5 необходимо провести подобные расчеты при различных значениях коэффициента связи, указанных в задании, между катуш-

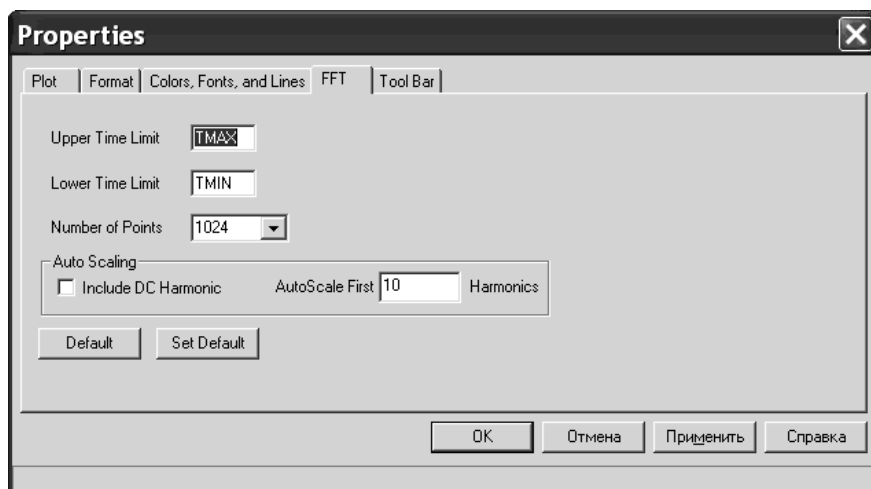


Рис. 5.41

кой индуктивности первичного контура (L1) и катушкой связи (L3). Новое значение коэффициента связи можно задавать используя пиктограмму Info Mode (рис. 5.32). Поместив курсор на пиктограмму, нажатием на левую кнопку мыши заменяем курсор символом I. Поместив его на обозначение трансформатора K3 и, нажав левую кнопку мыши на выпадающем меню параметров трансформатора, K: Mutual inductance/Nonlinear magnetics core model (рис. 5.7) активизируем в левом окне меню строку Coupling. Появившееся в рамке Value значение коэффициента связи, заменяется на новое и, нажатием кнопки ОК, подтверждается замена. Результаты моделирования вносим в таблицу 2.

Таблица 2

Изменяющийся параметр	Значение параметра	Амплитуда выходного напряжения, В
Коэффициент связи L1 → L4, $\kappa_{св}$	0,99	
	0,9	
	0,8	
	0,7	
Частота несущего колебания f, МГц	10,7	
	10,75	
	10,8	
	10,85	
	10,9	
	10,95	
	11,0	
	11,05	

Для выполнения п. 2.2.6 необходимо подать на вход каскада ЧД амплитудно-модулированный сигнал, моделирующий паразитную АМ. В качестве источника воздействия выберем независимый источник напряжения с 30 % АМ (без ЧМ). Для этого в меню главного окна выбираем команду Component и затем на выпадающих вправо подменю последовательно Analog Primitives → Function Sources → NFV (рис. 5.42).

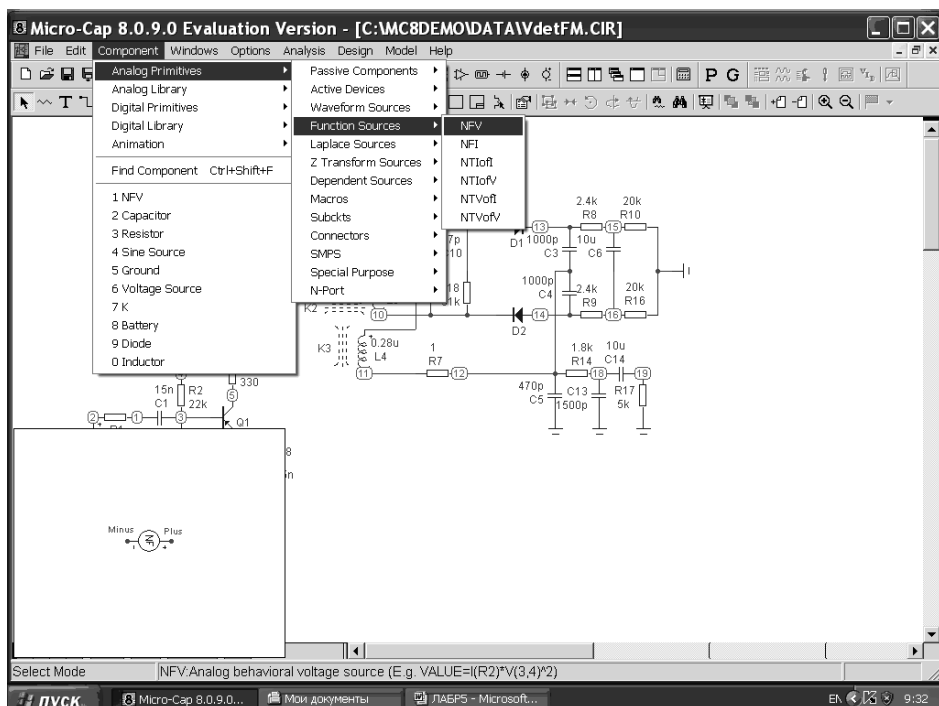


Рис. 5.42

На выпадающем подменю NFV: Analog behavioral voltage source (рис. 5.43), обладающем типовым описанием источника сигнала (рис. 5.14), в активной строке VALUE вводится аналитическое выражение, описывающее закон изменения амплитуды сигнала при модуляции тоном с частотой 1000 Гц и частотой несущего колебания 10,7 МГц. Строка DERIVATIVE (производная) принимается по умолчанию. Форма входного воздействия выводится на экран монитора при нажатии на кнопку раскрывающегося окна Plot (рис. 5.43).

Измерение амплитуды выходного колебания на нагрузке (V(19)) осуществляется в конце моделирования переходного процесса (Transient Analysis, рис. 5.36) с использованием маркеров, оценивающих максимальное и минимальное значение процесса на последнем периоде выходного сигнала (двойное значение амплитуды, рис. 5.44). Результаты моделирования заносятся в таблицу 2. Для изменения частоты несущего колебания входят в подменю параметров модели входного сигнала (NFV). В активированной строке VALUE заменяют значение частоты на требуемое, подтверждая это нажатием на кнопку ОК (возможна коррекция значений пределов анализа по времени и по ве-

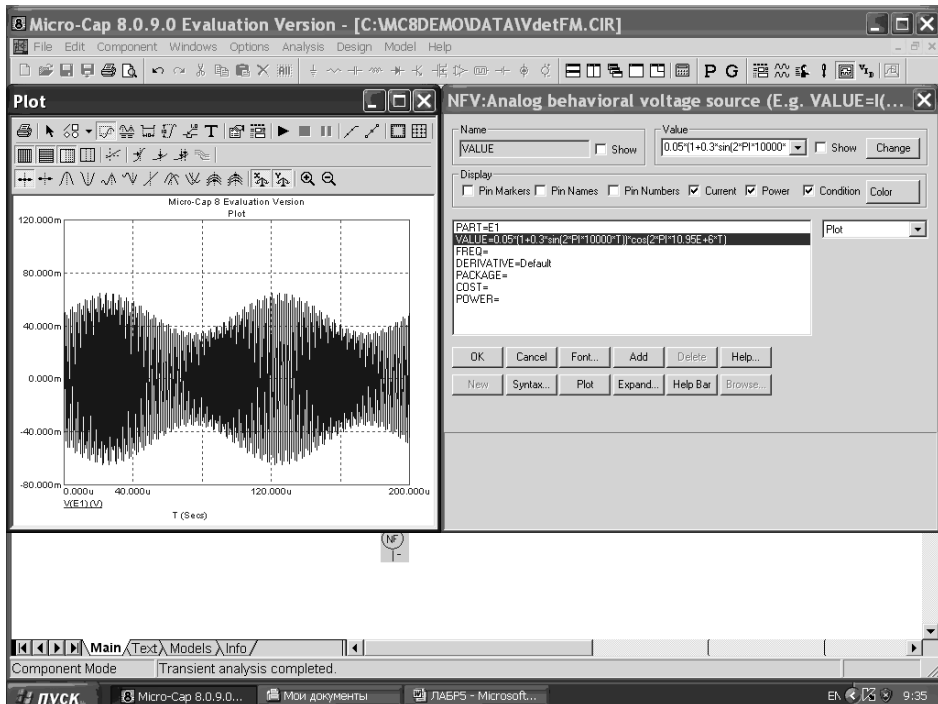


Рис. 5.43

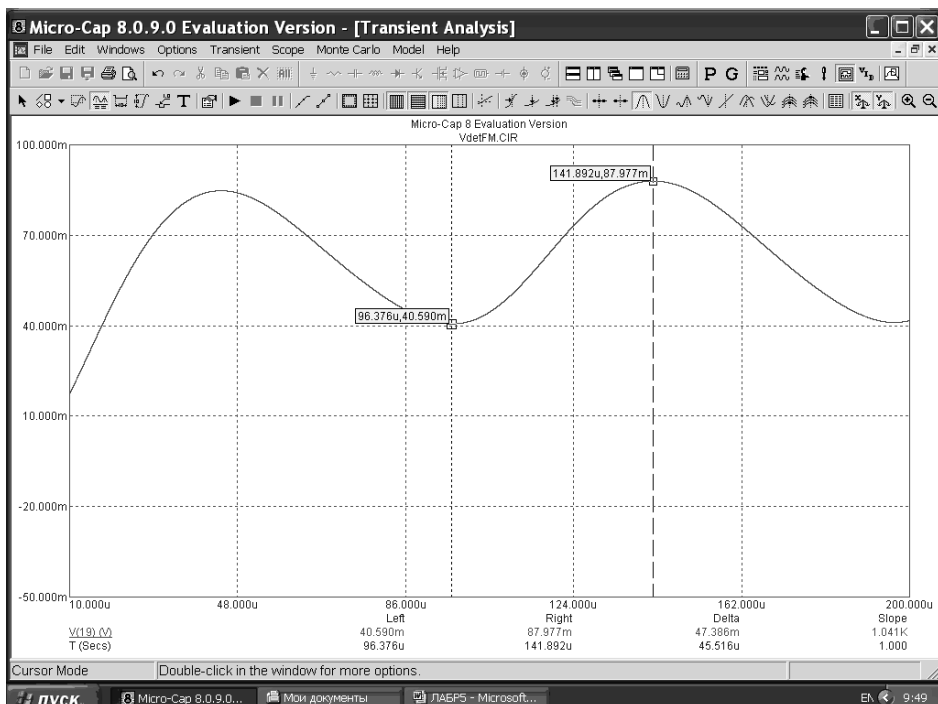


Рис. 5.44

личине выходного напряжения). Результаты моделирования заносятся в таблицу 2.

Для выполнения п. 2.2.7 необходимо включить на вход ЧД генератор ЧМ сигнала (рис. 5.30). Последовательно входя в режим Transient Analysis → Stepping нажатием на кнопку открывающегося окна в строке Step What активизируем строку V3, а в правом раскрывающемся окне выбираем sffm.va (амплитуда несущего колебания, при моделировании во временной области) для значения частоты несущего колебания $f = 10,7$ МГц (рис. 5.45).

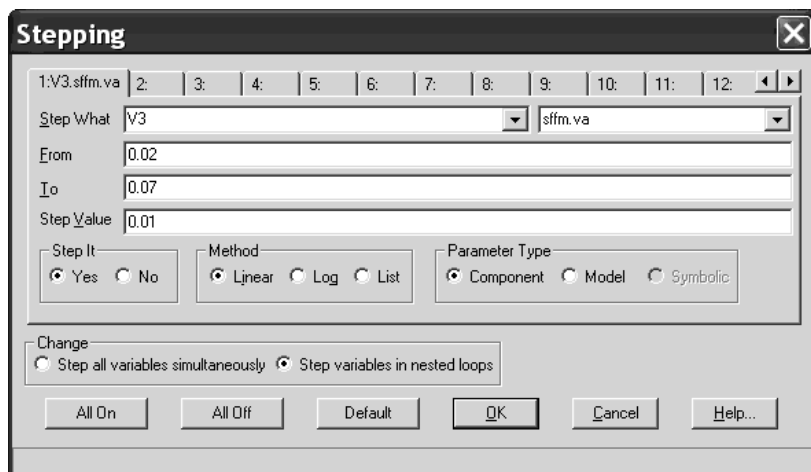


Рис. 5.45

Возвращаясь в подменю Limits меню Transient Analysis, указываем пределы анализа (по оси абсцисс будут откладываться значения амплитуды источника входного сигнала а по оси ординат — значения амплитуды сигнала на выходе ЧД на достаточно малом отрезке времени (рис. 5.46). (Следует заметить, что расчет сигнала на выходе ЧД для одного значения амплитуды входного сигнала составляет примерно минуту.)

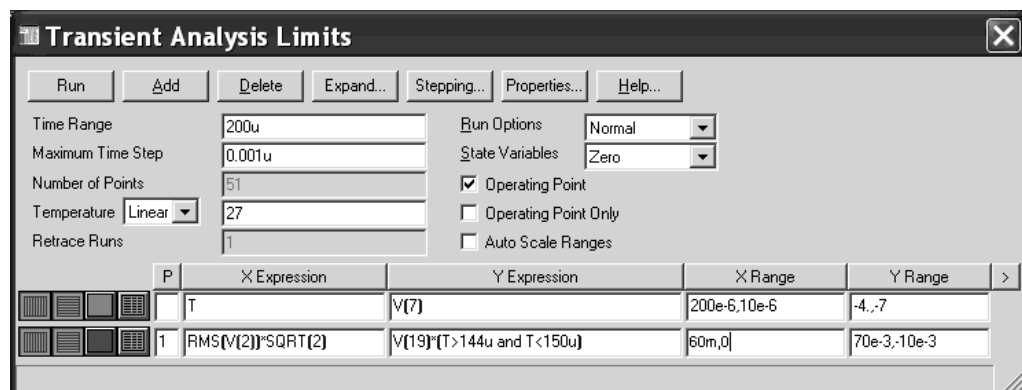


Рис. 5.46

Результирующей характеристикой будут дискретные отсчеты значений выходного напряжения, представляемой в отчете в виде распечатки, для указанных в Stepping значений амплитуд входного сигнала.

5 Содержание отчета

- 5.1. Цель работы.
- 5.2. Принципиальная схема исследуемого каскада.
- 5.3. Результаты расчета.
- 5.4. Графики, построенные по таблицам 1 и 2.
- 5.5. Распечатка результатов выполнения п. 2.2.7.
- 5.6. Краткие выводы.

6 Краткие теоретические сведения

Широкое применение частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в современных радиотехнических системах и радиовещании связано с рядом преимуществ у таких сигналов по сравнению с амплитудно-модулированными (АМ): более высокая помехоустойчивость и лучшее использование мощности передатчика. Повышенная помехоустойчивость достигается за счет значительно большей ширины спектра ЧМ сигнала по сравнению с АМ сигналом, поэтому частотная модуляция используется в основном в УКВ и СВЧ диапазонах.

Мощность, приходящаяся на частоту несущего колебания, для реально используемых индексов модуляции значительно меньше соответствующей мощности в АМ сигнале. Кроме того, при частотной модуляции несущее колебание не содержит полезной информации и поэтому в радиотракте может быть применено ограничение сигнала по уровню для устранения паразитной АМ. Воздействие помех, проявляемое в форме угловой модуляции полезного сигнала, значительно меньше воздействия на амплитуду сигнала в АМ приемнике.

Выигрыш в отношении сигнал/помеха на выходе частотного детектора зависит от индекса модуляции. При одинаковом уровне воздействующих импульсных и флуктуационных помех выигрыш при использовании ЧМ по сравнению с АМ составляет

$$B_{\text{фл}} = \sqrt{3}\beta, B_{\text{имп}} = 2\beta, \quad (5.1)$$

где β — индекс модуляции.

Помехоустойчивость определяется теоретически бесконечным спектром ЧМ сигнала при $\beta \gg 1$. Реально ширину спектра ограничивают полосой частот, на границах которой, составляющие спектра удовлетворяют условию $A_k = 0,01 U_0$, где U_0 — амплитуда немодулированного колебания:

$$\Delta F_{\text{чм}} = 2F_{\text{max}} (1 + \beta + \sqrt{\beta}). \quad (5.2)$$

Отсюда видно, что для повышения помехоустойчивости необходимо увеличивать индекс модуляции, т. е. использовать значительно более широкопо-

лосные сигналы по сравнению с АМ ($\Delta F_{\text{ам}} = 2F_{\text{max}}$). Это в свою очередь требует широкой полосы у радиотракта приемника.

Уменьшение полосы приводит к возникновению линейных (недопустимое уменьшение коэффициента передачи в полосе пропускания) и нелинейных (новые спектральные составляющие) искажений. Напряжение на выходе частотного детектора определяется мгновенной частотой входного сигнала, зависящей от фазовых характеристик избирательных каскадов в основном тракта промежуточной частоты.

При гармонической модуляции несущего колебания с частотой $\Omega = 2\pi F$, мгновенная частота модулированного колебания

$$\omega(t) = \omega_n + \Delta\omega_d \cos \Omega t,$$

где $\omega_n = 2\pi f_n$ — центральная (несущая) частота; $\Delta\omega_d = 2\pi\Delta f_d$ — девиация (наибольшее отклонение) частоты. Отсюда фаза

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_n t + \frac{\Delta\omega_d}{\Omega} \sin \Omega t,$$

а напряжение ЧМ сигнала

$$u(t) = U \cos \varphi(t) = U \cos(\omega_n t + \beta \sin \Omega t) = U \cos(\omega_n + \beta \sin \Omega t)t, \quad (5.3)$$

где индекс модуляции $\beta = \Delta\omega_d / \Omega$.

Частотный детектор (ЧД) — устройство, предназначенное для формирования выходного напряжения в соответствии с законом изменения частоты входного сигнала.

При действии на входе ЧД сигнала (рис. 5.47а), несущая которого модулирована по гармоническому закону (5.1), напряжение на нагрузке должно изменяться согласно рис. 5.47в.

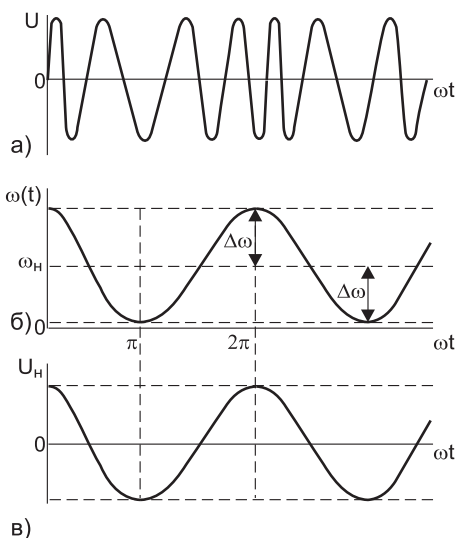


Рис. 5.47

Выходное напряжение является результатом перемножения составляющих спектра входного сигнала в нелинейном или параметрическом элементе (произведение составляющих спектра, описываемых тригонометрическими функциями, есть тригонометрическая функция с разностным или суммарным аргументом — частотами). Появляющаяся полезная частотная составляющая обладает постоянной амплитудой, так как амплитуда входного сигнала не изменяется. Поэтому использование одного нелинейного элемента недостаточно для детектирования ЧМ сигнала и его конструкцию необходимо дополнить элементом, обладающим частотной зависимостью, например сопротивлением, от частоты.

В конструкции ЧД сочетающей инерционный (частотно-зависимый) элемент и безинерционный (нелинейный, параметрический) на первом этапе производится преобразование изменения мгновенной частоты входного сигнала, например в изменение амплитуды, формирование амплитудно-частотно-модулированного (АЧМ) сигнала с последующим детектированием его на амплитудном детекторе (рис. 5.48).



Рис. 5.48

Общая структурная схема ЧД содержит на своем входе амплитудный ограничитель (АО), устраняющий паразитную амплитудную модуляцию ЧМ сигнала. По типу преобразования ЧМ сигнала частотные детекторы классифицируют на три группы:

- частотно-амплитудные, где ЧМ сигнал преобразуется в амплитудно-частотно-модулированное колебание с последующим детектированием в АД;
- частотно-фазовые, где ЧМ сигнал преобразуется в фазочастотное колебание с последующим детектированием на фазовом детекторе;
- частотно-временные, где ЧМ сигнал преобразуется в последовательность импульсов с переменной скважностью и последующим детектированием импульсным детектором.

Частотно-амплитудные по схеме преобразователя вида модуляции подразделяют на ЧД с расстроенным колебательным контуром и дифференциальные. Дифференциальные преобразователи включают частотные дискриминаторы на расстроенных или на настроенных связанных контурах и дробные детекторы.

К основным характеристикам, определяющим технические показатели ЧД, относятся:

— верность воспроизведения закона модуляции входного сигнала;

Верность оценивается коэффициентом нелинейных искажений сигнала k_r ,

$$k_r = \sqrt{(U_{2\Omega_m}^2 + U_{3\Omega_m}^2 + \dots)} / U_{\Omega_m}, \quad (5.4)$$

где U_{Ω_m} , $U_{2\Omega_m}$, $U_{3\Omega_m}$ — амплитуды гармоник частоты модуляции.

Для современных ЧД эта величина составляет 1—2 %. Величина нелинейных искажений определяется в основном статической детекторной характеристикой ЧД: зависимость напряжения на выходе ЧД от частоты немодулированного сигнала. Линейность статической детекторной характеристики в области частот от $f_n - \Delta f_{\text{дmax}}$ до $f_n + \Delta f_{\text{дmax}}$, где f_n , соответствующая нулю детекторной характеристики, обеспечивает минимум нелинейных искажений. Частота f_n называется переходной и для детекторов на связанных контурах или дробных равна частоте несущего колебания и резонансной частоте контуров детектора.

Нелинейность детекторной характеристики определяется в диапазоне рабочих девиаций ($f_{\text{д max}} \geq \Delta f_{\text{д}}$);

— коэффициент передачи детектора;

Коэффициент передачи детектора

$$K_{\text{чд}} = U_{\text{вых ст}} / U_{\text{вх}} = U_{\text{вых ст м}} / U_{\text{вх}} \sqrt{2} = S_{\text{чд}} \Delta f_{\text{ст}} / \sqrt{2} U_{\text{вх}}, \quad (5.5)$$

где $U_{\text{вых ст}}$ — выходное напряжение, соответствующее стандартной девиации входного сигнала $\Delta f_{\text{ст}}$; $S_{\text{чд}}$ — крутизна характеристики частотного детектора в линейной области; $U_{\text{вх}}$ — амплитуда напряжения на входе окончного каскада тракта промежуточной частоты (рис. 5.49).

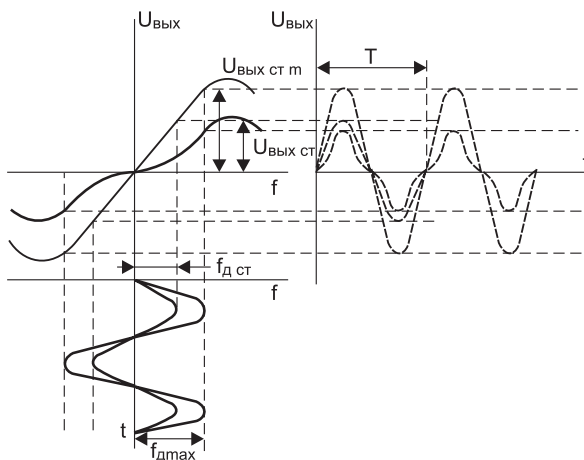


Рис. 5.49

$$S_{\text{д}} = \left| \frac{\partial U_{\text{вых д}}}{\partial f} \right| \approx \frac{\Delta U_{\text{вых 0}}}{\Delta f}. \quad (5.6)$$

Для достаточно малых девиаций $\Delta f_{\text{д}}$ крутизну можно считать величиной постоянной $S \cong \text{const}$.

— коэффициент подавления АМ;

Дифференциальные ЧД подавляют паразитную АМ входного сигнала в различной степени. Эта способность оценивается с помощью характеристики подавления АМ (рис. 5.50), определяющей зависимость остаточного выходного напряжения, от частоты несущей входного амплитудно-модулированного сиг-

нала. Коэффициент подавления АМ оценивает относительное подавление в наихудшей точке в полосе $\pm \Delta f_{\text{д max}}$

$$q_{\text{AM}} = U_{\text{вых ст}} / U_{\text{вых АМ max}} \quad (5.7)$$

или среднее подавления в этой полосе

$$q_{\text{AM}} = U_{\text{вых ст}} / (\sum_{i=1}^n U_{\text{вых АМ i}}) / n,$$

где $U_{\text{вых АМ i}}$ — отсчеты характеристики подавления АМ, взятые через равные частотные интервалы Δf_i ; n — количество отсчетов; $U_{\text{вых ст}}$ — стандартное выходное напряжение ЧМ сигнала. Для высококачественного приема частотно-модулированного сигнала необходимо иметь $q_{\text{AM}} \approx 20\text{--}30$ дБ. Указанное подавление паразитной АМ достигается применением дробного частотного детектора. При использовании других типов схем ЧД или при более высоких требованиях к величине q_{AM} , на входе ЧД устанавливают амплитудный ограничитель;

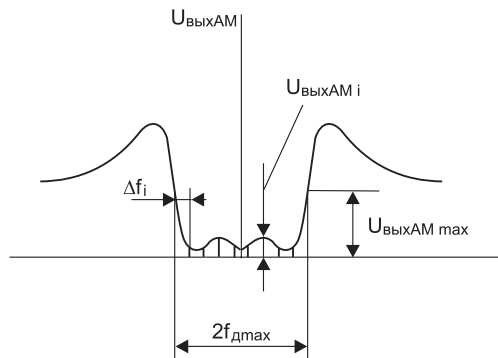


Рис. 5.50

— коэффициент амплитудно-частотных и фазочастотных искажений.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики детектора определяется комплексным сопротивлением нагрузки $Z_{\text{н}}$ и достигает наибольшей величины на верхней частоте модуляции F_{max} (рис. 5.51а).

Фазовые искажения в детекторе оцениваются по нелинейности фазо-частотной характеристики (рис. 5.51б). Поскольку ухо не реагирует на фазовые

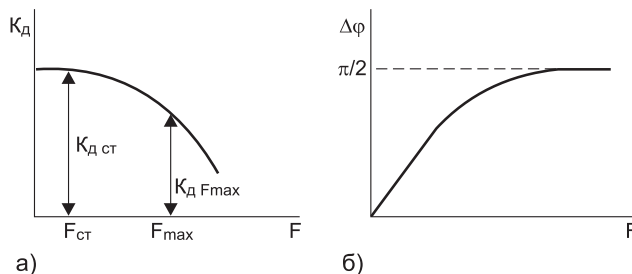


Рис. 5.51

искажения, то для приемников звуковых сигналов фазовые искажения не нормируются.

Исследуемая в лабораторной работе схема (рис. 5.1) дробного частотного детектора обладает рядом достоинств: резонансные контура ЧД настроены на среднюю частоту, равную частоте сигнала; подавление паразитной АМ на 20—30 дБ; низкий уровень нелинейных искажений ($\approx 2\%$). Это позволяет применять их в схемах приемников вплоть до нулевой группы сложности. Некоторое уменьшение напряжения на выходе дробного детектора по сравнению с детектором на связанных контурах практически не влияет на условия работы первого каскада усилителя низкой частоты.

Схема симметричного дробного частотного детектора представлена на рис. 5.52.

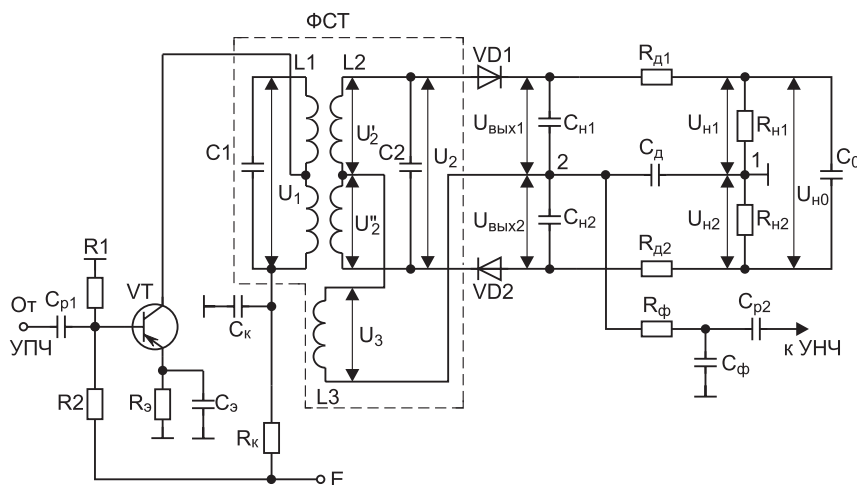


Рис. 5.52

Схема детектора содержит фазосдвигающий трансформатор (ФСТ) с двумя настроенными на частоту сигнала L_1C_1 и L_2C_2 контурами и два АМ детектора на последовательно включенных диодах VD1 и VD2. Выходное напряжение снимается со средней точки делителя напряжения, состоящего из резисторов R_{n1} и R_{n2} , каждый из которых шунтирован конденсатором C_{n1} и C_{n2} . Суммарное напряжение, с каждого плеча нагрузки $U_{n0} = U_{n1} + U_{n2} \approx \text{const}$, из-за конденсатора большой емкости C_0 . Величина емкости такова, что напряжение на нем не успевает реагировать на быстрые изменения амплитуды входного сигнала. Следовательно, выходное напряжение в процессе работы будет меняться как отношение напряжений U_{n1}/U_{n2} , определяемых делителем R_{n1}, R_{n2} . Отсюда название детектора: детектор отношения, дробный детектор.

Малая чувствительность к амплитудной модуляции детектируемого напряжения достигается выбором большой постоянной времени нагрузочной цепи

$$\tau_n = R_n C_n = (R_{n1} + R_{n2}) C_n \geq T_{AM}, \quad (5.8)$$

где T_{AM} — период колебаний огибающей.

Последовательное включение диодов VD1 и VD2 обеспечивает разделение цепей протекания постоянных и переменных токов. Фазосдвигающий трансформатор в ЧД использует понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации $n_3 = \sqrt{L_1/L_3}$, что создает малое сопротивление нагрузки, обеспечивающей эффективное подавление АМ.

Связь между обмотками трансформатора L_1 и L_3 близка к стопроцентной. При этом для частоты сигнала равной резонансной частоте контуров $f_c = f_0$ на L_3 создается напряжение, вектор которого \underline{U}_3 синфазен с вектором \underline{U}_1 . Напряжение на первом контуре \underline{U}_1 создает, совпадающую с ней по фазе, ЭДС \underline{E}_2 на втором контуре, и, вызывающую ток \underline{I}_2 . Создаваемые им напряжения на полуобмотках катушки L_2 , будут равны $\underline{U}'_2 = \underline{U}''_2 = \underline{U}_2/2$ и противофазны. Напряжение \underline{U}_3 на L_3 можно считать опорным для второго контура, относительно которого изменяются фазы между напряжениями на полуобмотках катушки L_2 и на диодах VD 1 и VD 2.

Векторная диаграмма, поясняющая работу детектора для частоты входного сигнала $f_c = f_0$, представлена на рис. 5.53.

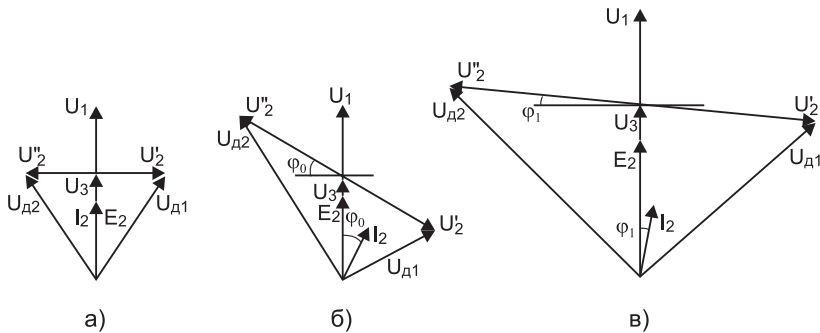


Рис. 5.53

На рис. 5.53 а) вначале откладываем вектор \underline{U}_1 , затем синфазный с ним вектор напряжения \underline{U}_3 , затем вектор наведенной во втором контуре ЭДС $\underline{E}_2 = j\omega M \underline{I}_{L1} = j\omega M \underline{U}_1 / (r_1 + j\omega L_1) \cong M \underline{U}_1 / L_1$, совпадающий по фазе с опорным напряжением \underline{U}_3 . Ток во втором контуре, вызываемый ЭДС $\underline{I}_2 = \underline{E}_2 / (r_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2))$, при резонансе $(\omega L_2 = 1/\omega C_2) \underline{I}_2 = \underline{E}_2 / r_2$ совпадает по фазе с опорным напряжением \underline{U}_3 . Напряжение на втором контуре, равное напряжению $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 / j\omega C_2$ на конденсаторе C_2 , отстает от тока \underline{I}_2 на 90° .

Напряжение \underline{U}'_2 на верхней полуобмотке L_2 , приложенное к VD1, отстает от напряжения \underline{U}_3 на 90° , а на нижней \underline{U}''_2 — опережает на 90° . Сложив векторы напряжений \underline{U}_3 с векторами \underline{U}'_2 и \underline{U}''_2 получим векторы напряжений, приложенных к диоду VD1 $\underline{U}_{d1} = \underline{U}_3 + \underline{U}'_2 = \underline{U}_3 - \underline{U}_2/2$ и диоду VD2 $\underline{U}_{d2} = \underline{U}_3 + \underline{U}''_2 = \underline{U}_3 + \underline{U}_2/2$.

При равенстве напряжений на диодах \underline{U}_{d1} и \underline{U}_{d2} через оба диода протекает единая постоянная составляющая тока I_0 , а напряжение $U_{n0} = I_0(R_{n1} + R_{n2})$. При этом $U_{\text{вых}} = 0$. Увеличение амплитуды входного сигнала приводит к пропорциональному увеличению всех векторов, сохраняя равенство $|\underline{U}_{d1}| = |\underline{U}_{d2}|$, т. е. амплитудная модуляция на выходе детектора отсутствует (5.9, 5.10).

Разделение цепей переменных составляющих каждого тока диода при общем постоянном токе приводит к тому, что при расстройке входного сигнала относительно резонансной частоты, выпрямленные напряжения $U_{н1} \neq U_{н2}$, а значит и углы отсечки тока различны $\theta_1 \neq \theta_2$, при неизменности постоянного тока диодов. Для условия $f > f_0$ (рис. 5.52) большему высокочастотному напряжению ($U_{д1} > U_{д2}$) соответствует большее смещение, и меньший угол отсечки ($\theta_1 < \theta_2$). Отсюда следует, что при изменении частоты входного сигнала изменяются углы отсечки токов диодов. Выпрямленное напряжение определяется напряжениями на конденсаторах $C_{н1}$, $C_{н2}$, C_0

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} - U_{н0}/2, \quad (5.9)$$

$$\text{а } U_{н0} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}}.$$

Отсюда

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}})/2. \quad (5.10)$$

В первом приближении для АД $U_{\text{вых1}} = U_{д1} \cos \theta_1$, $U_{\text{вых2}} = U_{д2} \cos \theta_2$, тогда

$$U_{\text{вых}} = (U_{д2} \cos \theta_2 - U_{д1} \cos \theta_1)/2. \quad (5.11)$$

Как следует из (5.9), выходное напряжение определяется напряжениям на диоде и выпрямленным напряжением $U_{н0}$, зависящим от углов отсечки токов диодов. При достаточно большой величине емкости C_0 , когда скорости заряда и разряда конденсатора C_0 значительно меньше скорости изменения амплитуды сигнала, напряжение $U_{н0} = \text{const}$.

В этом случае не может быть пропорциональности между амплитудой входного сигнала и напряжениями $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$ поскольку их сумма должна оставаться неизменной. Отсюда следует, что чем больше $U_{д1}$ и $U_{д2}$, тем меньше $\cos \theta_1$ и $\cos \theta_2$ и, следовательно, тем больше углы отсечки θ_1 и θ_2 . В тоже время, чем больше θ_1 и θ_2 , тем сильнее в соответствии с (5.12) шунтирующее действие диодных детекторов на колебательные контуры, т. к. входное сопротивление диодных детекторов

$$R_{\text{вх}} = \frac{\pi R_{\text{н}}}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \quad (5.12)$$

При уменьшении амплитуды входного сигнала (при $U_{н0} = \text{const}$) слабее шунтирующее действие диодных детекторов и тем больше $\cos \theta_1$ и $\cos \theta_2$.

Векторная диаграмма, соответствующая случаю $f_c > f_0$ изображена на рис. 5.53б.

Положение векторов напряжений \underline{U}_1 , \underline{U}_3 , \underline{E}_2 аналогично резонансному случаю. Ток, создаваемый \underline{E}_2 , будет отставать вектора ЭДС на угол ϕ_0 , т. к. $\underline{I}_2 = \underline{E}_2 / (r_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2))$, а контур эквивалентен индуктивности. Напряжение \underline{U}_2 на конденсаторе отстает от тока \underline{I}_2 на 90° . Напряжение на верхней полуобмотке катушки L_2 равное $\underline{U}_2/2$ отстает от тока \underline{I}_2 , а напряжение на VD_2 опережает ток \underline{I}_2 на 90° . Складывая вектора \underline{U}_3 и напряжения на индуктивности L_2 , получим векторы напряжений, действующих на диодах VD_1 и VD_2 . Как следует из (5.11), это приводит к появлению выходного напряжения, отличного от нуля. Для относительно быстрых, по сравнению с периодом модулирующей

щих колебаний, изменений амплитуды входного сигнала напряжение на C_0 остается постоянным.

При увеличении амплитуды входного сигнала $U_{вх1} > U_{вх0}$ увеличиваются напряжения на диодах $U_{д1}$ и $U_{д2}$ это приводит к увеличению углов отсечки и к уменьшению входного сопротивления АД (5.12). Падение нагруженной добротности второго контура вызывает уменьшение модулей I_2 , U' , U'' и уменьшению фазового сдвига между ЭДС и током вторичного контура $\phi_1 < \phi_0$ (рис. 5.53 в), что резко уменьшает разницу между напряжениями на диодах VD_1 и VD_2 $(U_{д1} - U_{д2})_1 < (U_{д1} - U_{д2})_0$ и, связанную с ней величину выходного напряжения (5.11). При гармоническом изменении огибающей входного сигнала амплитуда выходного напряжения будет повторять изменение амплитуды входного сигнала с обратной фазой. Это указывает на подавление амплитудной модуляции входного сигнала не только на резонансной частоте, а и на частотах во всей полосе усиления. Эффективное подавление АМ сигнала достигается симметрией схемы детектора. В конструкциях реальных ЧД причиной асимметрии может быть неидентичность половин катушки L_2 , различие параметров диодов и паразитная связь между катушками L_2 и L_3 . Выполняя часть нагрузки детектора в виде двух подстроечных резисторов $R_{д1}$ и $R_{д2}$, не шунтированных конденсаторами, можно увеличить симметричность характеристики детектирования и улучшить подавление амплитудной модуляции. Значение напряжения низкой частоты, обусловленное воздействием на входе ЧД сигнала с паразитной АМ, определяется глубиной АМ сигнала и коэффициентом передачи ЧД по напряжению низкой частоты. Поскольку входное сопротивление ЧД (5.12) зависит от угла отсечки (амплитуды входного сигнала), то при возбуждении детектора генератором тока (малое входное сопротивление детектора) глубина модуляции сигнала на диоде значительно ниже, чем у входного сигнала. Поэтому нагрузкой детектора должно быть малое сопротивление для частоты сигнала и сопротивление по постоянному току должно быть значительно больше сопротивления на частоте модуляции, $R_{н1} > R_{н\text{ АМ}}$. В детекторе отношений это обеспечивается включением входа УНЧ (нагрузки) между точками 1 и 2.

При действии на входе детектора отношений (рис. 5.52) немодулированного сигнала выпрямленный ток $I_{вп}$ протекает через диод VD_1 от контура к нагрузке, а через диод VD_2 — от нагрузки к контуру. Пусть за счет быстрого изменения напряжения на вторичном контуре ток обоих диодов изменился на некоторую величину $\Delta I_{вп}$. При возрастании напряжения на диоде VD_1 приращение тока $\Delta I_{вп}$ совпадает с направлением тока $I_{вп}$. В тоже время напряжение на диоде VD_2 уменьшилось, значит уменьшился выпрямленный ток, что эквивалентно протеканию приращения выпрямленного тока $\Delta I_{вп}$ также от контура к нагрузке.

По переменному току резисторы $R_{н1}$ и $R_{н2}$ включены параллельно, т. к. конденсатор C_0 представляет собой короткое замыкание для токов низкой частоты и нагрузкой каждого детектора АМ является сумма $R_{н1} + R_{вх\text{ унч}}$. Падение напряжения на этой нагрузке при протекании тока $2\Delta I_{вп}$

$$U_n = 2\Delta I_{вп} (R_{вх\text{ унч}} + R_{н1}/2) = \Delta I_{вп} (2R_{вх\text{ унч}} + R_{н1}) \quad (5.13)$$

Уравнение (5.13) позволяет построить эквивалентную схему детектора отношений для токов низкой частоты (рис. 5.54).

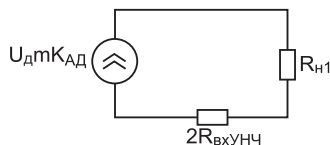


Рис. 5.54

Напряжение низкой частоты на нагрузке ($R_{\text{вх унч}}$) будет равно

$$U_{\text{вх унч}} = U_d K_{\text{АД}} m 2R_{\text{вх унч}} / (2R_{\text{вх унч}} + R_{\text{н1}}), \quad (5.14)$$

где U_d — напряжение на входе амплитудного детектора; $K_{\text{АД}}$ — коэффициент передачи амплитудного детектора по низкой частоте; m — глубина амплитудной модуляции преобразованного входного ЧМ сигнала. Для входного сигнала, обладающего девиацией Δf_c , определяемой обобщенной относительной расстройкой $\xi = \Delta f_c Q_n / Q_0$, значение глубины амплитудной модуляции

$$m = \frac{(\sqrt{1 + (\xi + \psi)^2} - \sqrt{1 + (\xi - \psi)^2})\sqrt{1 + \psi^2}}{2\sqrt{1 + \psi^2 - \xi^2} + 4\xi^2} \quad (5.15)$$

где Q_n — нагруженная добротность колебательного контура; Q_0 — ненагруженная добротность, без учета влияния на контур подключенных элементов; ψ — параметр связи.

Формула (5.15) определяет изменение амплитуды напряжения на диодах, которое в общем случае зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала, но вследствие противофазности изменения напряжения на диодах, реакции диодов на контур будут компенсироваться. Это позволяет определять глубину модуляции преобразованного напряжения по формуле (5.15), без учета свойств источника сигнала.

При этом сопротивление нагрузки детектора по постоянному току будет меньше сопротивления нагрузки по току низкой частоты.

Напряжения на первом и втором контурах полосового фильтра определяются соотношениями:

$$U_1 = U_{\text{вх}} m_k \frac{|Y_{21}|}{(g_k + g_{\text{вх}}/2)(1 + \psi^2)}, \quad (5.16)$$

$$U_2 = U_{\text{вх}} m_k \frac{|Y_{21}|}{(g_k + g_{\text{вх}}/2)(1 + \psi^2)}, \quad (5.17)$$

где ψ — параметр связи; m_k — отношение напряжения на коллекторе к напряжению на первом контуре.

Для оптимально реализованного фазосдвигающего трансформатора $L_3 = L_1 k_{\text{св}}^2 / 4$, $U_3 = U_1 / 2$, а напряжение на диоде U_d — геометрическая сумма напряжений U_3 и $U_1 / 2$, тогда из уравнений (15), (16) имеем

$$U_d = U_{\text{вх}} m_k \frac{|Y_{21}|}{(2g_k + g_{\text{вх}})(1 + \psi^2)}, \quad (5.18)$$

откуда значение амплитуды напряжения на входе оконечного каскада УПЧ

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_d (2g_k + g_{\text{вх}}) \sqrt{1 + \psi^2}}{m_k |Y_{21}|}, \quad (5.19)$$

Определяя коэффициент передачи частотного детектора как отношение напряжения на входе каскада УНЧ (5.14) к напряжению на входе оконечного каскада УПЧ (18) с учетом (5.17) получим

$$K_{\text{чд}} = \frac{2K_{\text{АД}} |Y_{21}| m_k R_{\text{вх ун}} m}{(2g_k + g_{\text{вх}})(2R_{\text{вх уп}} + R_1) \sqrt{1 + \psi^2}}, \quad (5.20)$$

где g_k — активная составляющая проводимости ненагруженного колебательного контура, а $g_{\text{вх}}$ — активная составляющая входной проводимости ЧД.

Значение коэффициента передачи частотного детектора увеличивается (5.19) с ростом входного сопротивления УНЧ. Максимальное значение коэффициента передачи ЧД совпадает с оптимальным режимом работы для детектора АМ сигнала. При этом для малых амплитуд входного воздействия ВАХ детектора АМ можно считать экспоненциальной $i = i_0(\exp(\gamma u_d) - 1)$. В этом случае коэффициент передачи детектора АМ на низкой частоте определяется соотношением

$$K_{\text{АД}} = \frac{J_1(B_c)}{J_0(B_c)} / (1 + v/(A + B_c K_d)), \quad (5.21)$$

где $A = \gamma i_0 R_1$, $B_c = 1,41 \gamma u_d$, K_d — коэффициент передачи АД по постоянному току, J_0 , J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков, v — отношение сопротивления нагрузки детектора по постоянному току к сопротивлению нагрузки по переменному току

$$v = R_1 / (2R_{\text{вх унч}} + R_1).$$

Для известной величины $R_{\text{вх унч}}$, определяемой из условия минимума шумов или согласования по рис. П.1 определяем входное сопротивление амплитудного детектора $R_{\text{вх}} = 1/g_{\text{вх}}$ и коэффициент передачи АД по постоянному току K_d .

7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Нарисуйте принципиальную схему дробного ЧД.

7.2. Нарисуйте принципиальную схему ЧД на связанных контурах. Объясните различие схем.

7.3. Нарисуйте структурную схему ЧД и объясните принцип работы.

7.4. Чем отличаются по принципу обработки сигнала ЧД на расстроенных и ЧД на связанных контурах?

7.5. Для чего необходима катушка связи в дробном ЧД?

7.6. Почему исследуемый детектор называется дробным? Подтвердите соотношением напряжений, действующих в схеме.

7.7. Каково назначение конденсатора Сб в принципиальной схеме дробного (рис. 5.1) ЧД?

7.8. Какой вид имеет векторная диаграмма дробного ЧД?

7.9. От чего зависит степень подавления паразитной АМ в дробном ЧД?

7.10. Каково соотношение резонансных частот контуров в УПЧ и ЧД? К чему приводит их различие?

8 ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоприемные устройства / Под ред. Н. Н. Фомина. М.: РиС, 2003. 512 с.

2. Разевиг В. Д. Система схемотехнического проектирования Micro-CAP V. М.: СОЛОН, 1997. 273 с.

3. Справочник по учебному проектированию приемно-усилительных устройств / М. К. Белкин, В. Т. Белинский и др. / под ред. М. К. Белкина. Киев: «Вища школа», 1988. 447 с.

4. Проектирование радиоприемных устройств / С. М. Клич, А. С. Кривенко и др. / под ред. А. П. Сиверса. М.: СР, 1976. 486 с.

5. <http://WWW.spectrum-soft.com/demoform.shtm> (адрес в Internet для получения студенческой версии ССМ МС).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Характеристика германиевого точечного диода, аппроксимированная экспонентой $i = i_0(\exp(\gamma u_d) - 1)$ содержит коэффициенты, определяемые примерно как: $i_0 = 3 \text{ мкА}$, $\gamma = 29 \text{ 1/В}$.

Входное сопротивление усилителя низкой частоты $R_{\text{вх унч}}$ выбираем равным 5 кОм, в соответствии с рис. П.1.

Амплитуду напряжения на диодах принимаем равной 200 мВ, а раствор детекторной характеристики $2\Pi = 450 \text{ кГц}$, для частоты входного сигнала равной промежуточной частоте и резонансной частоте контуров $f_0 = 10,7 \text{ МГц}$.

Затухание ненагруженных колебательных контуров $d_{\text{э0}} = 1/Q_0$ выбираем равным 0,01 ($Q_0 = 100$), а параметр связи $\psi = 2$.

Затухание нагруженных колебательных контуров определяется соотношением

$$d_{\text{э}} = 3\Pi/f_0\psi = 1/Q_{\text{э}}.$$

Для известных значений параметров колебательных систем и рабочей частоты определяем значение конструктивной емкости колебательных контуров

$$C_k = 1/2\pi f_0 d_{\text{э}} d_{\text{э0}} (Q_{\text{э0}} - Q_0).$$

Эквивалентная емкость контуров, включающая в себя также емкость монтажа и емкость диода, определяется:

$$C_{кз} = C_k + C_m + C_d/2,$$

где $C_m = 5\text{--}10$ пФ, а значение емкости диода C_d определяется из справочника.

Индуктивность колебательных контуров определяется соотношением

$$L_k = 1/(2\pi f_0)^2 C_{кз}.$$

Значение вспомогательной индуктивности L_3 определяется при условии обеспечения максимальной конструктивно достижимой величине связи между катушками L_1 и L_3 ($k_{св} = 0,99$) и, коэффициента трансформации, выбираемого в пределах $n_3 = 3,5\text{--}4,5$, для приемников первой и высшей группы сложности.

Значение коэффициента передачи ЧД определяется по формуле (5.20) для выбранной аппроксимации ВАХ диода и соотношения (5.21).

Нормированные значения коэффициента передачи по постоянному току и входного сопротивления АД [4] от уровня входного сигнала приведены на рис. П.1.

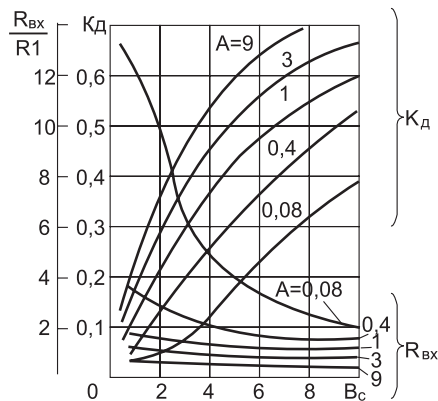


Рис. П. 5.1.