

# **Лабораторная работа № 1 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 в среде Micro-Cap, изучение технических особенностей настройки и эксплуатации и определение его основных технических характеристик с использованием системы схемотехнического моделирования Micro-Cap.

## **2. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

### **2.1. Расчетная часть**

Используя сведения о величине элементов принципиальной схемы (рис. 1.1), 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 оконечный каскад усилителя промежуточной частоты получить:

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

2.2.2. Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) на входных 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 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 ЧД**

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 на-

пряжений создает на нагрузке каждого из диодных амплитудных детекторов различные по величине напряжения низкой частоты, определяющие результирующее напряжение.

Принципиальная схема ЧД (рис. 1.1) содержит усилительный каскад, нагрузкой которого является линейная цепь, состоящая из двух индуктивно связанных контуров первичного  $L1C3$  и вторичного  $(L2+L3)C4$ , настроенных на среднюю (несущую) частоту сигнала 10,7 МГц, и катушка связи  $L4$ . В качестве активного элемента усилителя используется транзистор 2Т363В с проводимостью ррп-типа, включенный по схеме с общим эмиттером.

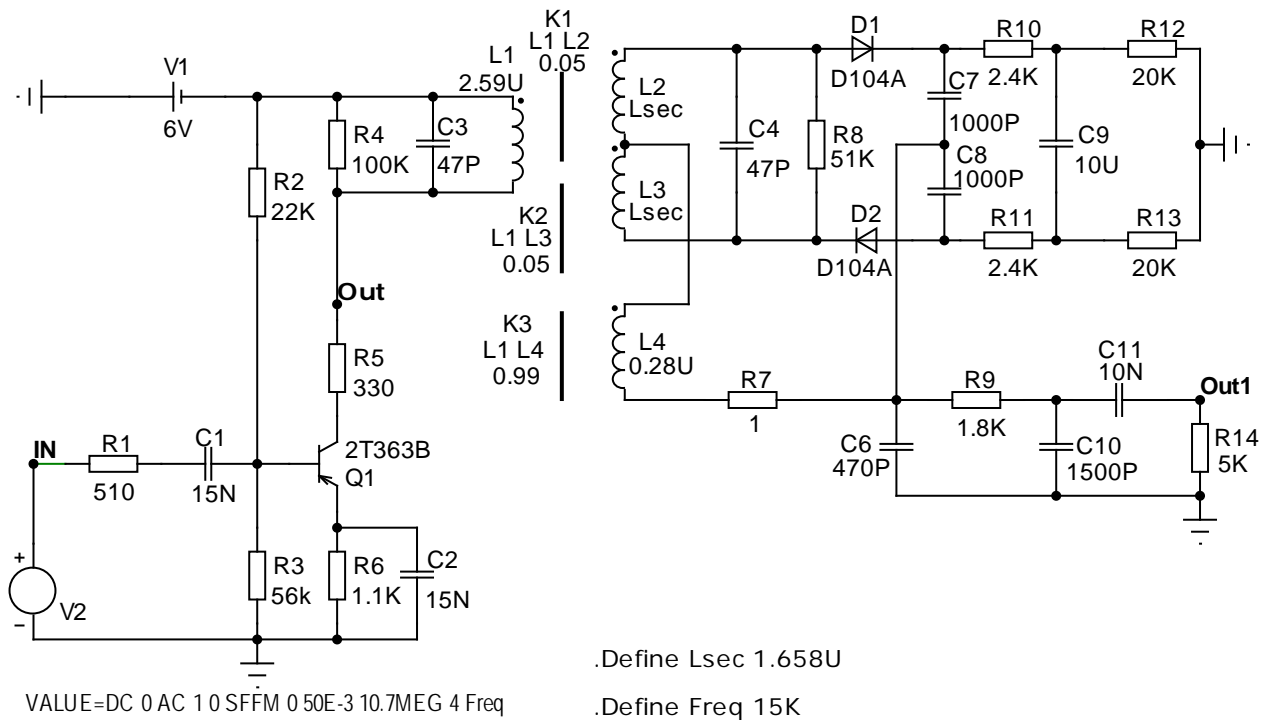


Рис. 1.1. Принципиальная схема дробного детектора

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 каскада, 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 R6. Шунтирование его конденсатором C2 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 R5 в коллекторной, а R6 — в эмиттерной цепи обеспечивают выбранный режим работы транзистора по постоянному току: R5 — в основном напряжение коллектор-эмиттер  $U_{кэ0}$ , а R6 — постоянный ток коллектора  $I_{к0}$ .

Источником питания служит батарея V1 с напряжением 6 В.

Первичный колебательный контур L1C3, включенный в коллекторную цепь, шунтирован резистором R4, вторичный (L2+L3)C4 — резистором R8, 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 C7 и R10, R12 для детектора на диоде D1 и C8 вместе с резисторами R11, R13 для второго диодного детектора на диоде D2. Конденсатор C9 служит для устранения влияния паразитной амплитудной модуляции входного сигнала на процесс детектирования ЧМ сигнала. Нагрузкой детектора ЧМ сигнала является резистор R14, моделирующий входное сопротивление каскада усилителя низкой частоты (УНЧ). На входе УНЧ включен П-образный фильтр C6, R9, C10 и разделительный конденсатор C11.

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

## **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 10,7 МГц и частоты модуляции (модулирующей синусоиды) 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. Элементы электрической принципиальной схемы описываются с помощью встроенных математических моделей компонентов, которые не могут быть изменены пользователями, можно изменять лишь значения их параметров.

Предполагается, что:

- студенты знакомы с основами операционной системы WINDOWS
- имеют доступ к сети INTERNET и в состоянии по указанному в п. 8 описания адресу получить инсталляционные файлы демонстрационной (студенческой) версии программы Micro-Cap или приобрести эту программу на CDR (DVD) дисках.

Демонстрационная версия содержится в ZIP-файле demo.zip (ее можно раскрыть программами-архиваторами PKUNZIP, WINRAR). Запуск инсталлятора программы осуществляется запуском исполнимого файла SETUP.EXE. После завершения установки формируется папка MC10Demo, содержащая все необходимые компоненты для работы демо-версии, а также каталог демонстрационных примеров DATA. В подкаталог MC10demo\library заносятся файлы макромоделей, имеющие расширение .MAC, и библиотеки математически моделей компонентов в файлах с расширением .LBR и .LIB.

После установки и запуска программы mc10demo.exe в верхней части экрана монитора появляется окно главного меню с панелью инструментов (рис. 1.2).

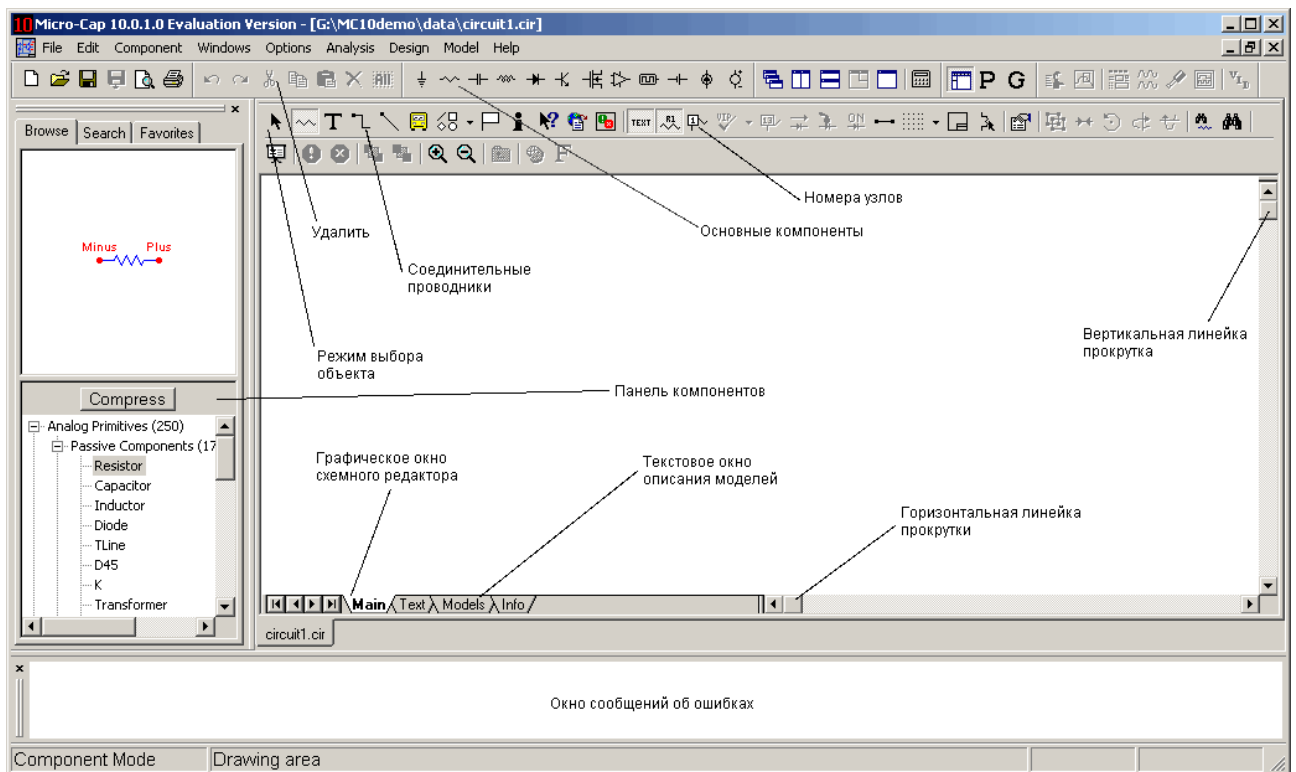


Рис. 1.2 Главное окно программы

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 Micro-Cap (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. 1.2), активируются левой кнопкой (например, резистор) мыши и затем помешаются в выбранном месте главного окна при повторном нажатии на левую кнопку. Удерживая нажатой левую кнопку, можно вращать компонент, щелкая правой. При отпуске левой кнопки местоположение компонента фиксируется и на открывающемся окне задания атрибутов компонента (в данном случае *Resistor*) предлагается присвоить ему позиционное обозначение (PART), указать его величину (VALUE), а также 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. 1.3). При вводе значения параметров допускается использование масштабных коэффициентов:

|           |        |        |           |           |           |            |            |
|-----------|--------|--------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Значение  | $10^6$ | $10^3$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ | $10^{-15}$ |
| Префикс   | MEG    | K      | M         | U         | N         | P          | F          |
| Exp форма | 1E+6   | 1E+3   | 1E-3      | 1E-6      | 1E-9      | 1E-12      | 1E-15      |

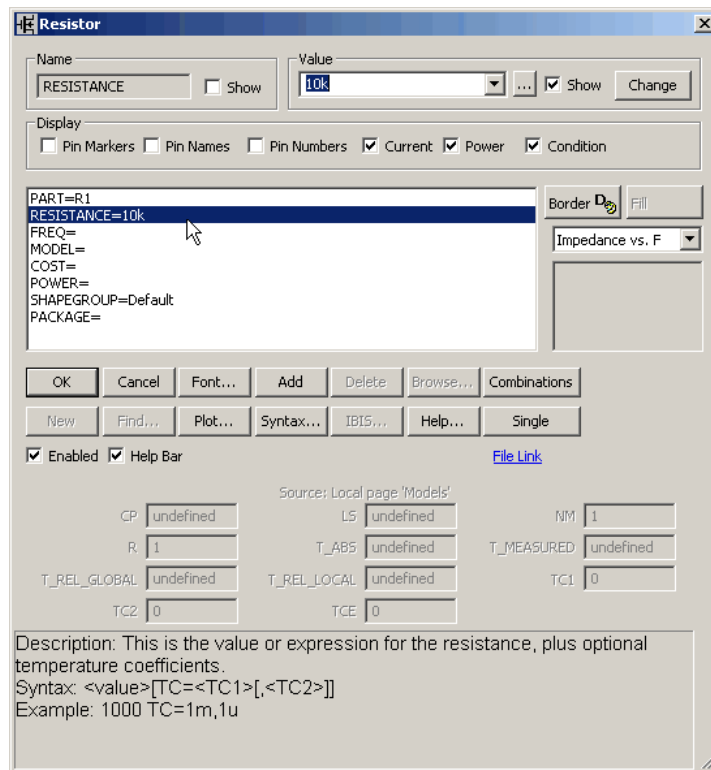


Рис. 1.3. Окно атрибутов резистора

Масштабный коэффициент может содержать и другие дополнительные символы, которые программа игнорирует. То есть величина емкости в 5 пФ может быть введена: 5PF или 5P, или 5E-12 (Обратите внимание на то, что пробел между последней значащей цифрой числа и масштабным префиксом не нужен).

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

Альтернативным вариантом ввода параметров компонентов является использование директив определения переменных, когда на принципиальной схеме какому-либо резистору задается в качестве параметра не значение его сопротивления, (например 50 Ом), а вводится символьная переменная (например, R2) в позиции *Resistance* окна атрибутов и затем с помощью текстовой директивы *.DEFINE* задается значение этой переменной (сопротивления) в следующем виде:

```
.DEFINE R2 50
```

Эта директива вводится в текстовом режиме меню инструментов (горячая клавиша <ctrl><T> или кнопка панели инструментов **T**).

В панели *Display* окна задания атрибутов компонента (рис. 1.3) выключателями задаются условия отображения в окне схем компонента: с помеченными выводами (*Pin Markers*), названием выводов (*Pin Names*) или пронумерованными выводами (*Pin Numbers*). Мы ограничимся лишь установленным по умолчанию выводом на экран токов (*Currents*), значением мощностей (*Powers*) и состояний приборов (*Conditions*).

Поочередно активизируя в левом высвеченном окне строку *Part* — позиционное обозначение компонента; *Resistance* — величина вводимого резистора, подтверждается предложенный вариант, переходя на следующую строку, или

определяется новое значение соответствующего параметра. Строки *FREQ*, определяющие частотную зависимость сопротивления резистора; *MODEL* — модель применяемого резистора; *COST* — его стоимость; *POWER* — рассеиваемую на нем мощность, 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 являются важными тепловые характеристики компонентов и их стоимость.

Активные кнопки внизу окна задания атрибутов резистора *Resistor* позволяют при нажатии:

*OK* — 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* — вызвать 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 окно в режим с динамической подсказкой *Help Bar* (он показан на рис. 1.3). Дает краткое описание синтаксиса ввода параметров окна и командных кнопок.

При необходимости коррекции отдельных элементов принципиальной схемы часто бывает необходимо его удалить. Для этого вначале активизируют режим редактирования элементов и компонентов схемы *Select Mode* (режим выбора объекта , рис. 1.2).

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* и удаляют необходимый компонент схемы (можно просто нажать *DEL* на ДК). 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. 1.2).

Аналогично вводятся конденсаторы. На панели инструментов главного окна активизируется пиктограмма конденсатора и на выпадающем окне задания атрибутов компонента *Capacitor* задаются параметры конденсатора.

Соединительные линии между компонентами прочерчивают, выбрав на панели инструментов главного окна пиктограмму ортогональных соединительных проводников  (рис. 1.2). Следует установить курсор в начале будущей линии и нажать левую кнопку мыши. Затем удерживая кнопку в нажатом положении, проводят линию до вывода очередного компонента или местом соединения с другой линией (проводником).

Катушки индуктивности первичного (*L1*), вторичного (*L2*, *L3*) контуров и катушка связи (*L4*) ФСТ вводится нажатием на левую кнопку мыши при поме-

щении курсора на пиктограмму индуктивности панели инструментов меню главного окна (рис. 1.2). На выпадающем окне задания атрибутов (рис. 1.4) Inductor указывают параметры катушек индуктивности. Перечень параметров и их описание аналогичны использовавшимся ранее в окне атрибутов 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 (–) обмотки. Вращением с помощью правой кнопки мыши устанавливают катушку индуктивности в нужное положение.

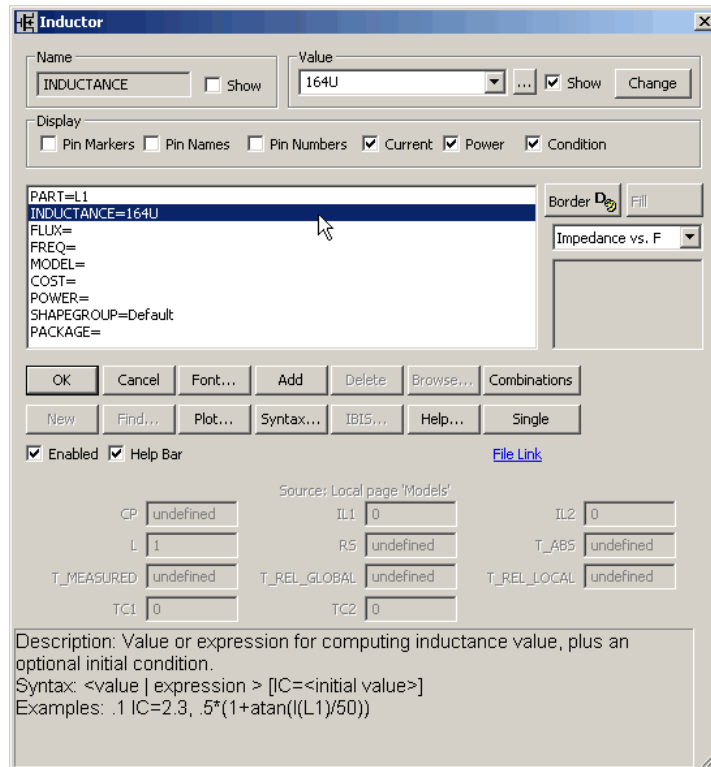


Рис. 1.4. Окно атрибутов катушки индуктивности

Магнитная связь между катушками ФСТ задается с помощью модели трансформатора. Исследование свойств ЧД проводится с использованием модели трансформатора без сердечника (что эквивалентно трансформатору с линейным сердечником). Для установки трансформатора в принципиальную схему используют команду *COMPONENT* главного меню программы с последующим выбором на выпадающих вправо иерархических подменю последовательно: *Analog Primitives>Passive Components>K* (рис. 1.5).

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 (для наглядности целесообразно размещать символ трансформатора вблизи реально организованной магнитной связи между катушками). На выпадающем окне задания атрибутов компонента (рис. 1.6) большинство позиций аналогичны позициям окон атрибутов для вводимых резисторов и конденсаторов. Оригинальные строки окна атрибутов для магнитного сердечника K: перечень индуктивностей (L1, L4), обладающих магнитной связью (INDUCTORS) и



величина коэффициента связи (COUPLING). Значение коэффициента связи (COUPLING) для катушек L1 и L2, а также L1 и L3 задается равной 0,05, а для L1 и L4 — 0,99. Строка MODEL не заполняется — это соответствует линейному сердечнику или воздушному трансформатору. Применение сердечника требует ввода его параметров (геометрических размеров, материала с параметрами модели Джилса-Атертона и др.) или выбора из предлагаемого в правой колонке, списка типовых конструкций трансформаторов.

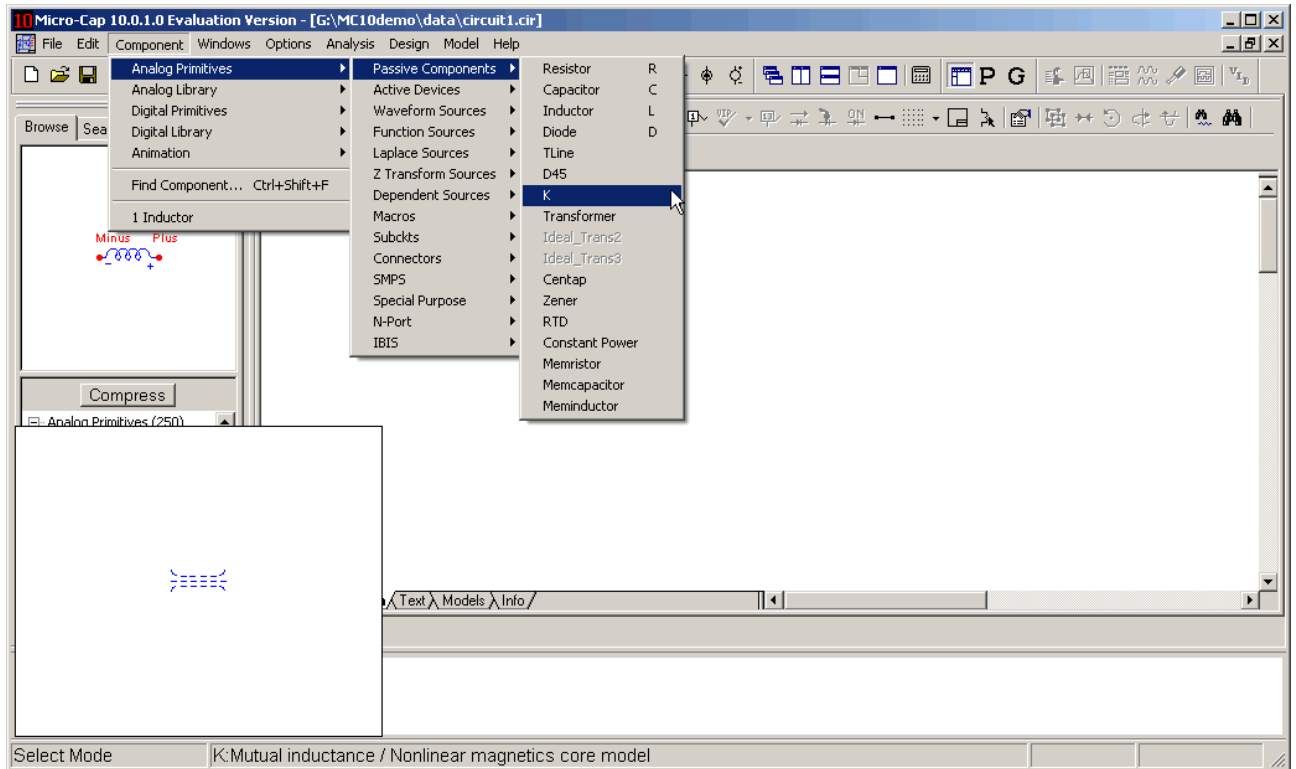


Рис. 1.5. Задание элемента магнитной связи (трансформатора)

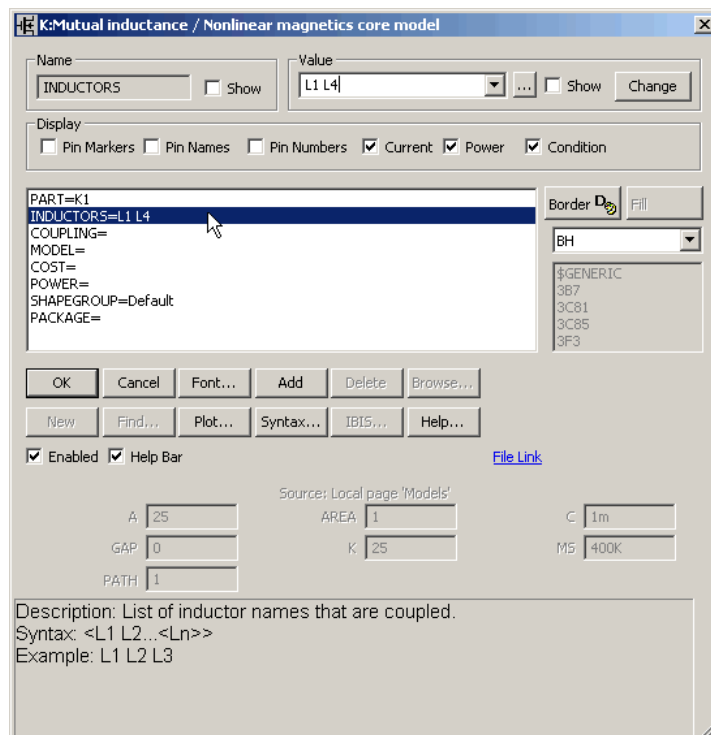


Рис. 1.6. Задание магнитосвязанных индуктивностей трансформатора



При вводе транзистора типа PNP, которого нет в списке основных компонентов окна схем, необходимо сначала выполнить команду *COMPONENT* в меню главного окна и на дополнительном иерархическом подменю, разворачиваемом вправо, выбрать *Analog Primitives*, а из предлагаемого перечня устройств выбрать *Active Devices*, а затем, на закладке активных компонентов, *PNP* (рис. 1.7).

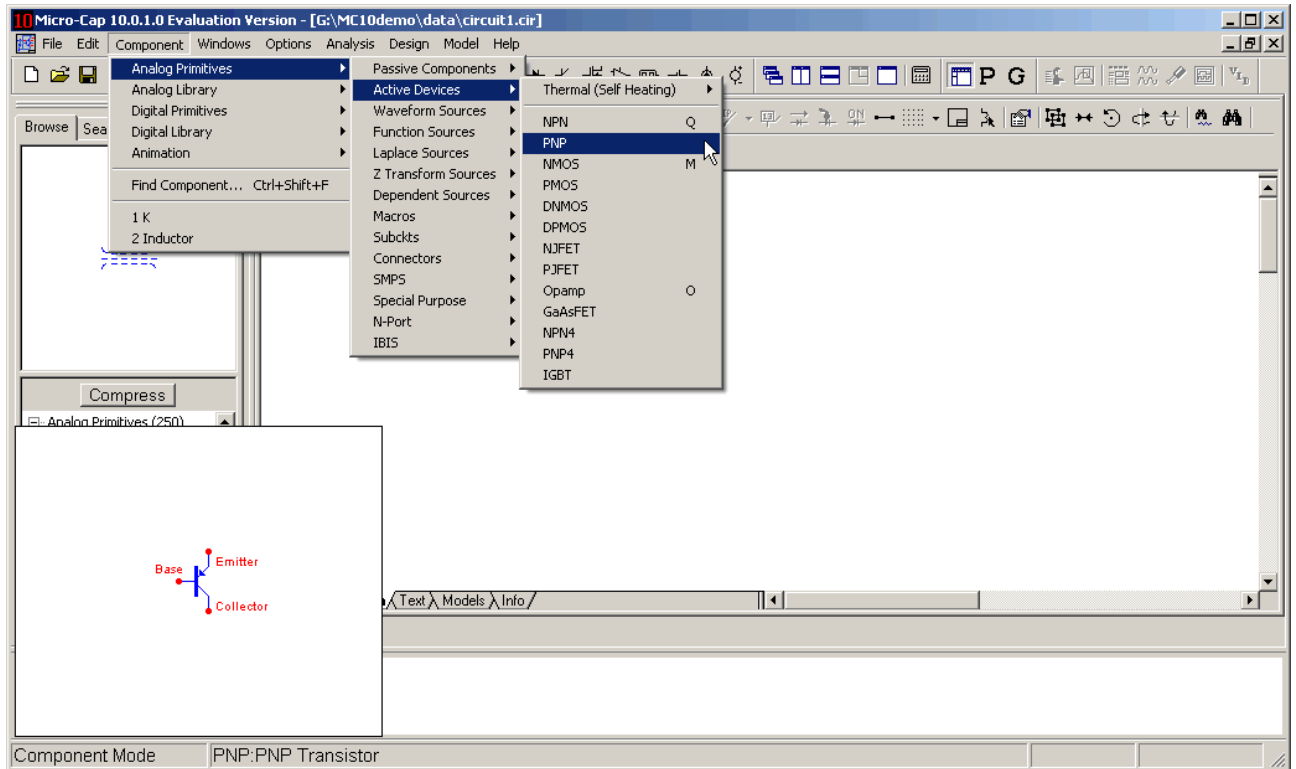


Рис. 1.7. Выбор pnp-транзистора из меню компонентов

В дальнейшем, при повторном вводе транзистора такого типа, выполняемая команда *Component* уже содержит данный тип транзистора в нижней части выпадающего меню и достаточно лишь активизировать в нем соответствующую строку.

При нажатии на левую кнопку мыши на ниспадающем меню (рис. 1.8) *PNP Transistor* выбирается позиционное обозначение (PART), начинающееся по умолчанию с буквы Q, затем его характеристика VALUE, определяющая количество параллельно включенных одинаковых транзисторов или площадь структуры, и официальное название транзистора с соответствующим именем модели MODEL. Активизацией строки в правой колонке меню можно выбрать тип транзистора из предложенного перечня.

Поскольку в библиотеке Micro-Cap, представленной в колонке справа, нет отечественных транзисторов, то необходимо ввести параметры модели транзистора 2Т363В. Для этого, после ввода позиционного обозначения транзистора (PART), (в позицию VALUE можно ничего не вводить), выбирается строка MODEL (рис. 1.8) и нажатием на кнопку NEW задается переход в режим ввода параметров новой модели транзистора.

В строке MODEL появляется надпись New Model 1. что дублируется подсвеченной строкой в верхнем окне Value. Находящийся там курсор позволяет ввести название нового типа транзистора. После ввода названия транзистора

(2T363B) можно приступить к редакции параметров его модели (в Micro-Cap используется модель биполярного транзистора Гуммеля–Пуна), представленной таблицей параметров IS, BF, NT и т. д. в нижней части окна атрибутов. Для этого курсор левой кнопкой мыши помещается в нужную позицию таблицы (рис. 1.8) и в нее вписывается необходимое значение:

IS=11.8F BF=156.2 VAF=95.7 IKF=.195 ISE=1.83P NE=1.971 BR=1.18  
VAR=65 IKR=.3 ISC=1P NC=2 RB=67.5 RC=1.6 CJE=1.112P VJE=.71  
MJE=.35 CJC=2.958P VJC=.69 MJC=.33 FC=.5 TF=41.32P XTF=2 VTF=10  
ITF=.12 TR=6.149N EG=1.11 XTB=1.5 XTI=3

The screenshot shows the 'PNP:PNP Transistor' dialog box. At the top, the 'Name' field is set to 'MODEL' and the 'Value' field is set to '2T363B'. Below this, there are checkboxes for 'Display' options: 'Pin Markers', 'Pin Names', 'Pin Numbers', 'Current', 'Power', and 'Condition'. A list of parameters is shown on the left, including 'PART=Q1', 'VALUE=', 'MODEL=2T363B', 'COST=', 'POWER=', and 'SHAPEGROUP=Default'. On the right, there are buttons for 'Border', 'Fill', and 'D'. Below these are buttons for 'OK', 'Cancel', 'Font...', 'Add', 'Delete', 'Browse...', 'New', 'Find...', 'Plot...', 'Syntax...', 'IBIS...', and 'Help...'. At the bottom, there are checkboxes for 'Enabled' and 'Help Bar', and a 'File Link' button. The main area contains a grid of parameters to be edited, with columns for 'LEVEL', 'Parameter Name', and 'Value'. The parameters are organized into three columns, with the first column containing parameters like LEVEL, BR, CJS, GAMMA, IRB, ISE, KF, MJS, NF, NS, QUASIMOD, RC, T\_ABS, T\_REL\_LOCAL, TRB1, TRC2, TRM1, VAR, VJE, VTF, and the second column containing parameters like AF, CJC, EG, IKF, IS, ISS, MJC, NC, NK, PTF, RB, RCO, T\_MEASURED, TF, TRB2, TRE1, TRM2, VG, VJS, XCJC, and the third column containing parameters like BF, CJE, FC, IKR, ISC, ITF, MJE, NE, NR, QCO, RBM, RE, TR, TRC1, TRE2, VAF, VJC, VO, and XTB. The values are entered as specified in the text above.

Рис. 1.8. Окно атрибутов биполярного транзистора

Следует отметить, что после ввода всех параметров и закрытия окна атрибутов кнопкой *OK*, на текстовой странице MODEL (рис. 1.11) появится соответствующая модельная директива:

.MODEL 2T363B PNP (IS=11.8F BF=156.2 VAF=95.7 IKF=.195 ISE=1.83P  
NE=1.971 BR=1.18 VAR=65 IKR=.3 ISC=1P NC=2 RB=67.5 RC=1.6  
CJE=1.112P VJE=.71 MJE=.35 CJC=2.958P VJC=.69 MJC=.33 FC=.5 TF=41.32P  
XTF=2 VTF=10 ITF=.12 TR=6.149N EG=1.11 XTB=1.5 XTI=3)

Смысл обозначений и способы определения указанных параметров можно

выяснить в [5, 6].

Сведения о параметрах модели транзистора также можно ввести, непосредственно вводя вышеприведенную модельную директиву в текстовую страницу MODEL (рис. 1.9).

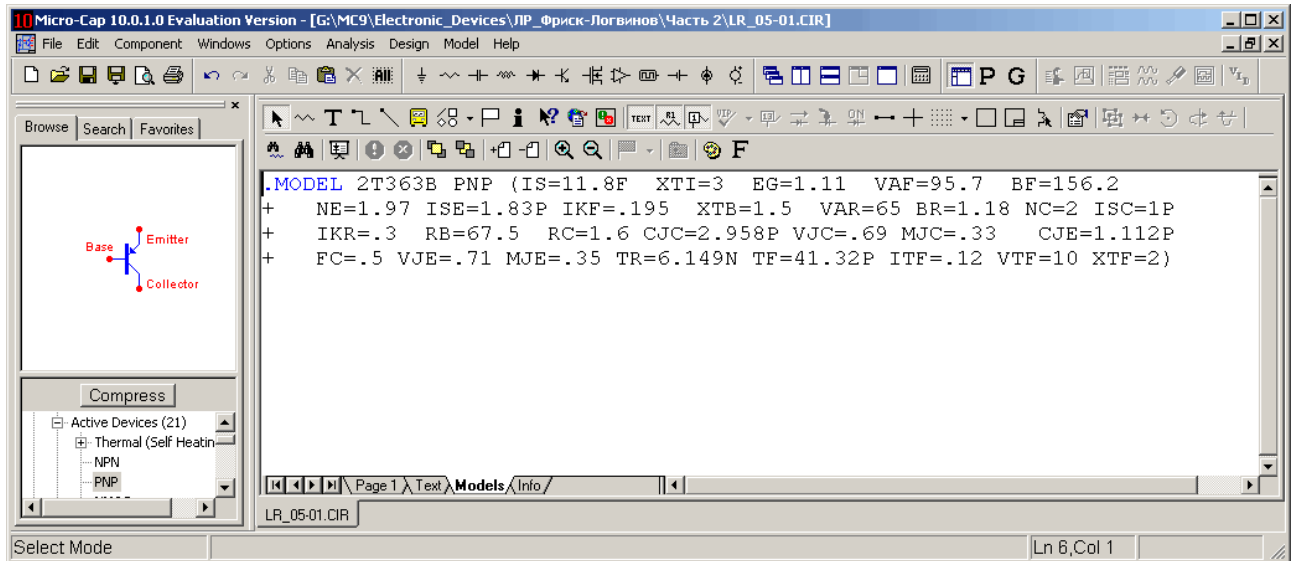


Рис. 1.9. Вид модельной директивы транзистора в текстовой странице Model

Отсутствующие некоторые параметры в текстовых строках директивы .MODEL по сравнению с рис. 1.8 принимаются по умолчанию и могут не вводиться.

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, в открывшемся окне атрибутов *Diode* вводим параметры модели диода (рис. 1.10). Поскольку в библиотеке Micro-Cap, представленных в колонке справа, нет отечественных элементов, нажатием на кнопку *New* при подсвеченной строке *Model*, активизируем режим редактирования параметров. Появление в панели *Value* надписи *New Model* (как и в строке MODEL) позволяет ввести тип диода Д104А (на самом деле вводится D104A), а помещение курсора в таблицу параметров диода в нижней части окна атрибутов — заменить параметры, приведенные в окне, на требуемые (используя упрощенную модель диода LEVEL 1): IS=5.812E-12 N=1.15 RS=8.1 CJO=41.2p TT=8.28E-9 M=0.33 VJ=0.71 FC=0.5 BV=400 IBV=1E-11

Аналогично тому, как это происходило и для транзистора после ввода параметров и закрытия окна атрибутов кнопкой ОК в текстовом окне MODEL появится директива модели диода с заданными параметрами:

```
.MODEL D104A D (BV=400 CJO=41.2p IBV=1E-11 IS=5.812E-12 M=0.33 N=1.15 RS=8.1 TT=8.28E-9 VJ=0.71)
```

Остальные параметры диода принимаются по умолчанию. Описание диода совокупностью параметров позволяет, используя возможности Micro-Cap, получить вольт-амперную характеристику (ВАХ) диода (прямую и обратную ветвь). Для получения, например, прямой ветви необходимо нажать кнопку расширения на строке над библиотекой диодов и выбрать *If vs. Vf* (ток прямой

ветви в зависимости от прямого напряжения). Аналогично можно получить обратную ветвь ВАХ диода, выбрав  $I_r$  vs.  $V_r$ , и затем, нажав кнопку *Plot*, заставить программу построить график в отдельном окне (рис. 1.10).

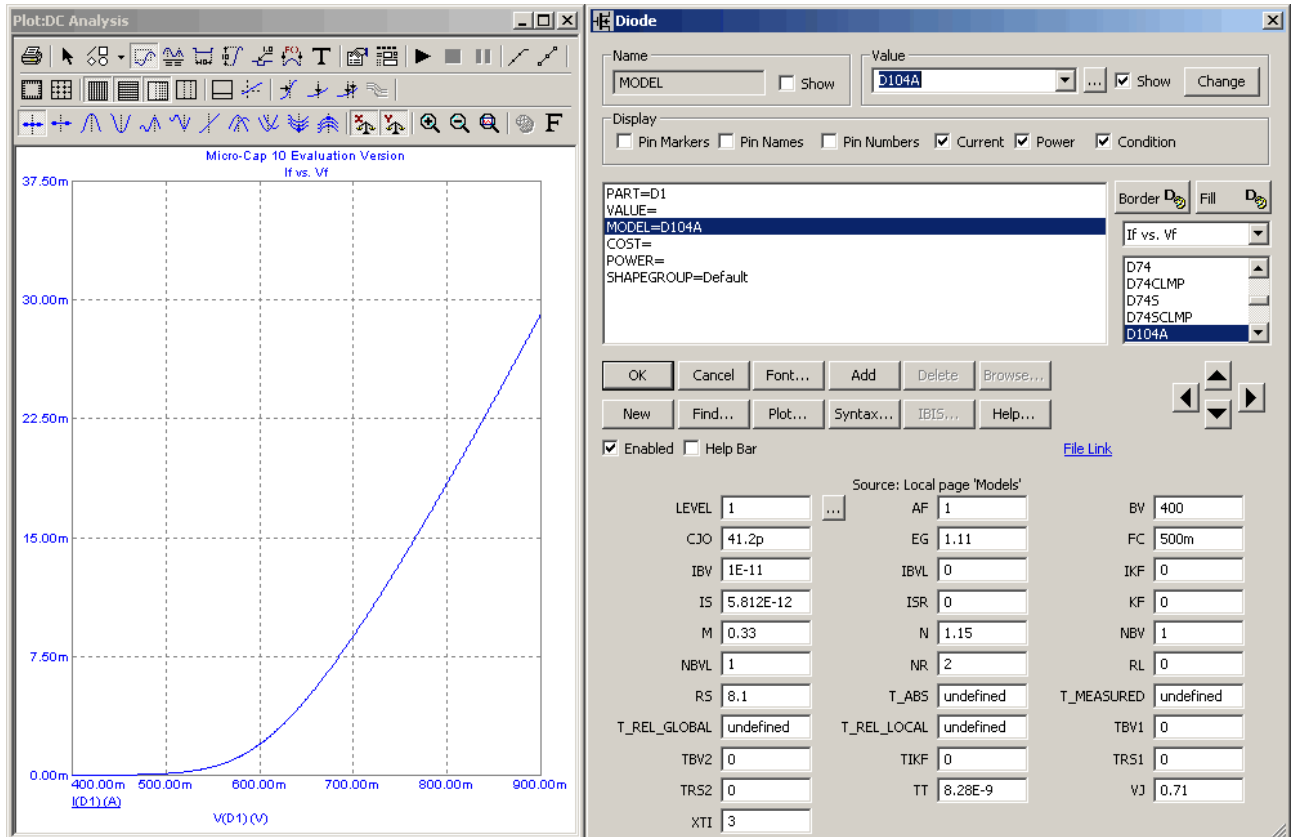


Рис. 1.10. Окно атрибутов диода с построенной прямой ветвью ВАХ

Завершив ввод активных и пассивных компонентов принципиальной схемы, следует проверить их на соответствие со схемой на рис. 1.1. При необходимости производится коррекция элементов схемы.

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 в данном случае (при анализе частотных характеристик) можно ограничиться моделью генератора гармонических колебаний без какой-либо модуляции то, выбрав команду *Component* меню главного окна необходимо последовательно выбрать на выдвигающихся вправо подменю: *Analog Primitive>Waveform Sources>Sine Source* (рис. 1.11). Появляющееся изображение модели генератора и окно атрибутов источника *Sine Source* позволяет задать его параметры (рис. 1.12).

Окно атрибутов *Sine Source* построено по традиционной форме, знакомой нам ранее из ввода резисторов, конденсаторов, диодов и пр., поэтому назначение кнопок, пиктограмм и таблицы параметров известно.

Параметры генератора (частота, амплитуда и др.) при проведении первоначально лишь частотного анализа значения не имеют, однако продемонстри-

руем как их можно задать нужным образом при необходимости.

Ввод начинают с выбора названия (позиционного обозначения) компонента (PART), возьмем, например, V2, вместо предложенного.

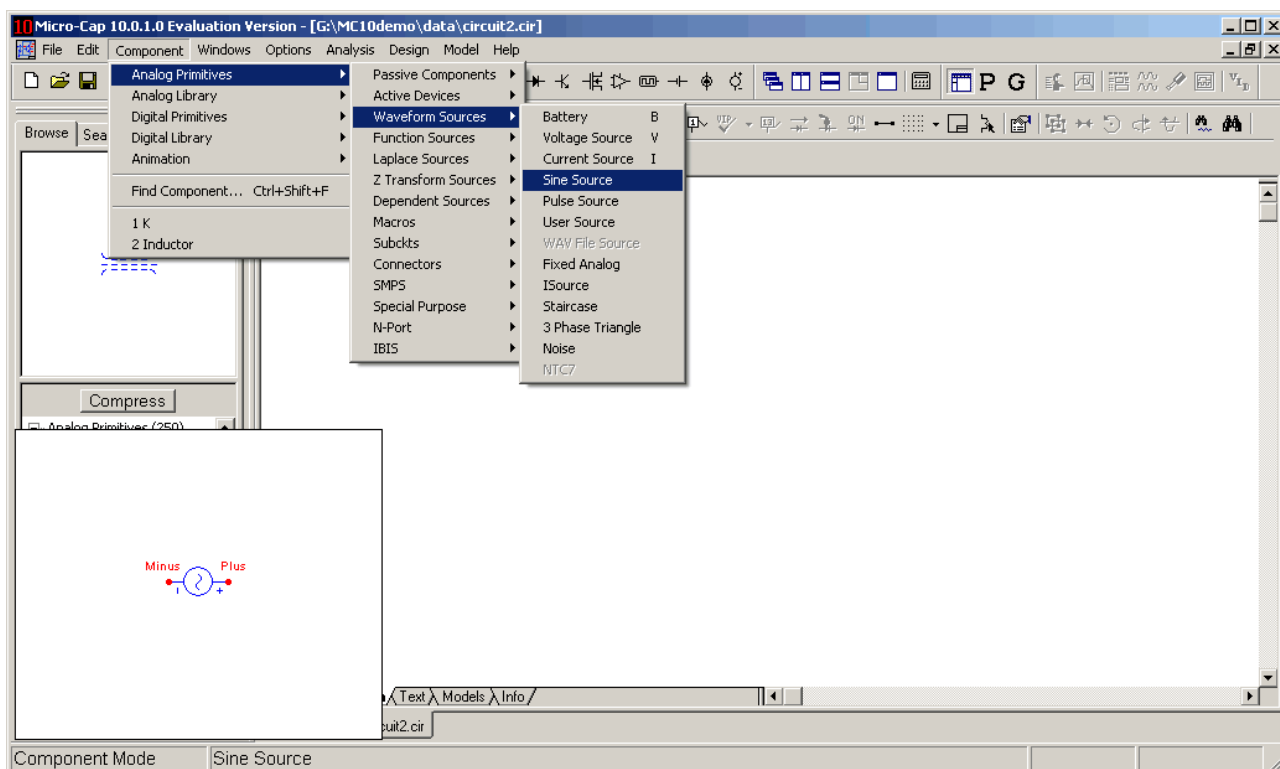


Рис. 1.11. Выбор из меню источника синусоидального сигнала

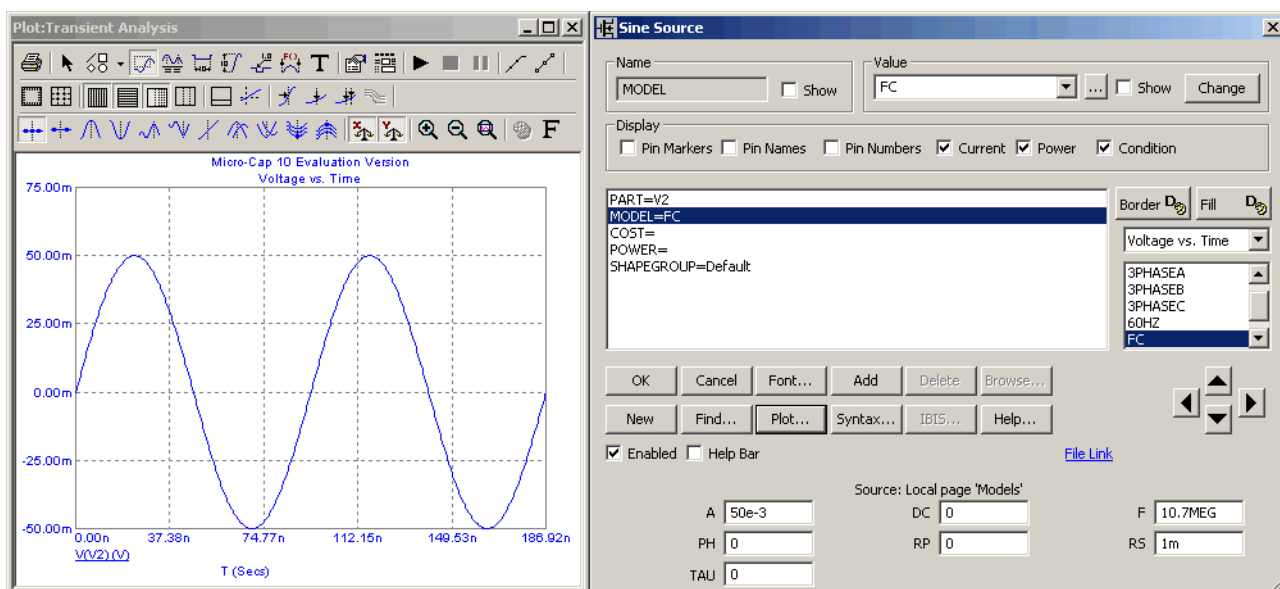


Рис. 1.12. Окно атрибутов источника синусоидального сигнала

Для задания параметров генератора гармонических колебаний при выделенной строке MODEL следует указать на ввод новой модели генератора, нажав кнопку *New* под левым окном. Введя затем название генератора (например, FC) в окне Value, установить последовательно курсор в позициях таблицы параметров модели генератора и ввести требуемые параметры, организовав файл данных источника сигнала (рис. 1.12). В качестве параметров генератора задаются (рис. 1.12):

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 —  $1\text{E-}3$  Ом;

RP — период повторения экспоненциального затухания (для затухающей синусоиды) — 0 с;

TAU — постоянная времени затухания огибающей сигнала (для затухающей по экспоненте синусоиды) — 0 с.

После ввода параметров генератора FC можно наблюдать на экране монитора форму сигнала, действующего на входе усилителя (рис. 1.12), нажав на кнопку *PLOT*.

Подключение батареи источника питания завершает ввод принципиальной схемы ЧД.


Выбрав нажатием на левую кнопку мыши пиктограмму батареи панели инструментов (рис 6.2) переходят на выпадающем меню в режим задания параметров батареи.

Выбрав позиционное обозначение батареи на принципиальной схеме V1 (PART) и величину создаваемого напряжения 6В (VALUE — 6V), нажатием на кнопку *OK* 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 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. 1.1 (размещение условно графического обозначений трансформаторов *K* может быть произвольным). Следует отметить, что условные графические обозначения (УГО) компонентов принципиальной схемы могут быть другими и зависят от используемой группы (атрибут SHAPEGROUP) УГО. На завершающем этапе ввода принципиальной схемы следует проверить соответствие значений величин введенных элементов рис. 1.1 и при необходимости произвести коррекцию.

Для выполнения п. 2.2.1 необходимо исключить влияние выходного контура детектора. Для этого его расстраивают, шунтируя конденсатором большой емкости ( $C5=250$  пФ). В этом случае принципиальная схема ЧД (рис. 1.1) приобретает вид рис. 1.13.

Проведение анализа частотных свойств УПЧ предваряет нумерация узлов принципиальной схемы нажатием на пиктограмму *Node Numbers* . Вход в режим анализа происходит при активизации левой кнопкой мыши команды *Analysis* меню главного окна.



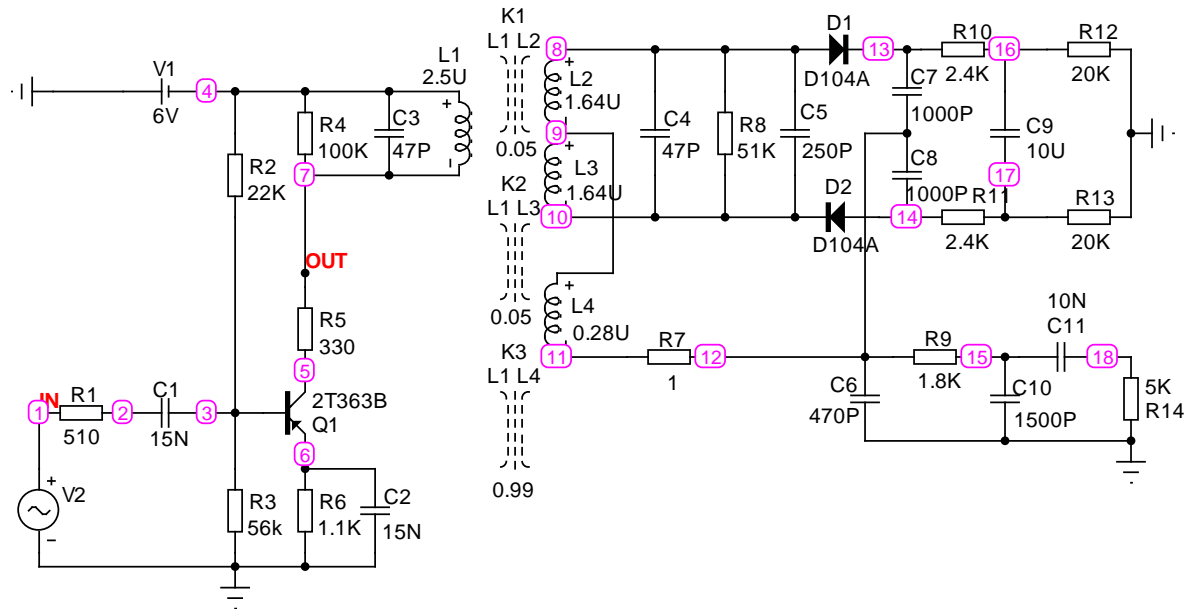


Рис. 1.13. Принципиальная схема ЧД с расстроенным выходным контуром

На выпадающем меню выбирается режим анализа частотных характеристик *AC*. Нажатием левой кнопкой мыши при подсвеченной строке *AC* переходим к заданию условий анализа в открывшемся окне *AC Analysis Limits*.

Нажатием левой кнопки мыши переходят к заданию пределов частот проведения анализа, способа изменения частоты и представления на экране монитора результирующих графиков анализа.

В окне *AC Analysis Limits* (рис. 1.14) задаются следующие параметры частотного анализа:

*Frequency Range* — значения верхнего и нижнего пределов частот анализа.

*Number of Points* — количество точек разбиения частотного интервала 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 на график или в форме таблицы (если это указывается). Выбор автоматического режима может приводить к существенным неточностям в расчете. При широком частотном диапазоне (например в несколько декад) целесообразно выбирать логарифмический шаг изменения частоты (*Log* в строке *Frequency Range*) с достаточно большим количеством точек, например  $>1000$ . В рассматриваемом случае для большей точности можно взять  $Number\ of\ Points=5001$ .

*Temperature* — диапазон изменения температур (может задаваться ряд значений, при которых производится анализ);

*Maximum Change* — максимально допустимое приращение функции первого графика на интервале шага по частоте (учитывается только при автоматическом выборе шага изменения частоты — активизация *Auto* в строке *Frequency Range*);

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

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

*Run Options* — определяет способ хранения полученных результатов:



- *Normal* — результаты расчетов не сохраняются;
- *Save* — результаты сохраняются на жестком диске;
- *Retrieve* — использование результатов расчета, ранее сохраненных на жестком диске для вывода на экран монитора;

*State Variables* — задание начальных условий расчета рабочей точки на постоянном токе.

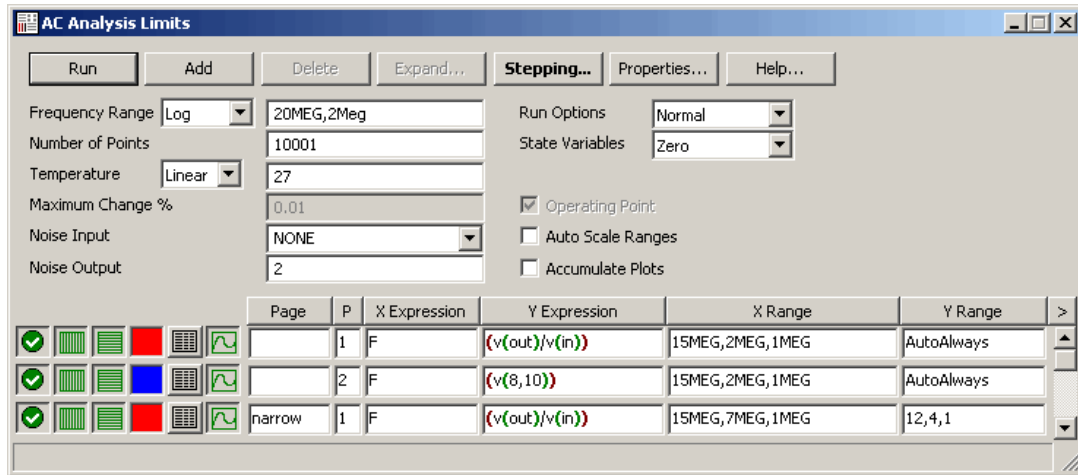


Рис. 1.14. Окно задания параметров частотного анализа схемы с расстроенным вторичным контуром

На экран монитора, в соответствии с рис. 1.14, выводится график коэффициента усиления (Y Expression) в зависимости от частоты (X Expression) в узле *Out* и разность потенциалов узлов 8 и 10 ( $V(8,10)$ ) с пределами значений для каждого из них, определяемой форматом: максимальное значение выводимой переменной, ее минимальное значение и шаг сетки значений соответствующей оси (коэффициент передачи — ось Y, частота — ось X). Характер изменения значений по осям — линейный, что выбирается нажатием двух левых крайних кнопок (с зеленой координатной сеткой) в строке выводимых значений. Для значений компонентов, указанных на рис. 1.13 производится расчет АЧХ каскада УПЧ практически без влияния детектора (первичный и вторичный контур сильно расстроены включением шунтирующего конденсатора C5).

Для получения результатов анализа следует нажать кнопку *Run*. Результаты вычислений представлены на рис. 1.15. Как видно из рисунка, резонансная частота отлична от 10,7 МГц. Точное значение максимума АЧХ (резонансная частота) находится следующим образом: нажимается кнопка *Peak* (локальный максимум), курсор располагается на первом локальном максимуме на частоте примерно 5 MEG, затем еще раз нажимается кнопка *Peak* — курсор перейдет на следующий локальный максимум. Влияние контура детектора сказывается появлением выброса на АЧХ первичного контура (напряжение  $V(8,10)$ ). 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 удаления графика следует поместить курсор в одну из граф удаляемой строки таблицы вывода и нажать кнопку *Del*. Графики выводятся в одном графическом окне при вводе в колонках P (Plot) одинаковой цифры.

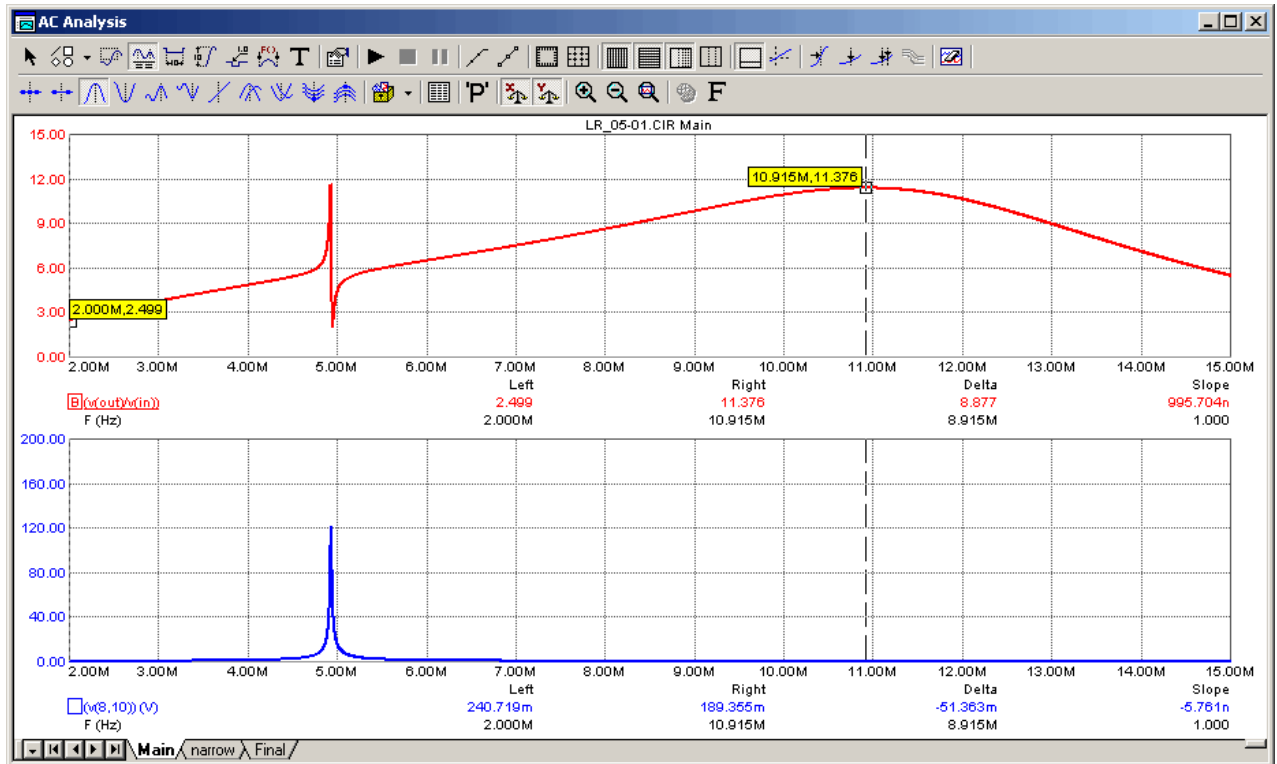



Рис. 1.15. Результаты частотного анализа при неточной настройке первичного контура

Подстройка резонансной частоты осуществляется использованием подрежима *Stepping* в окне *AC Analysis Limits* (однако его можно вызвать и из меню текущего вида анализа (AC) или нажав соответствующую пиктограмму на панели инструментов ). Активизацией кнопки *Stepping* переходят в режим многовариантного анализа, позволяющего в Micro-Cap изменять, по выбранному закону, параметры компонентов (активных и пассивных), параметры зависимых и независимых источников сигналов, моделей, символьных переменных. При этом могут одновременно изменяться до двадцати параметров. В демо-версии программы возможно одновременное изменение лишь одного параметра одного компонента или модели.

В качестве варьируемого компонента задаем индуктивность первичного контура L1 нажатием на кнопку *Step What* открывшегося окна *Stepping* и выбором из открывающегося списка позиционного обозначения первичной катушки. Индуктивность L1 при этом подсвечивается курсором, а нажатие левой кнопки мыши переводят ее в категорию варьируемых (рис. 1.16).

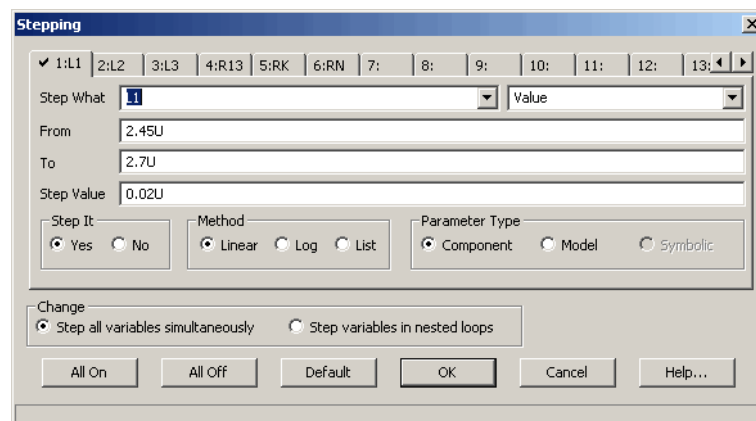


Рис. 1.16. Окно задания варьирования первичной катушки для точной настройки контура

Затем указываем нижний (*From*) и верхний (*To*) пределы его изменения индуктивности  $L_1$  и величину шага (*Step Value*) (рис. 1.16).

Затем в рамке (*Step It*), нажимая на кнопку *Yes*, включая вариацию параметров выбранного компонента. В панели *Method* отмечаем кнопкой закон изменения параметра *Linear* (*Linear* — линейный, *Log* — логарифмический или *List* — в соответствии со списком). В панели *Parameter Type* выбираем опцию варьируемого параметра: *Component* — компонент (*Model* — модель, например, источника сигнала; *Symbolic* — значение символьной переменной).

В панели *Change* (изменение) выбирается опция вариации нескольких параметров: во вложенных циклах (*Step variables in nested loops*) или всех одновременно (*Step all variables simultaneously*). В первом случае существует возможность независимого выбора шага для каждого параметра. Во втором случае необходимо, чтобы число вариаций каждого из параметров было одним и тем же. Во втором случае число анализируемых вариантов равно числу вариаций одного параметра.

Кнопки в нижнем ряду *All On*, *All Off* включают или отключают режим варьирования (*Step It*) 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 *OK*. Для варианта значений индуктивности  $L_1$ , указанного на рис. 1.16, получается семейство (рис. 1.17) кривых (последовательный вход в режим АС и затем нажатие *Run*).

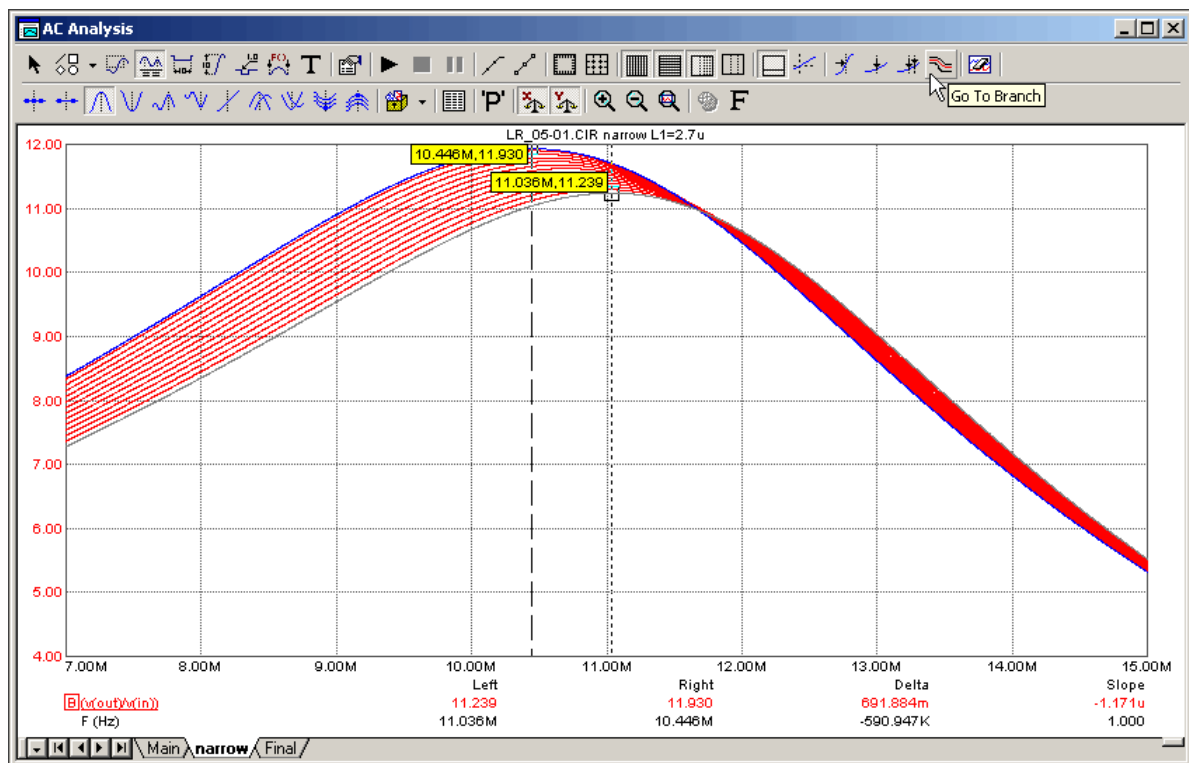




Рис. 1.17. Семейство кривых при вариации  $L_1$

Поскольку изменение резонансной частоты происходит и небольших пределах, то для достаточного заметного отличия АЧХ при различных значениях  $L_1$  изменены пределы построения графика по частоте (можно такой график с

более узким интервалом частот построить в отдельном графическом окне или на отдельной странице графиков) (см. рис. 1.14, рис. 1.17). Для определения точного значения резонансной частоты первичного контура при пошаговом изменении индуктивности L1 необходимо последовательно выполнить (находясь в окне *AC Analysis*) следующие действия:

- Включить режим электронных курсоров (F8 или соответствующая пиктограмма на панели инструментов )
- Вывести электронные курсоры на поле интересующего графика (кликнуть на поле графика левой и правой кнопкой мыши)
- нажать на пиктограмму *Go To Branch* (перейти на другой график) (рис. 1.17). На открывшемся окне (рис. 1.18) выбрать из разворачивающегося списка нужный вариант анализа (интересующее значение L1), нажать на кнопку Left (левый) или Right (правый), затем закрыть подменю, нажав Close (при этом появляется выделенный соответствующим цветом (для левого или правого курсоров) график).
- нажать один раз (трижды) на пиктограмму Peak , что поместит маркер с указанием максимального значения АЧХ и частоты, ей соответствующей, на одну из кривых. Значение параметра компонента (L1) указывается вверху, у заголовка семейства кривых, а соответствующая кривая выделяется соответствующим цветом.

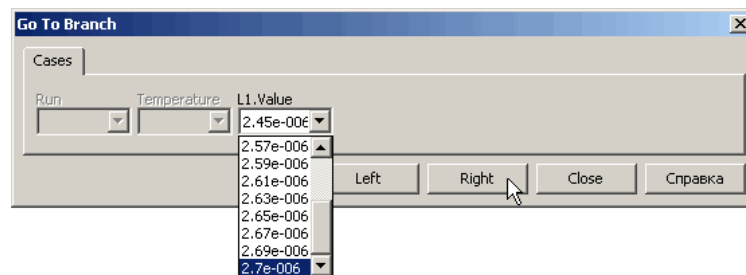


Рис. 1.18. Окно задания перехода к выбранному варианту анализа

Таким образом следует определить значение индуктивности первичного контура L1 при котором отличие значения резонансной частоты контура каскада УПЧ от номинального 10,7 МГц составляет не более чем 10 кГц. Привести распечатку амплитудно-частотной характеристики для вычисленного значения L1, аналогичную рис. 1.17.

Описанное определение необходимого значения L1 можно значительно упростить, если после проведения многовариантного анализа построить в окне *Performance* зависимость частоты 2-го локального максимума от варьируемой величины индуктивности катушки L1: Peak\_X((v(out)/v(in)),1,2) от L1 (рис. 1.19).

При выполнении п. 2.2.2 в первичном контуре устанавливается найденное уточненное значение индуктивности L1, при сохранении значений остальных компонентов принципиальной схемы ЧД как на рис. 1.1. Далее проводится расчет и построение амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, используя в качестве выходного разностное напряжение на выходе ФСТ V(8)–V(10), обозначаемом в Micro-Cap как V(8,10). Выводимые на экран монитора зависимости (рис. 1.20) определяются в окне *AC Analysis Limits*, вызываемом нажатием F9.

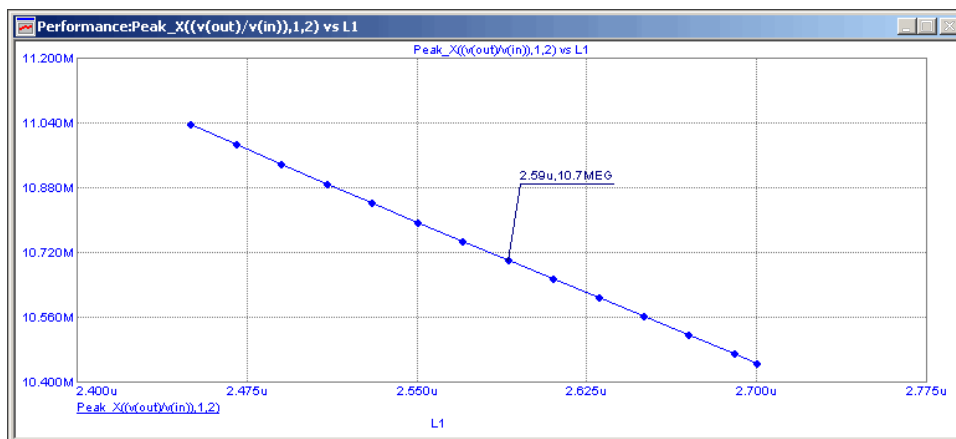


Рис. 1.19. Настройка первичного контура на заданную частоту с использованием окна Performance

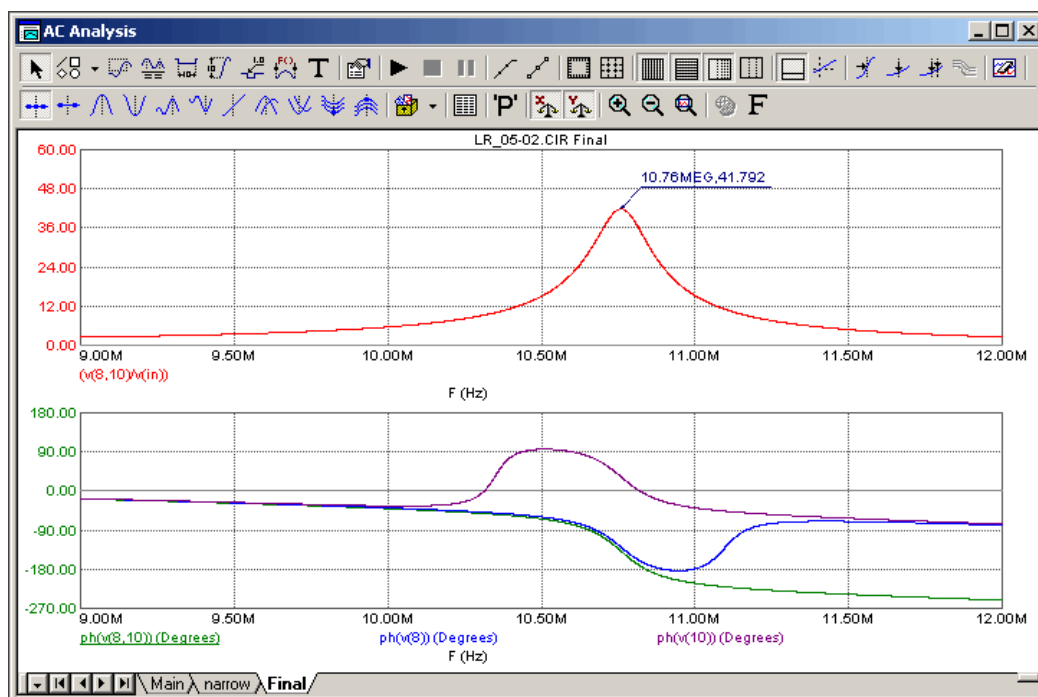


Рис. 1.20. Характеристики для входных ФСТ нагруженного каскада

Для некоторого значения величин и индуктивности второго контура ( $L_2+L_3$ ), значения индуктивностей  $L_2=L_3=1.64$  мкГн) характер рассчитанных кривых имеет вид (рис. 1.20).

Используя курсорный режим 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 среднее значение частоты ( $f_{cp}$ ) и величину фазового сдвига ФСТ на ней  $Ph(V(8,10))$  при  $f=f_{cp}$ . Полученные результаты занесите в таблицу 1. Определение максимального и минимального значений фазы напряжений  $V(8)$ ,  $V(10)$  можно упростить, активизируя соответствующий график и используя курсорный режим (F8).

Таблица 1

| $L_2$ , мкГн | $f_p$ , МГц | $Ph(t=t_0)$ , град | $f_{cp}$ , МГц | $Ph(t=t_{cp})$ , град | $\Pi$ , кГц | $K_\Gamma$ , % |
|--------------|-------------|--------------------|----------------|-----------------------|-------------|----------------|
| 1,64         |             |                    |                |                       |             |                |
| 1,658        |             |                    |                |                       |             |                |

Повторите эксперимент для величины индуктивности  $L2=L3=1,658$  мкГн. Результаты моделирования занесите в таблицу 1. Далее выберите то из двух значений индуктивностей вторичной обмотки ФСТ, которые соответствуют наиболее точной настройке вторичного контура на заданную частоту 10,7 МГц.

Можно также для точной настройки вторичного контура использовать пошаговое изменение индуктивности вторичного контура совместно с построением опосредованной функции  $\text{Performance High\_X}((v(8,10)/v(in)),1)$ . После этого следует для построенной Performance-функции  $\text{High\_X}((v(8,10)/v(in)),1)$  в курсорном режиме определить значение индуктивностей вторичного контура, соответствующего максимуму АЧХ на частоте 10,7 МГц (рис. 1.21).

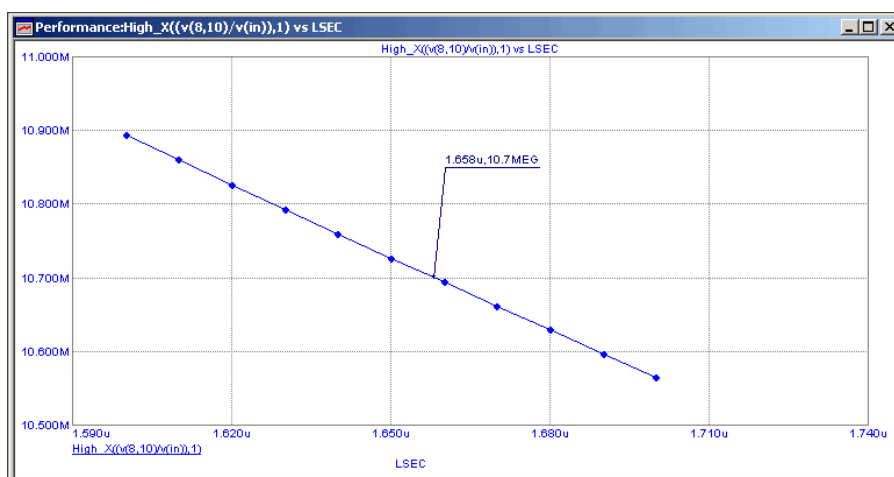


Рис. 1.21. Настройка вторичного контура с помощью окна Performance

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. 1.1 значениях компонентов получается при задании в подменю AC Analysis Limits пределов анализа (рис. 1.22).

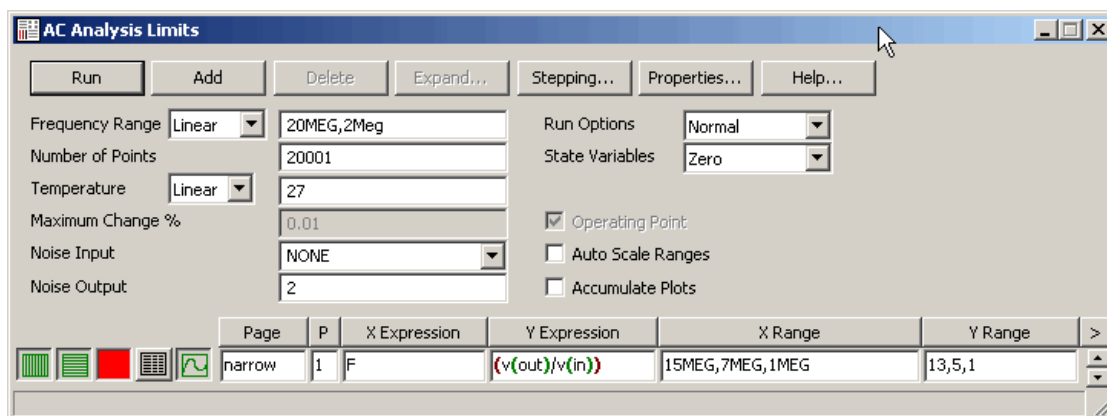


Рис. 1.22. Окно параметров AC анализа для снятия АЧХ нагруженного каскада УПЧ

Полоса пропускания каскада по уровню  $0.707K_{\max}$  определяется после нахождения максимального значения АЧХ с помощью пиктограммы *Peak* (рис. 1.17) и, определенного по нему, требуемого уровня (рис. 1.23).

Вычисленный уровень указывается на выпадающем подменю после нажатия пиктограммы *Go to Y*. На подменю *Go to Y* (рис. 1.29) в строке *Value* указывается значение  $0.707Y_{\max}$  ( $0,707 \cdot V(\text{Out})_{\max}$ ) и нажатием на кнопку *Left, Right*



последовательно устанавливается левый и правый электронные курсоры в точках, соответствующее указанному значению. Это позволяет легко определить значение полосы пропускания каскада УПЧ (П), отсчитав крайнее левое и крайнее правое, значения частот. Для автоматизации сделанного измерения можно воспользоваться командой *Scope>Tag Horizontal*.

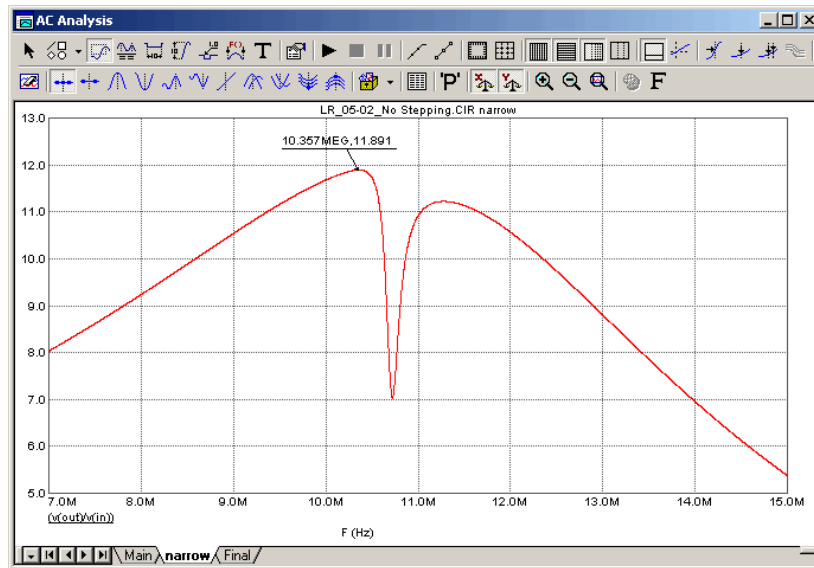


Рис. 1.23. АЧХ нагруженного каскада УПЧ

Установив значения  $L_2=L_3=1.658$  мкГн следует 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 Micro-Cap, с соответствующей коррекцией (рис. 1.24).

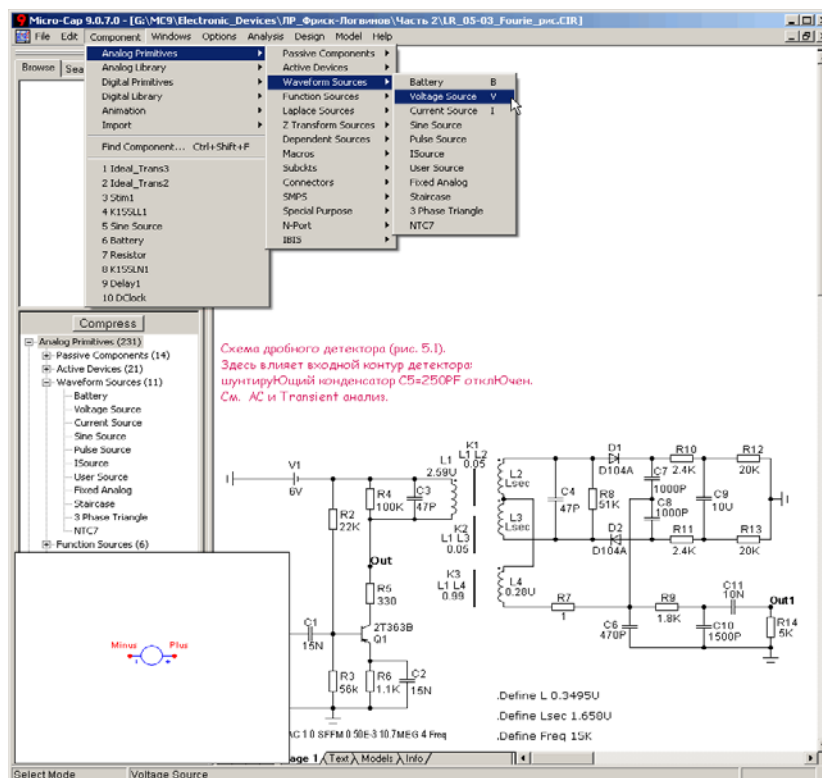


Рис. 1.24. Выбор компонента из меню компонентов (2 способа)



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. 1.24). Можно также использовать панель компонентов, включаемую командой *Options>Panel* (Ctrl+Alt+X). Нажатием левой кнопки мыши на активизированную строку *Voltage Source* входим в подменю задания параметров модели независимого источника напряжения.

Содержание верхней части окна атрибутов (рис. 1.25) *Voltage Source* по содержанию аналогично использовавшимся ранее при вводе компонентов принципиальной схемы и источника гармонического сигнала. Ряд закладок, расположенных под функциональными кнопками, позволяет выбрать 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).

Закладка *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 во временной области;
- F0 — частота несущего колебания;
- MI — индекс модуляции;
- FM — частота модуляции.

Выражение, определяющий выходное напряжение генератора:

$$V(I) = V0 + VA * \sin(2 * \text{PI} * F0 * \text{TIME} + MI * \sin(2 * \text{PI} * FM * \text{TIME})),$$

где TIME — время анализа переходных процессов.

Нажатие на кнопку *Default* присваивает значения указанных параметров по умолчанию, Modulate 1, Modulate 2 — 2 встроенных частотно-модулированных сигнала с разными индексами модуляции MI и соотношениями несущей F0 и модулирующей FM частот.

Новые параметры, вместо значений, представленных программой по умолчанию, вводятся при помещении курсора в окно (рис. 1.25) 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).

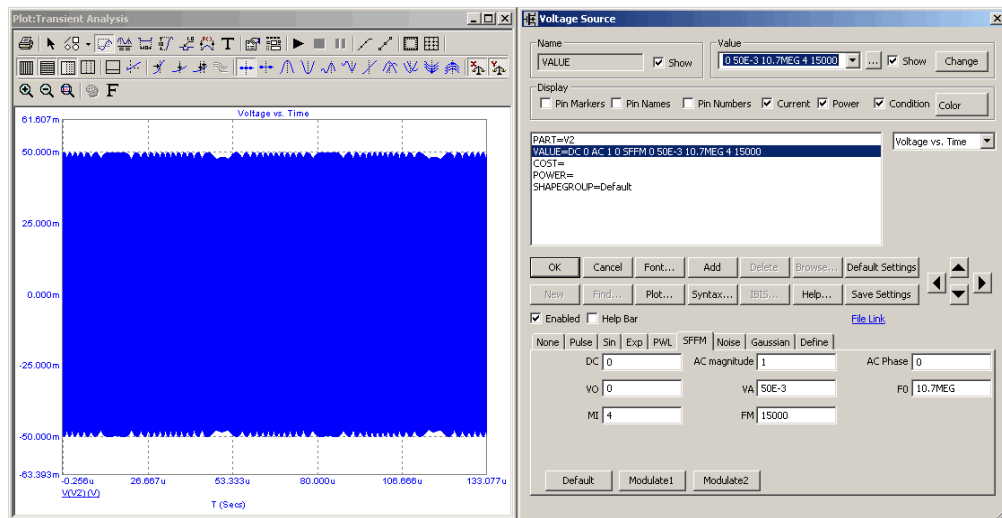


Рис. 1.25. Задание параметров источника сигнала с частотной модуляцией

Принципиальная схема дробного ЧД при включении на его входе генератора с ЧМ сигналом имеет вид рис. 1.26.

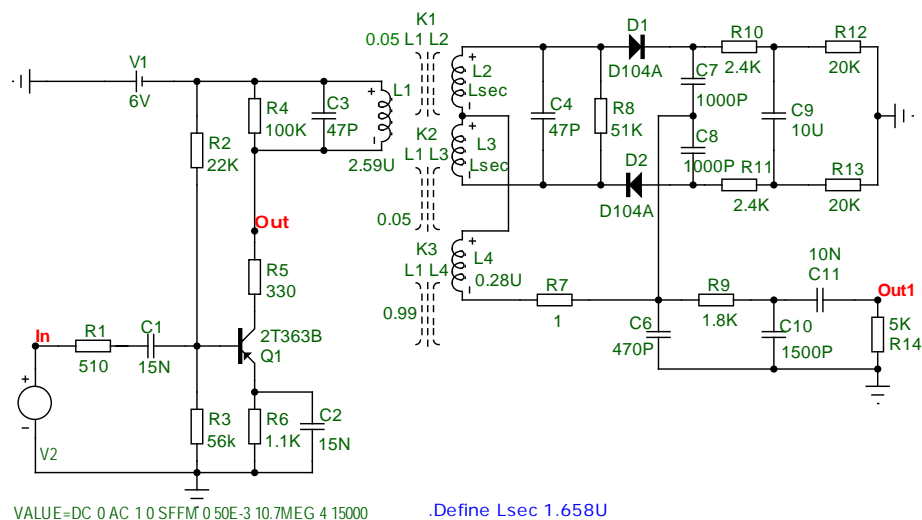


Рис. 1.26. Принципиальная схема дробного частотного детектора с частотно-модулированным сигналом на входе

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* (или нажать комбинацию «горячих» клавиш Alt+1).

На выпадающем окне задания параметров *Transient Analysis Limits* (рис. 1.27) указываем параметры, определяющие процедуру анализа и вид выводимых кривых.

Командные кнопки в верхнем ряду подменю означают:

*Run* — запуск моделирования схемы в соответствующем режиме анализа;

*Add* — добавить (строку в таблицу спецификации вывода, внизу окна) график, выводимый на экран монитора;

*Delete* — удалить график (строку из таблицы спецификации вывода);

*Expand* — расширить видимость текстовой информации размещаемой в позиции спецификации вывода 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 верхняя колонка окна параметров анализа 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 верхнем столбце окна 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* — при выборе этой опции любой анализ предваряется расчетом по постоянному току;

*Operating Point Only* — выбор этой опции обеспечивает расчет параметров схемы только по постоянному току;

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

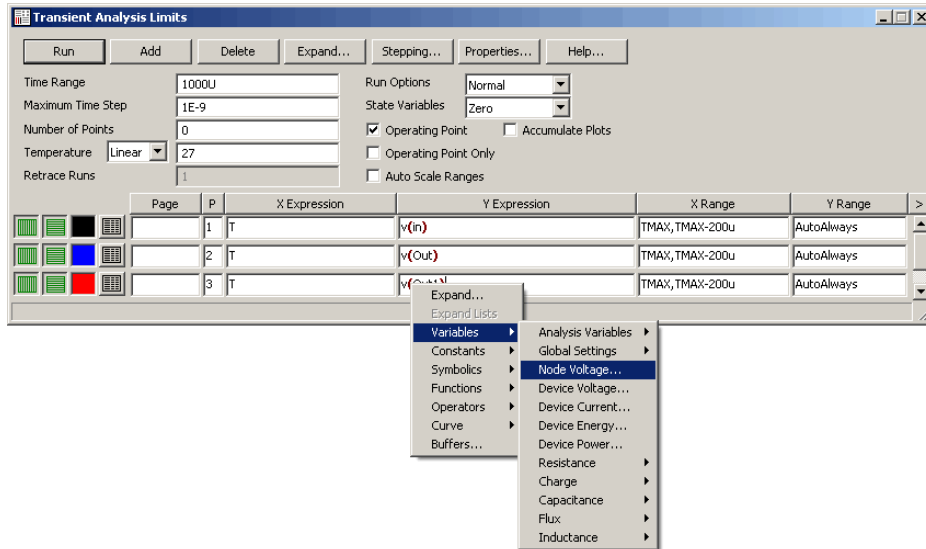


Рис. 1.27. Задание параметров анализа во временной области

Опции таблицы спецификации вывода (кривых). Две крайние слева пиктограммы с зеленой сеткой, определяют тип 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 спецификации вывода.

Следующая пиктограмма на каждой строке позволяет выбирать цвет кривой, выводимой на экран. Нажатие на пиктограмму обеспечивает 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 графического окна, в котором 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. 1.27). По оси абсцисс (XExpression) обычно в качестве переменной выби-

рают 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. 1.27 параметров моделирования начальный участок переходных характеристик, описывающий нестационарный процесс в узлах *out* и *out1* на экран не выводится. Достаточно большой интервал моделирования (1000 мкс) выбран для снижения влияния нестационарных процессов на спектр амплитуд выходного напряжения.

Результаты моделирования во временной области в узлах *out* и *out1* принципиальной схемы ЧД (рис. 1.26) при действии на входе ЧМ сигнала представлены на рис. 1.28.

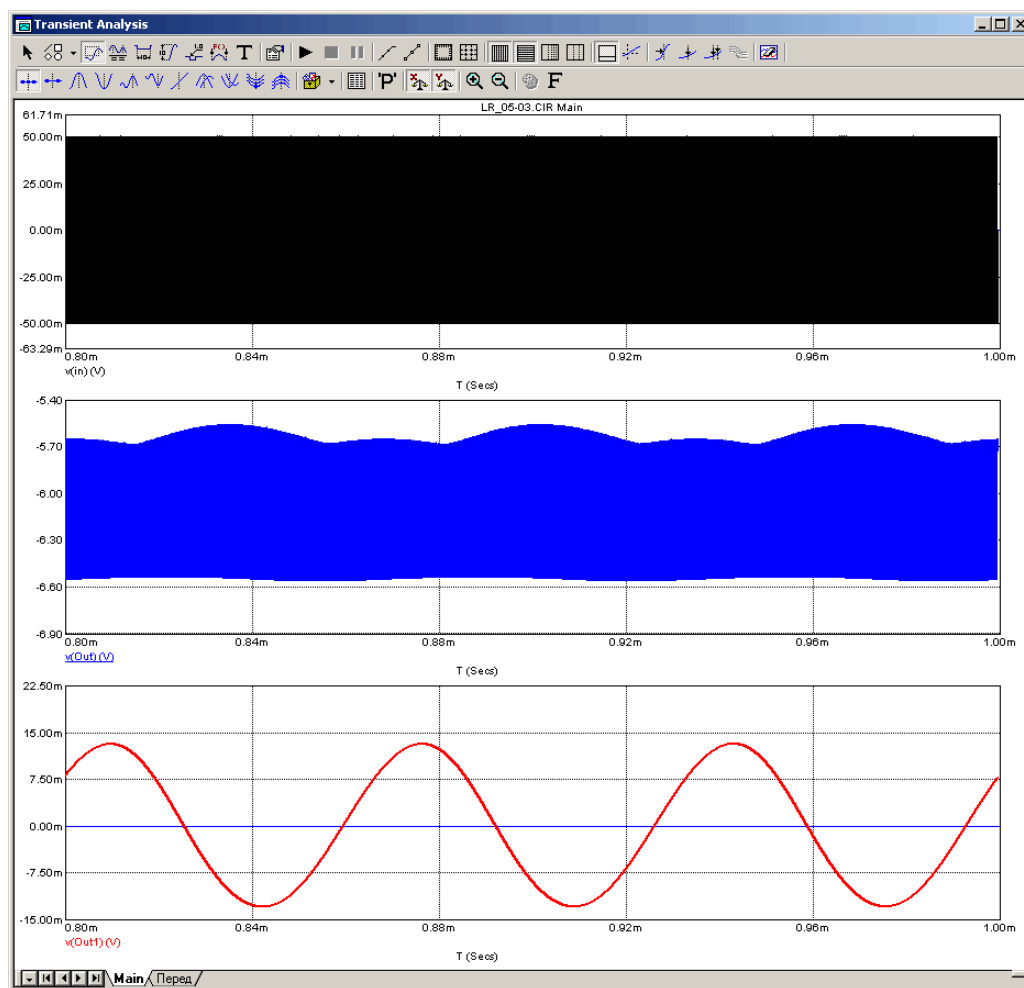


Рис. 1.28. Результаты анализа дробного детектора во временной области

Для получения амплитудного спектра выходного напряжения и определения коэффициента гармоник воспользуемся встроенной процедурой быстрого преобразования Фурье (FFT). Для этого вида анализа целесообразно определить частоту модулирующей синусоиды как символьную переменную *Freq* с соответствующим изменением параметра FM входного источника сигнала *SFFM* (рис. 1.29).

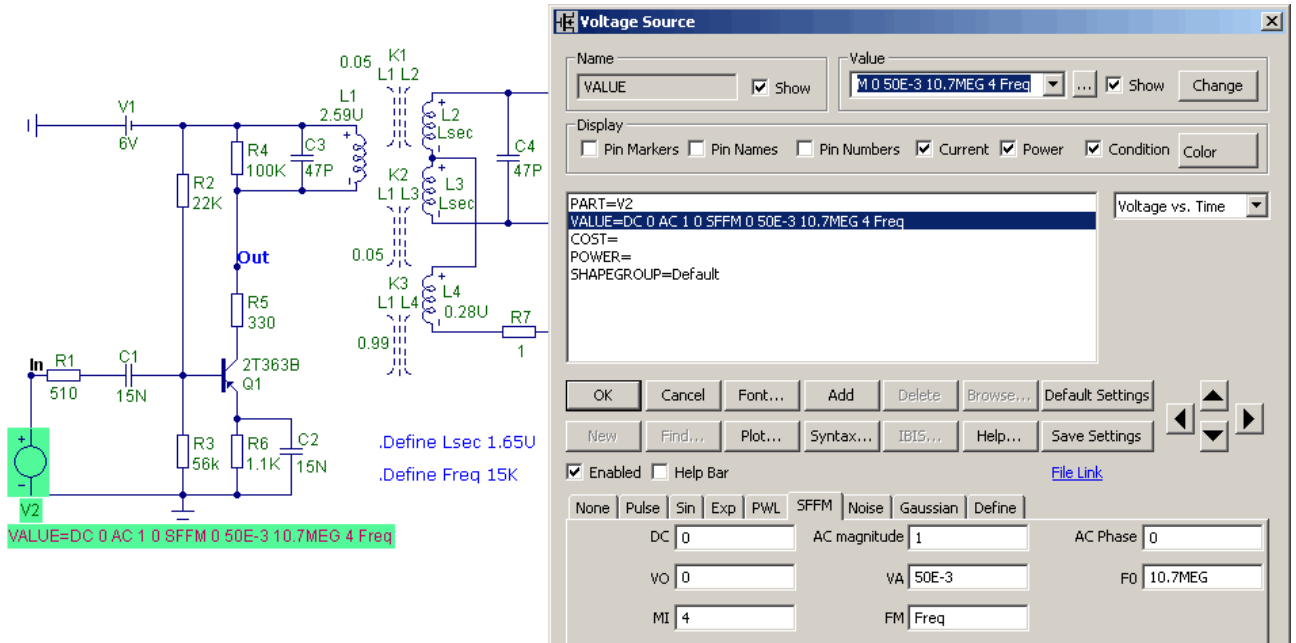


Рис. 1.29. Определение частоты модулирующей синусоиды в виде символьной переменной

Для анализа переходных процессов и последующего Фурье-анализа возьмем время, достаточное для окончания всех переходных процессов, например 20 периодов модулирующей частоты —  $20/\text{Freq}$ . Спектральный анализ с применением встроенного алгоритма БПФ будем проводить для напряжения в узле Out1 V(out1) за последний период модулирующей функции. Т.е. за промежуток времени от  $(T_{\text{MAX}} - 1/\text{Freq})$  до  $T_{\text{MAX}}$ . В соответствии с этим установки закладки FFT окна свойств графиков должны выглядеть как показано на рис. 1.30.

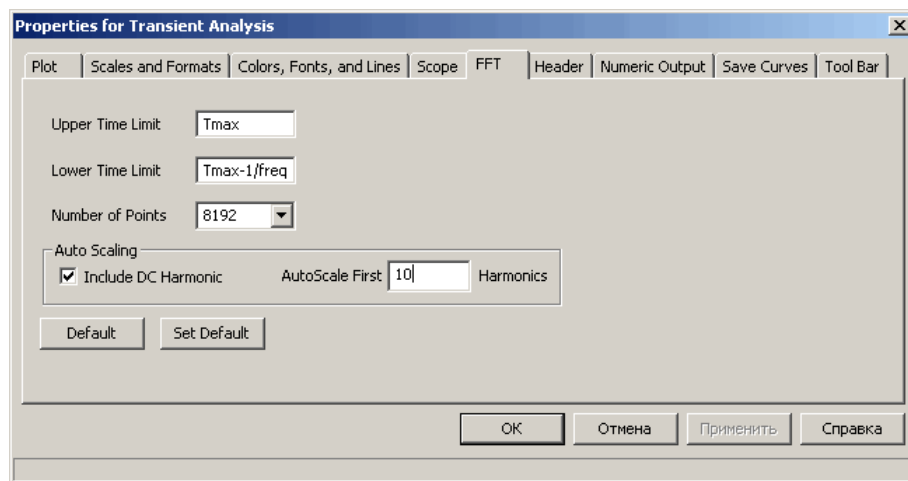


Рис. 1.30. Установки закладки FFT окна свойств графика для проведения спектрального анализа детектированного сигнала

Гармоники спектра напряжения V(Out1) выводятся с помощью функции  $\text{HARM}(V(\text{Out1}))$  при задании в качестве переменной, откладываемой по оси X частоты F. Коэффициент нелинейных искажений спектра гармоник напряжения V(Out1) относительно его первой гармоники выводится с помощью функции обработки сигнала  $\text{THD}(\text{HARM}(V(\text{Out1})), \text{freq})$ . Freq представляет собой частоту модулирующей гармонической функции, а значит — и частоту первой гармоники выходного детектированного сигнала. В соответствии со сказанным установки окна *Transient Analysis Limits* будут следующими (рис. 1.31).

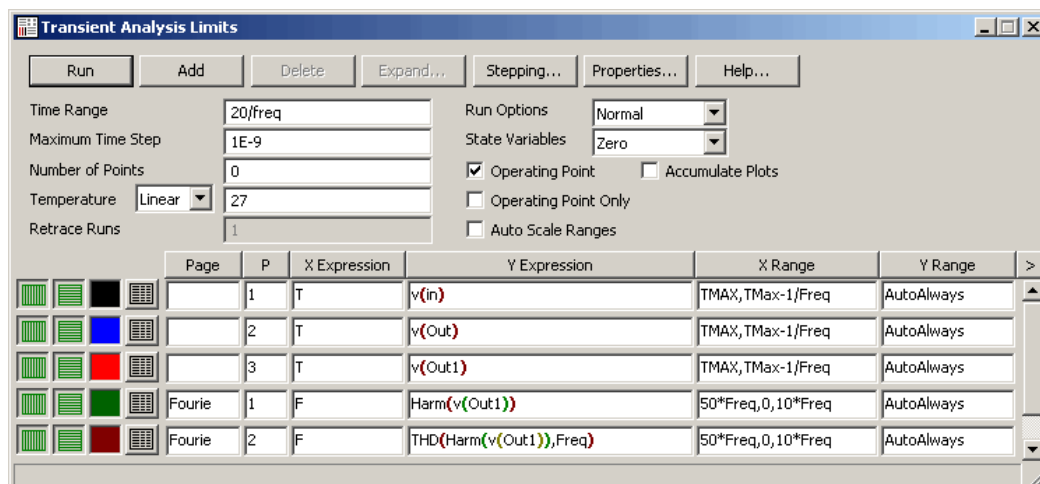


Рис. 1.31. Установки окна Transient Analysis Limits для анализа детектированного сигнала во временной и частотной областях

Результаты временного и частотного анализа детектированного сигнала  $V(\text{Out1})$  при величине индуктивности вторичных обмоток фазосдвигающего трансформатора  $L_{\text{sec}}=1.65U$  представлены на рис. 1.32.

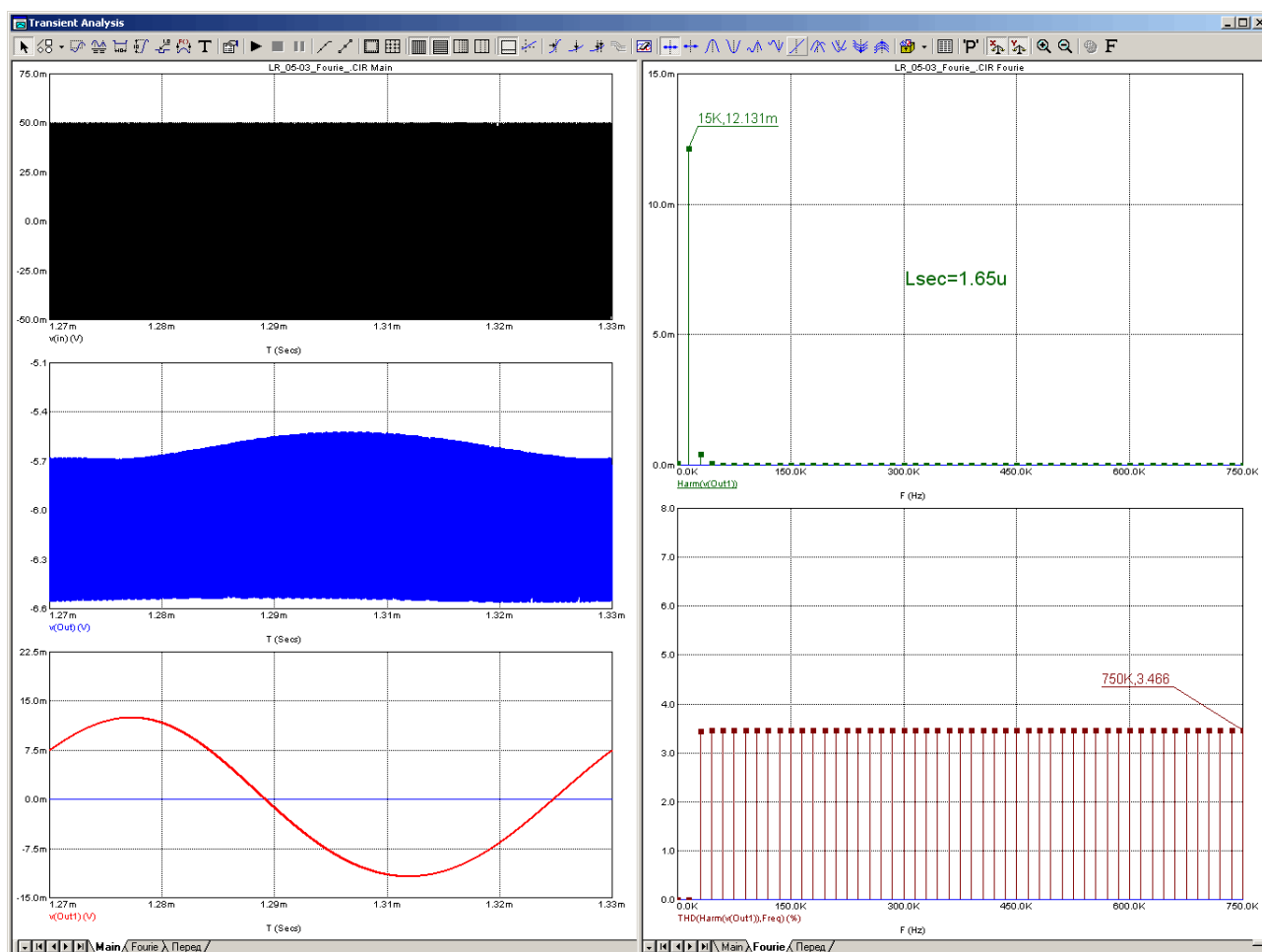


Рис. 1.32. Результаты временного и частотного анализа детектированного сигнала при  $L_{\text{sec}}=1.65U$

В процессе выполнения работы частотный и временной анализ напряжения  $V(\text{Out1})$  выполняется для двух значений индуктивности вторичной обмотки ФСТ  $L_{\text{sec}}=1.64U$  и  $L_{\text{sec}}=1.658U$ . Результаты вычисления коэффициента нелинейных искажений (коэффициента гармоник) заносятся в таблицу 1.



Проделанные выше расчеты амплитудного спектра выходного напряжения и его коэффициента гармоник проводились для условий, описанных на закладке FFT подменю Properties (рис. 1.30), 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 (здесь выбирается в 8 раз больше стандартного числа 1024). Увеличение числа точек приводит к увеличению времени анализа переходных и спектральных 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 вводит в заданную закладку установки, задаваемые программой по умолчанию. Нажатие на кнопку Set Default позволяет задать значения, подставляемые по умолчанию (в этом случае они копируются из текущих установок закладки FFT). Данной кнопкой следует пользоваться с осторожностью.

Для выполнения п. 2.2.5 необходимо провести подобные расчеты при различных значениях коэффициента связи, указанных в задании, между катушкой индуктивности первичного контура (L1) и катушкой связи (L4). Значение коэффициента связи катушек L1 и L4 можно варьировать в режиме Stepping (рис. 1.34), если задать его предварительно как символьную переменную (рис. 1.33).

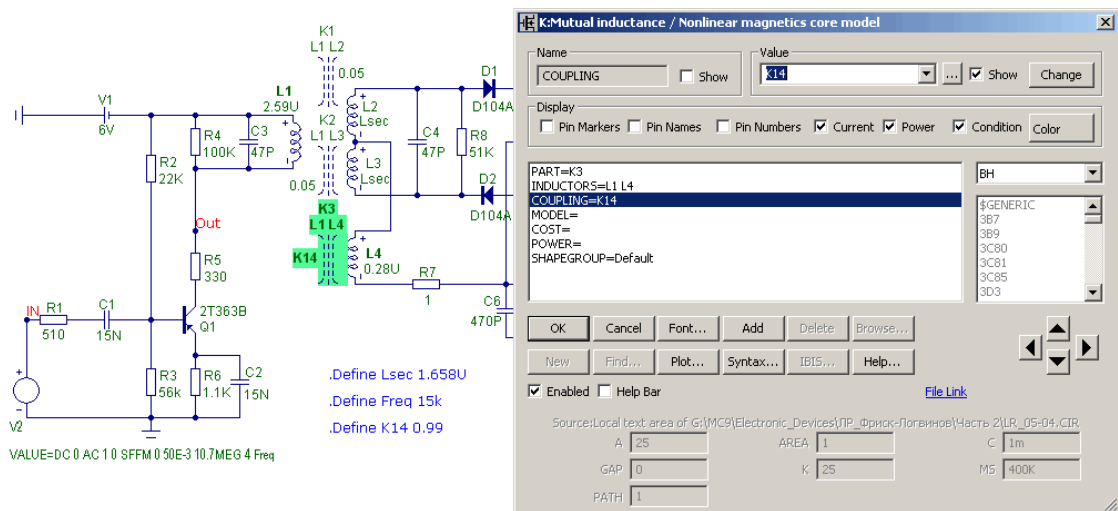


Рис. 1.33. Задание коэффициента связи катушек L1, L4 в виде символьной переменной

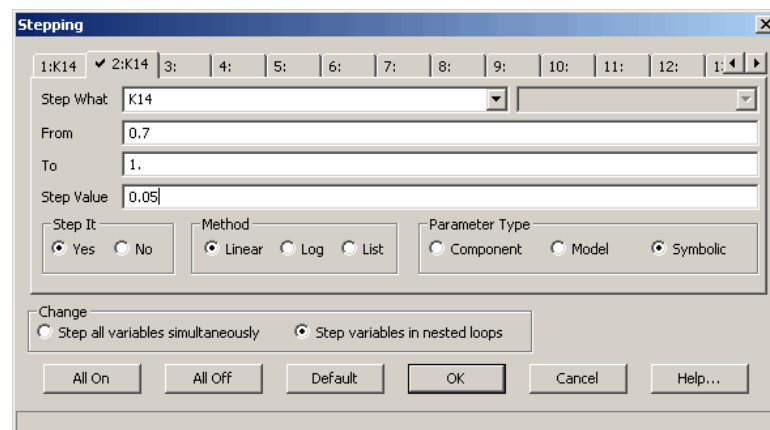


Рис. 1.34. Задание пошагового изменения коэффициента связи катушек L1, L4

Далее при запуске анализа переходных процессов с параметрами аналогичными рис. 1.30, 1.31 происходит серия расчетов при различных значениях коэффициента связи. После ее окончания из окна результатов Фурье-анализа считываются значения величин первой гармоники выходного сигнала и его коэффициента нелинейных искажений. Результаты измерений вносятся в таблицу 2.

Таблица 2

| Изменяющийся параметр                | Значение параметра | Амплитуда выходного напряжения, В | Коэффициент гармоник выходного напряжения |
|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---|
| Коэффициент связи катушек L1-L4, Ксв | 1                  |                                   |   |
|                                      | 0.95               |                                   |   |
|                                      | 0.9                |                                   |   |
|                                      | 0.85               |                                   |   |
|                                      | 0.8                |                                   |   |
|                                      | 0.75               |                                   |   |
|                                      | 0.7                |                                   |   |
| Частота несущего колебания f, МГц    | 10.7               |                                   |   |
|                                      | 10.75              |                                   |   |
|                                      | 10.8               |                                   |   |
|                                      | 10.85              |                                   |   |
|                                      | 10.9               |                                   |   |
|                                      | 10.95              |                                   |   |
|                                      | 11.0               |                                   |   |
|                                      | 11.05              |                                   |   |

Следует отметить, что описанный процесс снятия измеренных значений гармоник и коэффициента нелинейных искажений из серии графиков Фурье-анализа можно автоматизировать, воспользовавшись построением в отдельном окне графиков функций Performance (рис. 1.35). Для задания окна для последующего вывода опосредованных зависимостей следует выполнить команду *Transient>Performance Windows>Add Performance Window*.

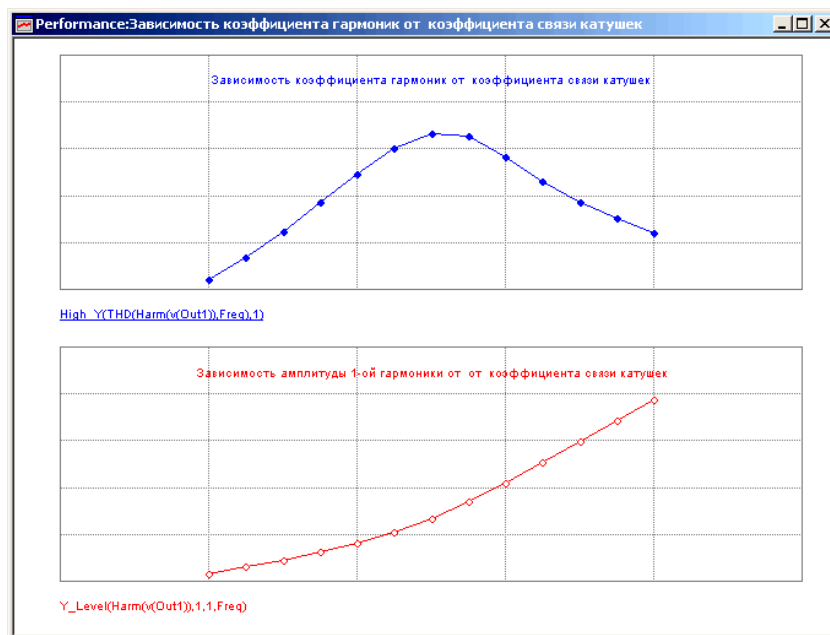


Рис. 1.35. Построение опосредованных зависимостей от Ксв в окне Performance

Для выполнения п. 2.2.6 необходимо подать на вход каскада 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. 1.36).

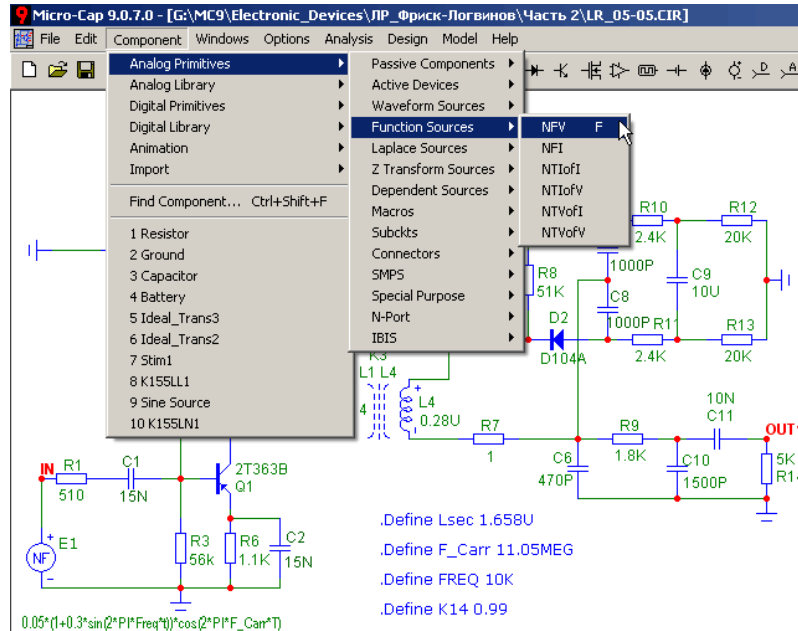


Рис. 1.36. Построение опосредованных зависимостей от Ксв в окне Performance

На выпадающем окне атрибутов NFV: Analog behavioral voltage source (рис. 1.37), в позиции VALUE вводится аналитическое выражение, описывающее закон изменения амплитуды сигнала при модуляции тоном с частотой  $\text{freq}=10000$  Гц и частотой несущего колебания  $F_{\text{carr}}=10,95$  МГц. Строка DERIVATIVE (производная) принимается по умолчанию. Форма входного воздействия выводится на экран монитора при нажатии на кнопку раскрывающегося окна Plot (рис. 1.37).

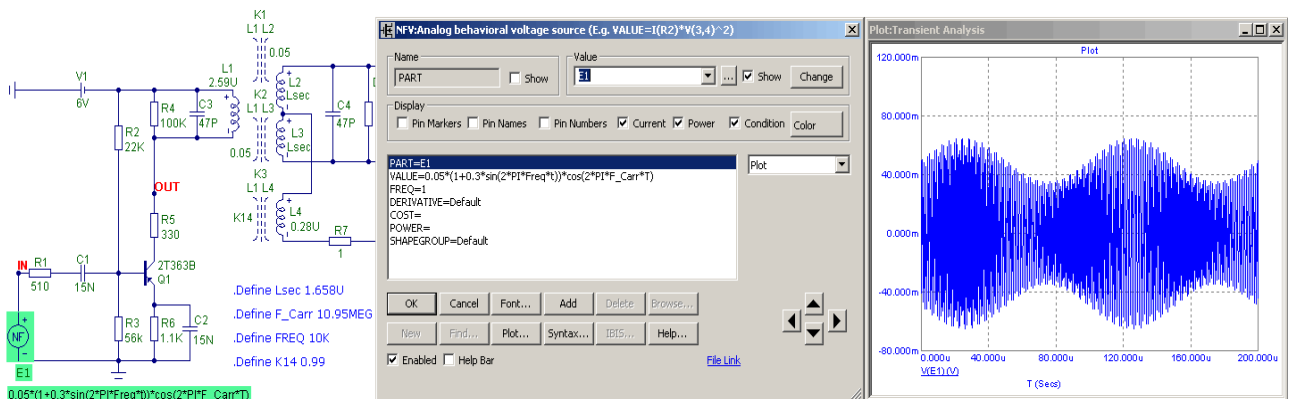


Рис. 1.37. Задание источника гармонического сигнала с амплитудной модуляцией

Поскольку несущая частота АМ-колебания задана с помощью символьной переменной  $F_{\text{carr}}$  (см. рис. 1.37), то можно с помощью окна Stepping (рис. 1.38) организовать ее пошаговое изменение в рамках анализа переходного процесса с последующим анализом спектра.

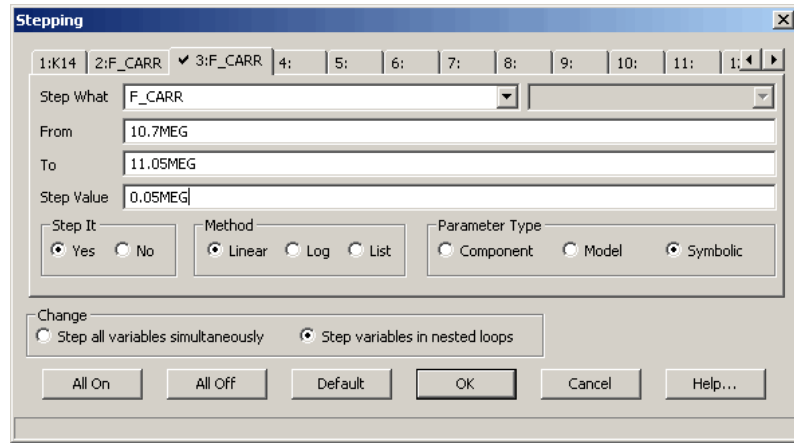


Рис. 1.38. Пошаговое изменение несущей частоты АМ-сигнала

Измерение амплитуды выходного колебания на нагрузке  $V(out1)$ , см. рис. 1.39) осуществляется в конце моделирования переходного процесса Transient Analysis с помощью Фурье-анализа. Следует отметить, что полное время расчета должно быть достаточно для окончания всех нестационарных процессов. Оно может быть взято, к примеру, в диапазоне  $25/Freq-50/Freq$ . При этом следует измерять на выходе амплитуду первой гармоники модулирующей синусоиды, т.е сигнала с частотой  $Freq=10$  кГц. Результаты измерений амплитуды первой гармоники заносятся в таблицу 2.

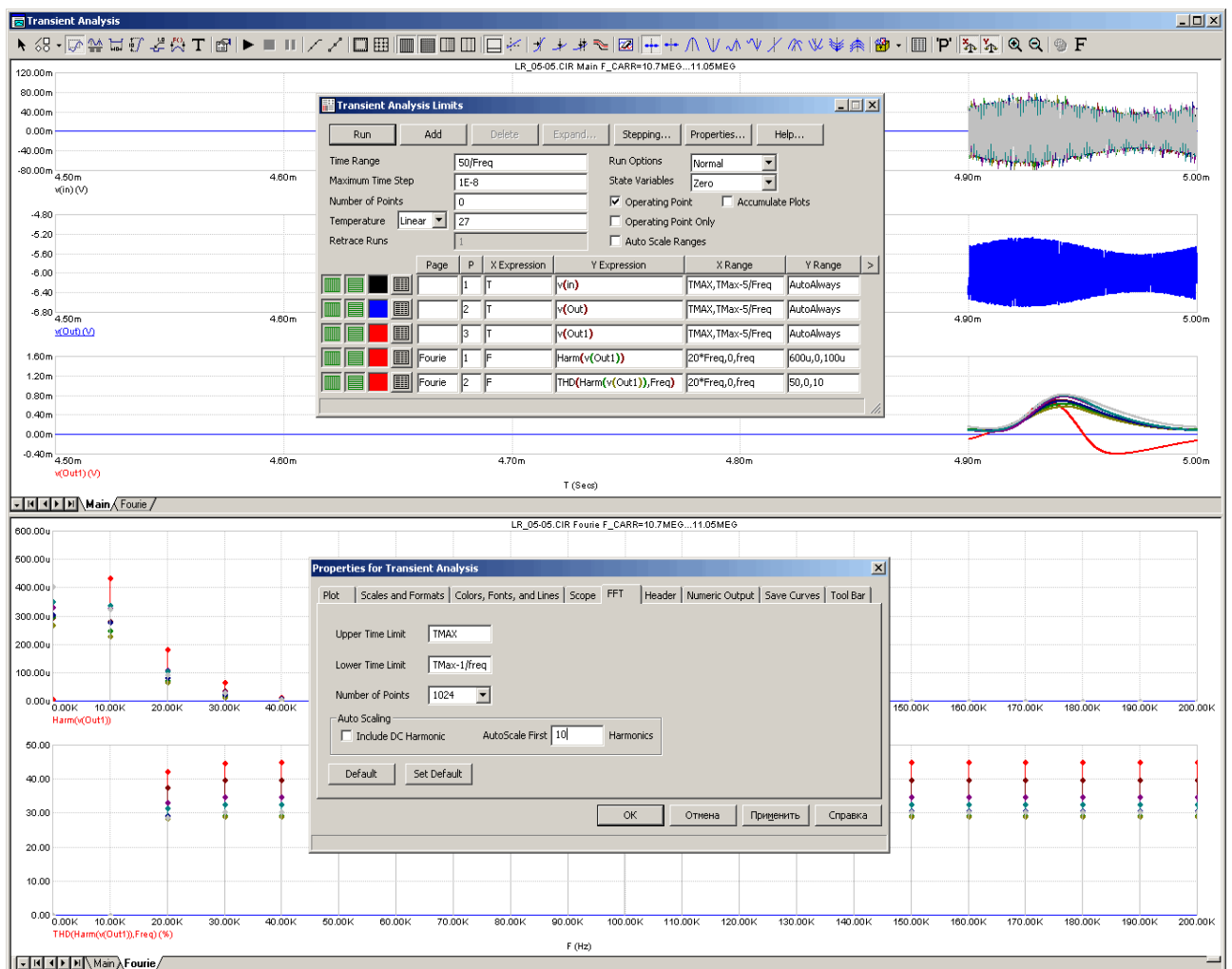


Рис. 1.39. Детектирование сигнала с паразитной амплитудной модуляцией

Следует отметить, что описанный процесс измерения значений 1-ой гармоники напряжения  $V(\text{Out1})$  с частотой  $\text{Freq}=10\text{кГц}$  и его коэффициента нелинейных искажений из серии графиков Фурье-анализа можно автоматизировать, воспользовавшись построением в отдельном окне графиков функций Performance (рис. 1.40). Для задания окна для последующего вывода опосредованных зависимостей следует выполнить команду **Transient>Performance Windows>Add Performance Window**.

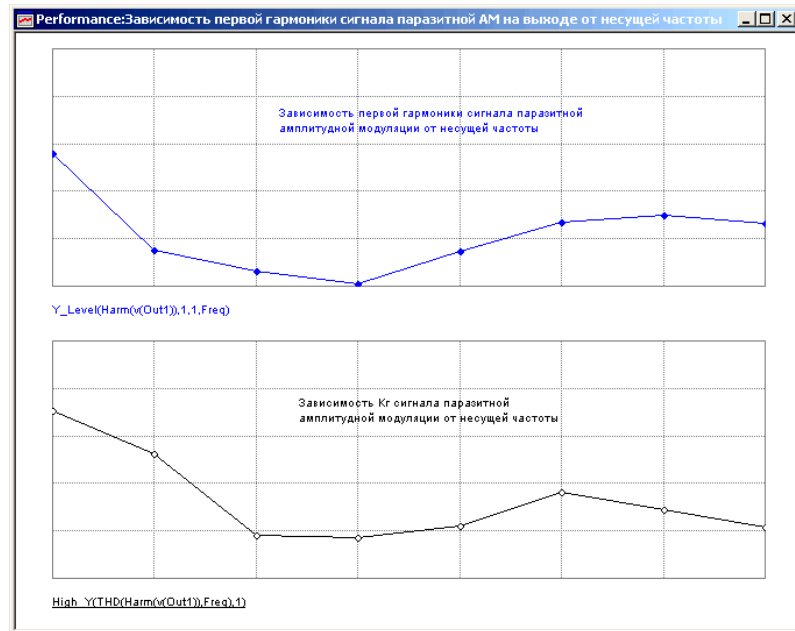


Рис. 1.40. Построение опосредованных зависимостей от несущей частоты  $F_{\text{сиг}}$

Для выполнения п. 2.2.7 необходимо включить на вход ЧД генератор ЧМ сигнала (рис. 1.41). При выполнении данного эксперимента удобно определить амплитуду несущего колебания в виде символьной переменной  $V_{\text{ain}}$  (рис. 1.41). Последовательно входя в режим *Transient Analysis>Stepping* выбираем пошаговое изменение символьной переменной *Symbolic*, затем саму переменную  $V_{\text{ain}}$ , и наконец, пределы и шаг ее изменения (рис. 1.42).

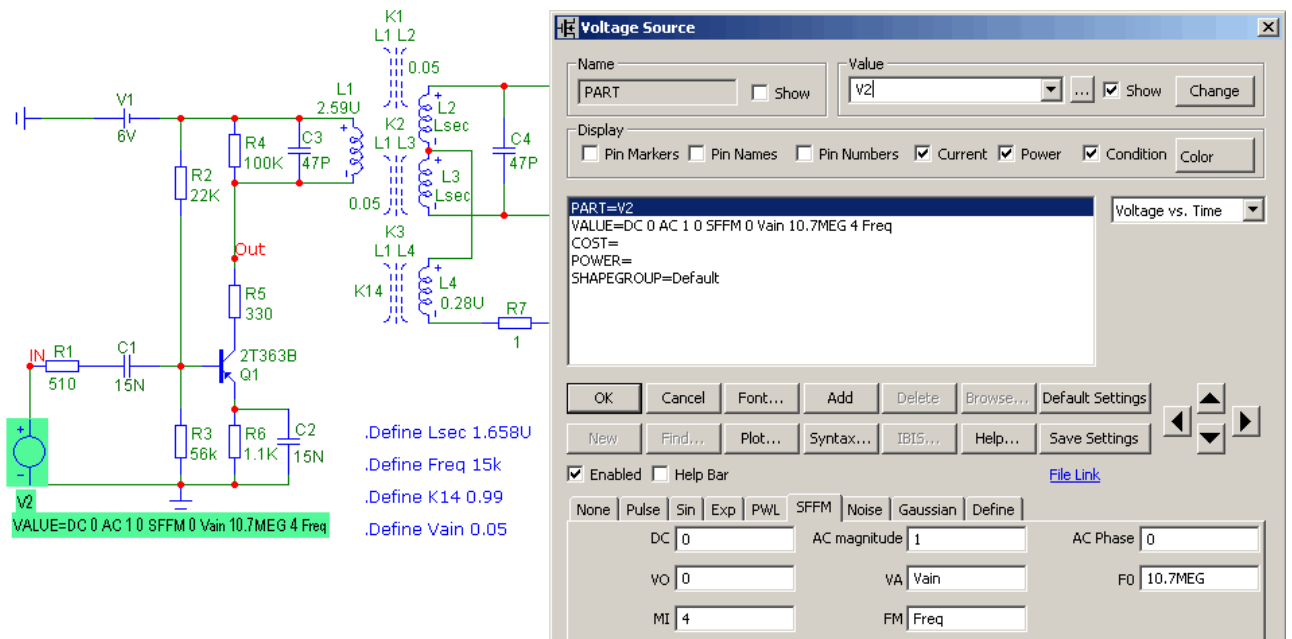


Рис. 1.41. Задание генератора ЧМ сигнала с переменной амплитудой несущего колебания

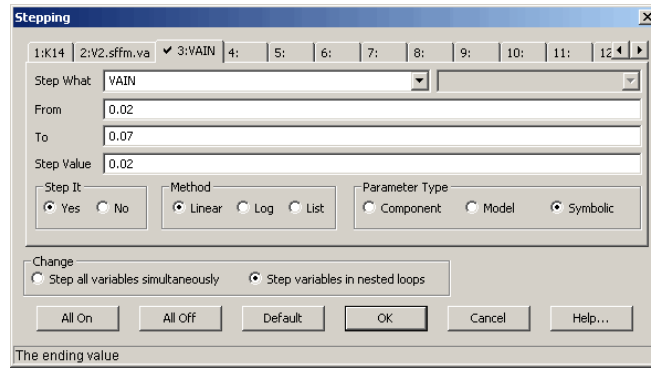


Рис. 1.42. Задание пошагового изменения амплитуды несущего колебания в ЧМ-сигнале

Возвращаясь в окно задания параметров анализа переходных процессов Transient Analysis Limits, указываем пределы временного и частотного анализа выходного детектированного сигнала (рис. 1.43). Следует заметить, что расчет сигнала на выходе ЧД для одного значения амплитуды входного сигнала составляет достаточно длительное время (примерно минуту).

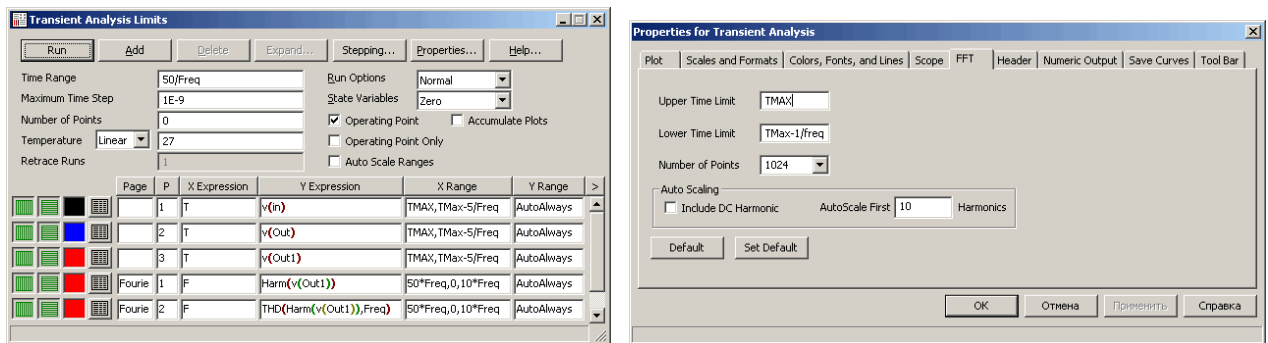


Рис. 1.43. Задание параметров анализа детектированного сигнала: а — временного; б — частотного

Результирующая характеристика зависимости амплитуды первой гармоники выходного напряжения  $V(out1)$  от амплитуды несущего колебания строится после окончания анализа переходных процессов в режиме построения опосредованных зависимостей (функций Performance). Для задания окна для последующего вывода опосредованных зависимостей следует выполнить команду *Transient>Performance Windows>Add Performance Window*. Появится окно задания построения графиков опосредованных зависимостей Performance (рис. 1.44, слева). Далее в нем нажатием кнопки *Get* открывается дополнительное окно выбора нужной зависимости (рис. 1.44, справа).

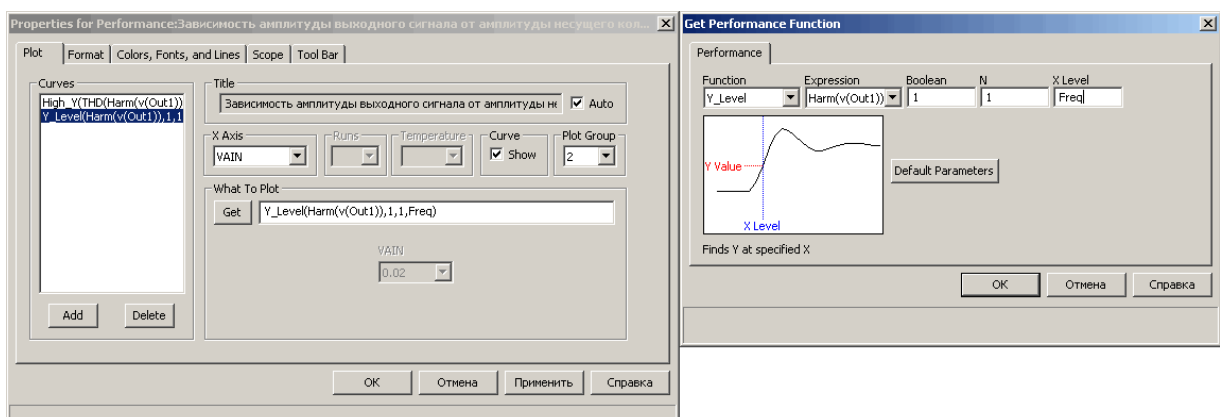


Рис. 1.44. Задание построения графика выбранной функции Performance

Искомые зависимости должны иметь следующий примерный вид рис. 1.45.

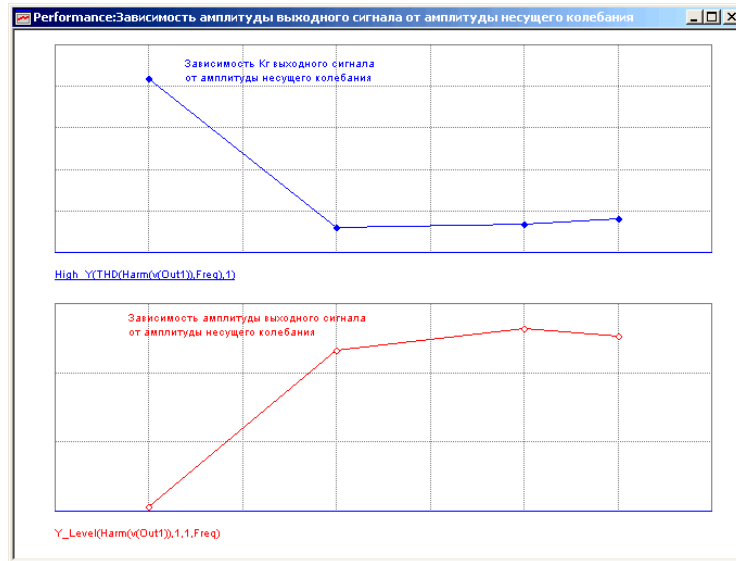


Рис. 1.45. Зависимость амплитуды выходного напряжения частотного детектора и его коэффициента гармоник от амплитуды несущего колебания

## 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. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Нарисуйте принципиальную схему дробного ЧД.
- 6.2. Нарисуйте принципиальную схему ЧД на связанных контурах. Объясните различие схем.
- 6.3. Нарисуйте структурную схему ЧД и объясните принцип работы.
- 6.4. Чем отличаются по принципу обработки сигнала ЧД на расстроенных и ЧД на связанных контурах?
- 6.5. Для чего необходима катушка связи в дробном ЧД?
- 6.6. Почему исследуемый детектор называется дробным? Подтвердите соотношением напряжений, действующих в схеме.
- 6.7. Каково назначение конденсатора С6 в принципиальной схеме дробного (рис. 1.1) ЧД?
- 6.8. Какой вид имеет векторная диаграмма дробного ЧД?
- 6.9. От чего зависит степень подавления паразитной АМ в дробном ЧД?
- 6.10. Каково соотношение резонансных частот контуров в УПЧ и ЧД? К чему приводит их различие?



## 7. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Широкое применение частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в современных радиотехнических системах и радиовещании связано с рядом преимуществ 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 со спектром АМ сигнала, 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:

$$B_{\text{фл}} = \sqrt{3} \cdot \beta, \quad B_{\text{имп}} = 2 \cdot \beta \quad (1.1),$$

где  $\beta$  — 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  $A_k = 0,01 \cdot U_0$ , где  $U_0$  — амплитуда немодулированного колебания:

$$\Delta F_{\text{ЧМ}} = 2F_{\text{max}} (1 + \beta + \sqrt{\beta}) \quad (1.2)$$

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

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

где  $\omega_n = 2\pi f_n$  — центральная (несущая) частота;  $\Delta\omega_d = 2\pi \Delta f_d$  — девиация

(наибольшее отклонение) частоты. Отсюда фаза

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_{\text{н}} \cdot t + \frac{\Delta\omega_{\text{д}}}{\Omega} \cdot \sin(\Omega t),$$

а напряжение ЧМ сигнала

$$u(t) = U \cos\varphi(t) = U \cdot \cos(\omega_{\text{н}} t + \beta \sin\Omega t) = U \cdot \cos[(\omega_{\text{н}} + \Delta\omega_{\text{д}} \cdot \cos(\Omega t)) \cdot t], \quad (1.3)$$

где индекс модуляции  $\beta = \Delta\omega_{\text{д}}/\Omega$ .

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

При действии на входе ЧД сигнала (рис. 1.46, а), несущая которого модулирована по гармоническому закону, напряжение на нагрузке должно изменяться согласно рис. 1.46, в.

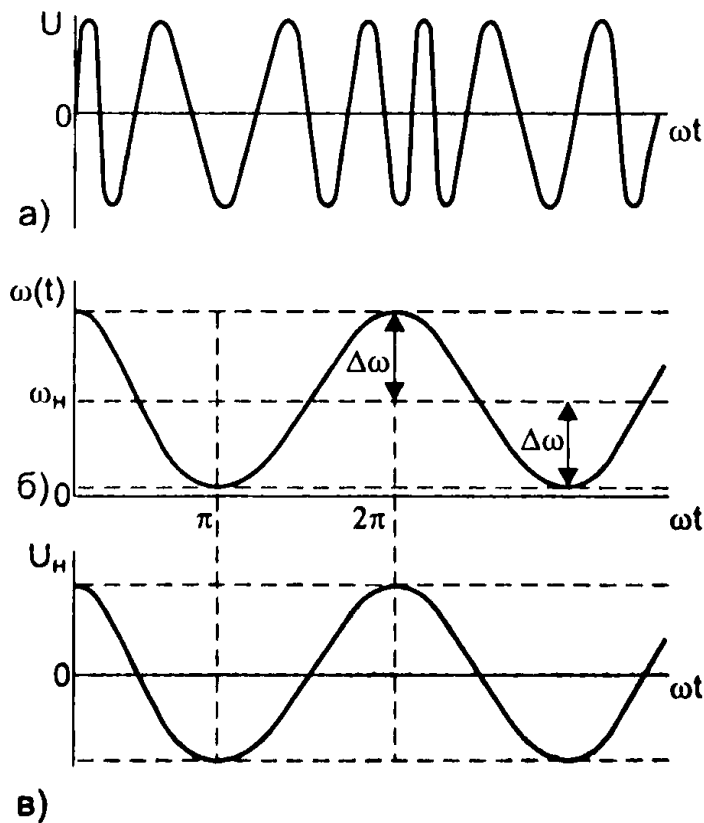


Рис. 1.46. Преобразование ЧМ сигнала частотным детектором

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. 1.47).

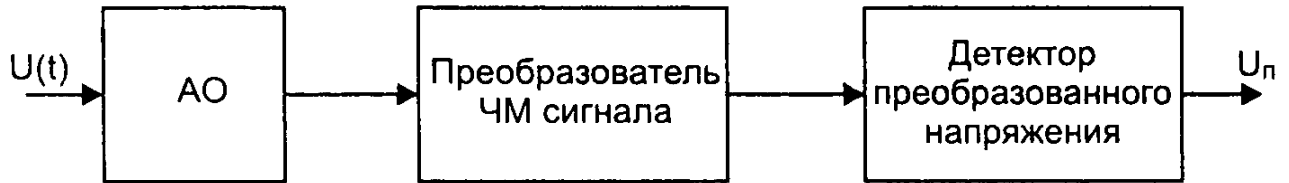


Рис. 1.47. Структурная схема частотного детектора

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  $k_\Gamma$

$$k_\Gamma = \frac{\sqrt{U_{2Qm}^2 + U_{3Qm}^2 + \dots}}{U_{Qm}} \quad (1.4)$$

где  $U_{Qm}$ ,  $U_{2Qm}$ ,  $U_{3Qm}$  — 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  $f_H - \Delta f_{\text{дmax}}$  до  $f_H + \Delta f_{\text{дmax}}$ , где  $f_H$  — частота, соответствующая нулю детекторной характеристики, обеспечивает минимум нелинейных искажений. Частота  $f_H$  называется переходной и для детекторов на связанных контурах или

дробных равна частоте несущего колебания и резонансной частоте контуров детектора.

Нелинейность детекторной характеристики определяется и диапазоне рабочих девиаций ( $\Delta f_d \leq f_{d\max}$ );

- коэффициент передачи детектора;

Коэффициент передачи детектора

$$K_{\text{чД}} = \frac{U_{\text{вых ст}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых ст м}}}{U_{\text{вх}} \cdot \sqrt{2}} = \frac{S_{\text{чД}} \cdot \Delta f_{\text{д ст}}}{\sqrt{2} U_{\text{вх}}}, \quad (1.5)$$

где  $U_{\text{вых ст}}$  — выходное напряжение, соответствующее стандартной девиации входного сигнала  $\Delta f_{\text{д ст}}$ ;  $S_{\text{чД}}$  — крутизна характеристики частотного детектора в линейной области;  $U_{\text{вх}}$  — амплитуда напряжения на входе оконечного каскада тракта промежуточной частоты (рис. 1.48).

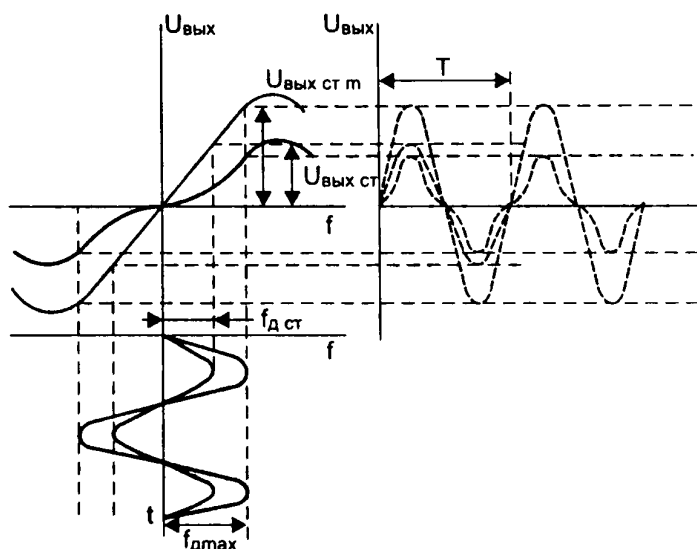


Рис. 1.48

$$S_{\text{Д}} = \left| \frac{\partial U_{\text{вых д}}}{\partial f} \right| \approx \frac{\Delta U_{\text{вых 0}}}{\Delta f}. \quad (1.6)$$

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. 1.49), определяющей зависимость остаточного выходного напряжения от частоты несущей входного амплитудно-модулированного сигнала. Коэффициент подавления АМ оценивает относительное подавление в наихудшей точке в полосе  $\pm \Delta f_{\text{д max}}$

$$q_{\text{АМ}} = \frac{U_{\text{вых ст}}}{U_{\text{вых АМ max}}} \quad (1.7)$$

или среднее подавления в этой полосе

$$q_{AM} = \frac{U_{вых ст} \cdot n}{\sum_{i=1}^n U_{вых AM i}}$$

где  $U_{вых AM i}$  — отсчеты характеристики подавления АМ, взятые через равные частотные интервалы  $\Delta f_i$ ;  $n$  — количество отсчетов;  $U_{вых ст}$  — стандартное выходное напряжение ЧМ сигнала. Для высококачественного приема частотно-модулированного сигнала необходимо иметь  $q_{AM} \approx 20-30$  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.

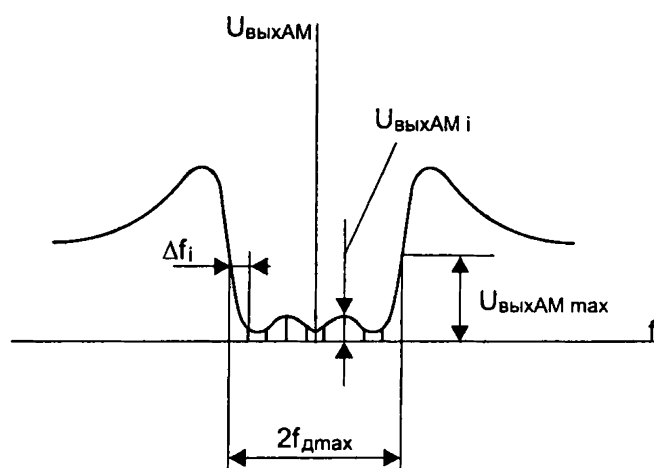


Рис. 1.49

- Коэффициент амплитудно-частотных и фазочастотных искажений.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики детектора определяется комплексным сопротивлением нагрузки  $Z_H$  и достигает наибольшей величины на верхней частоте модуляции  $F_{max}$  (рис. 1.50, а).

Фазовые искажения в детекторе оцениваются по нелинейности фазо-частотной характеристики (рис. 1.50, б). Поскольку ухо не реагирует на фазовые искажения, то для приемников звуковых сигналов фазовые искажения не нормируются.

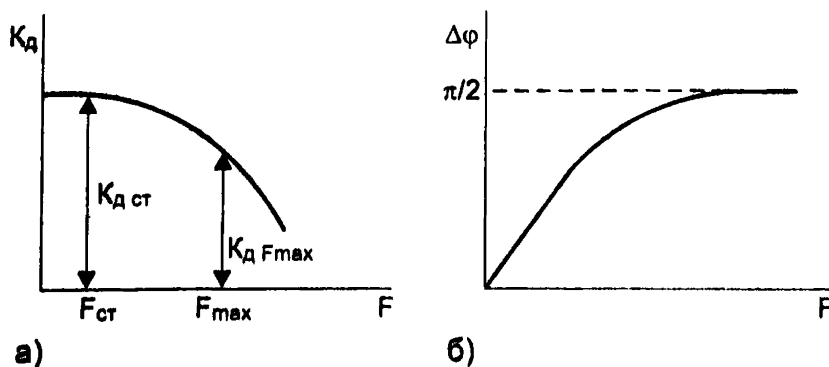


Рис. 1.50

Исследуемая и лабораторной работе схема (рис. 1.1) 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. 1.51.

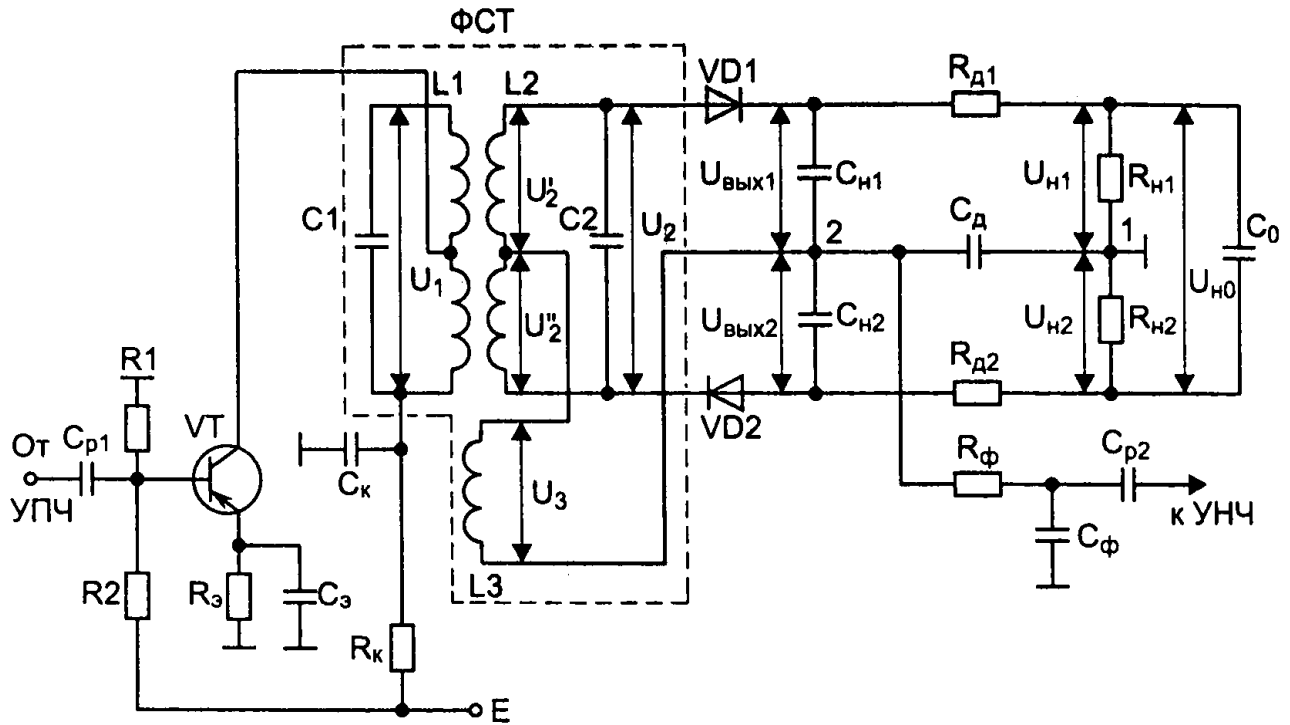


Рис. 1.51. Симметричный дробный частотный детектор

Схема детектора содержит фазосдвигающий трансформатор (ФСТ) с двумя настроенными на частоту сигнала  $L_1, C_1$ , и  $L_2, C_2$  контурами и два АМ детектора на последовательно включенных диодах  $VD_1$  и  $VD_2$ . Выходное напряжение снимается со средней точки делителя напряжения, состоящего из резисторов  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$ , каждый из которых шунтирован конденсатором  $C_{H1}$  и  $C_{H2}$ . Суммарное напряжение, с каждого плеча нагрузки  $U_{H0} = U_{H1} + U_{H2} \approx \text{const}$ , 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  $U_{H1}/U_{H2}$ , определяемых делителем  $R_{H1}, R_{H2}$ . Отсюда название детектора: детектор отношения, дробный детектор.

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

$$\tau_H = R_H C_H = (R_{H1} + R_{H2}) C_H \geq T_{AM} \quad (1.8)$$

где  $T_{AM}$  — период колебаний огибающей.

Последовательное включение диодов  $VD_1$  и  $VD_2$  обеспечивает разделение

цепей протекания постоянных и переменных токов. Фазосдвигающий трансформатор в ЧД использует понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации  $n_3 = \sqrt{\frac{L_1}{L_3}}$ , 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  $\bar{U}_3$  синфазен с вектором  $\bar{U}_1$ . Напряжение на первом контуре  $\bar{U}_1$ , создает, совпадающую с ней по фазе, ЭДС  $\bar{E}_2$  на втором контуре, и, вызывающую ток  $\bar{I}_2$ . Создаваемые им напряжения на полуобмотках катушки  $L_2$ , будут равны  $\bar{U}_2' = \bar{U}_2'' = U_2/2$  и противофазны. Напряжение  $U_3$  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. 1.52.

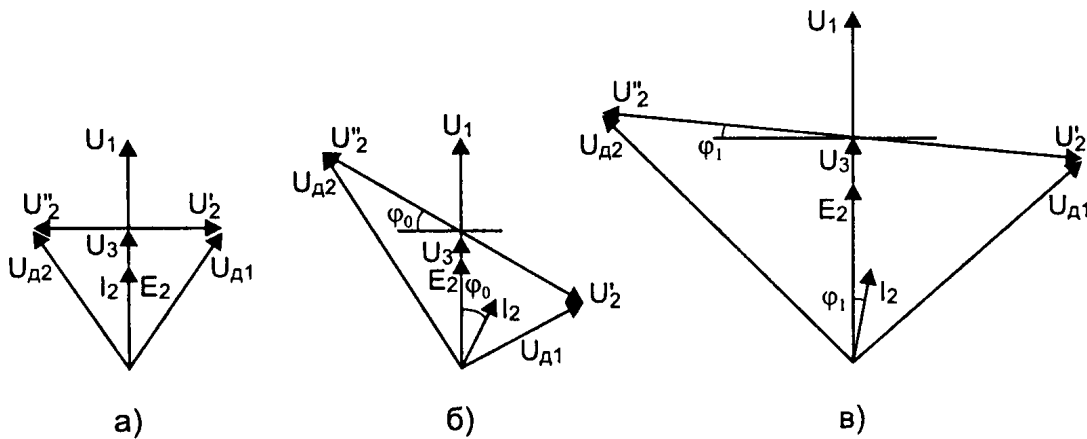


Рис. 1.52

На рис. 1.52 а вначале откладываем вектор  $\bar{U}_1$ , затем синфазный с ним вектор напряжения  $\bar{U}_3$ , затем вектор наведенной во втором контуре ЭДС  $E_2 = j\omega M \bar{I}_1 = j\omega M \bar{U}_1 / (r_1 + j\omega L_1) \cong M \bar{U}_1 / L_1$ , совпадающий по фазе с опорным напряжением  $\bar{U}_3$ . Ток во втором контуре, вызываемый ЭДС  $I_2 = E_2 / (r_2 + j(\omega L_2 - 1/(\omega C_2)))$ , при резонансе  $(\omega L_2 = 1/(\omega C_2)) \cdot \bar{I}_2 = \bar{E}_2 R_2$  совпадает по фазе с опорным напряжением  $\bar{U}_3$ . Напряжение на втором контуре, равное напряжению  $\bar{U}_2' = \bar{I}_2 / (j\omega C_2)$  на конденсаторе  $C_2$ , отстает от тока  $I_2$  на  $90^\circ$ .

Напряжение  $\bar{U}_2'$  на верхней полуобмотке  $L_2$ , приложенное к VD1, отстает от напряжения  $\bar{U}_3$  на  $90^\circ$ , а на нижней  $\bar{U}_2''$  — опережает на  $90^\circ$ . Сложив векторы напряжений  $\bar{U}_3$  с векторами  $\bar{U}_2'$  и  $\bar{U}_2''$  получим векторы напряжений, приложенных к диоду VD1  $\bar{U}_{D1} = \bar{U}_3 + \bar{U}_2' = \bar{U}_3 - \bar{U}_2 / 2$  и диоду VD2  $\bar{U}_{D2} = \bar{U}_3 + \bar{U}_2'' = \bar{U}_3 + \bar{U}_2 / 2$

При равенстве напряжений на диодах  $\bar{U}_{D1}$  и  $\bar{U}_{D2}$  через оба диода про-



текает единая постоянная составляющая тока  $I_0$ , а напряжение  $U_{H0}=I_0(R_{H1}+R_{H2})$ . При этом  $U_{\text{вых}}=0$ . Увеличение амплитуды входного сигнала приводит к пропорциональному увеличению всех векторов, сохраняя равенство  $|\bar{U}_{D1}|=|\bar{U}_{D2}|$ , т. е. амплитудная модуляция на выходе детектора отсутствует (1.9, 1.10).

Разделение цепей переменных составляющих каждого тока диода при общем постоянном токе приводит к тому, что при расстройке входного сигнала относительно резонансной частоты, выпрямленные напряжения  $U_{H1} \neq U_{H2}$ , а значит и углы отсечки тока различны  $\theta_1 \neq \theta_2$ , при неизменности постоянного тока диодов. Для условия  $f > f_0$  (рис. 1.51) большему высокочастотному напряжению ( $U_{D1} > U_{D2}$ ) 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  $C_{H1}$ ,  $C_{H2}$ ,  $C_0$ .

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} - U_{H0} / 2, \quad (1.9)$$

а  $U_{H0} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}}.$

Отсюда

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}) / 2. \quad (1.10)$$

В первом приближении для АД  $U_{\text{вых1}} = U_{D1} \cdot \cos \theta_1$ ,  $U_{\text{вых2}} = U_{D2} \cdot \cos \theta_2$ , тогда

$$U_{\text{вых}} = (U_{D2} \cdot \cos \theta_2 - U_{D1} \cdot \cos \theta_1) / 2. \quad (1.11)$$

Как следует из (1.9), выходное напряжение определяется напряжениям на диоде и выпрямленным напряжением  $U_{H0}$ , 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  $U_{H0} = \text{const}$ .

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  $U_{D1}$  и  $U_{D2}$ , тем меньше  $\cos \theta_1$ , и  $\cos \theta_2$  и, следовательно, тем больше углы отсечки  $\theta_1$ , и  $\theta_2$ . В тоже время, чем больше  $\theta_1$ , и  $\theta_2$ , тем сильнее в соответствие с (1.12) шунтирующее действие диодных детекторов на колебательные контуры, т. к. входное сопротивление диодных детекторов

$$R_{\text{вх}} = \frac{\pi \cdot R_H}{\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (1.12)$$

При уменьшении амплитуды входного сигнала (при  $U_{H0} = \text{const}$ ) 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. 1.52, б.

Положение векторов напряжений  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{U}_3$ ,  $\bar{E}_2$  аналогично резонансному случаю. Ток, создаваемый  $\bar{E}_2$ , будет отставать от вектора ЭДС на угол  $\phi_0$ , т. к.

$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_2}{r_2 + j(\omega L_2 - 1/(\omega C_2))}$ , а контур эквивалентен индуктивности. Напряжение  $\bar{U}_2$  на конденсаторе отстает от тока  $\bar{I}_2$  на  $90^\circ$ . Напряжение на верхней полуобмотке катушки  $L_2$  равное  $\bar{U}_2/2$  отстает от тока  $\bar{I}_2$ , а напряжение на  $VD_2$  опережает ток на  $90^\circ$ . Складывая вектора  $\bar{U}_3$  и напряжения на индуктивности  $L_2$ , получим векторы напряжений, действующих на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$ . Как следует из (1.11), это приводит к появлению выходного напряжения, отличного от нуля. Для относительно быстрых, по сравнению с периодом модулирующих 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  $U_{д2}$ , а это приводит к увеличению углов отсечки и к уменьшению входного сопротивления АД (1.12). Падение нагруженной добротности второго контура вызывает уменьшение модулей  $\bar{I}_2$ ,  $\bar{U}'$ ,  $\bar{U}''$  и уменьшению фазового сдвига между ЭДС и током вторичного контура  $\varphi_1 < \varphi_0$  (рис. 1.52, в), что резко уменьшает разницу между напряжениями на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$   $(\bar{U}_{д1} - \bar{U}_{д2}) < (\bar{U}_{д1} - \bar{U}_{д2})_0$  и, связанную с ней величину выходного напряжения (1.11). 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 (1.12) 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. 1.51) 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  $VD_1$ , при-

ращение тока  $\Delta I_{\text{ВП}}$  совпадает с направлением тока  $I_{\text{ВП}}$ . В тоже время напряжение на диоде  $VD_2$ , уменьшилось, значит уменьшился выпрямленный ток, что эквивалентно протеканию приращения выпрямленного тока  $\Delta I_{\text{ВП}}$  также от контура к нагрузке.

По переменному току резисторы  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  включены параллельно, т. к. конденсатор  $C_0$  представляет собой короткое замыкание для токов низкой частоты и нагрузкой каждого детектора АМ является сумма  $R_{H1} + R_{\text{вх УНЧ}}$ .  $R_{1VU1M}$ . Падение напряжения на этой нагрузке при протекании тока  $2\Delta I_{\text{ВП}}$ :

$$U_H = 2\Delta I_{\text{ВП}} (R_{\text{вх УНЧ}} + R_{H1} / 2) = \Delta I_{\text{ВП}} (2 \cdot R_{\text{вх УНЧ}} + R_{H1}) \quad (1.13)$$

Уравнение (1.13) позволяет построить эквивалентную схему детектора отношении для токов низкой частоты (рис. 1.53).

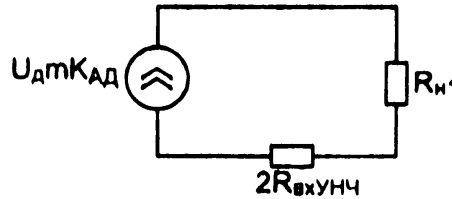


Рис. 1.53. Эквивалентная схема детектора для НЧ

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

$$U_{\text{вх УНЧ}} = \frac{U_D \cdot K_{AD} \cdot m 2R_{\text{вх УНЧ}}}{2 \cdot R_{\text{вх УНЧ}} + R_{H1}} \quad (1.14)$$

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

$$m = \frac{(\sqrt{1 + (\xi + \psi)^2} - \sqrt{1 + (\xi - \psi)^2}) \sqrt{1 + \psi^2}}{2 \cdot \sqrt{1 + \psi^2 - \xi^2} + 4\xi^2} \quad (1.15)$$

где  $Q_H$  — нагруженная добротность колебательного контура; а  $Q_0$  — ненагруженная добротность, без учета влияния на контур подключенных элементов;  $\psi$  — параметр связи.

Формула (1.15) 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 (1.15), 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:

$$U_1 = U_{\text{вх}} \cdot m_k \cdot \frac{|Y_{21}|}{(g_k + g_{\text{вх}}/2) \cdot (1 + \psi^2)} \quad (1.16)$$

$$U_2 = U_{\text{вх}} \cdot m_k \cdot \frac{|Y_{21}|}{(g_k + g_{\text{вх}}/2) \cdot (1 + \psi^2)} \quad (1.17)$$

где  $\psi$  — параметр связи;  $m_k$  — отношение напряжения на коллекторе к напряжению на первом контуре.

Для оптимально реализованного фазосдвигающего трансформатора  $L_3 = L_1 \cdot k_{\text{св}}^2 / 4$ ,  $U_3 = U_1 / 2$ , а напряжение на диоде  $U_{\text{д}}$  — геометрическая сумма напряжений  $U_3$ , и  $U_1 / 2$ , тогда из уравнений (1.15), (1.16) имеем

$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх}} \cdot m_k \cdot \frac{|Y_{21}|}{(2g_k + g_{\text{вх}}) \cdot (1 + \psi^2)} \quad (1.18)$$

откуда значение амплитуды напряжения на входе окончного каскада УПЧ

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{д}} (2g_k + g_{\text{вх}}) \cdot (1 + \psi^2)}{m_k \cdot |Y_{21}|} \quad (1.19)$$

Определяя коэффициент передачи частотного детектора как отношение напряжения на входе каскада УНЧ (1.14) к напряжению на входе окончного каскада УПЧ (1.18) с учетом (1.17) получим

$$K_{\text{чд}} = \frac{2K_{\text{АД}} \cdot |Y_{21}| \cdot m_k \cdot R_{\text{вхУН}} \cdot m}{(2g_k + g_{\text{вх}}) \cdot (2R_{\text{вхУП}} + R_1) \cdot \sqrt{1 + \psi^2}} \quad (1.20)$$

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

Значение коэффициента передачи частотного детектора увеличивается (1.19) 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  $i = i_0(\exp(\gamma \cdot u_{\text{д}}) - 1)$ . В этом случае коэффициент передачи детектора АМ на низкой частоте определяется соотношением

$$K_{\text{АД}} = \frac{\frac{J_1(B_C)}{J_0(B_C)}}{1 + \frac{\nu}{A + B_C K_{\text{д}}}} \quad (1.21)$$

где  $A = \gamma i_0 R_1$ ,  $B_C = 1,41 \gamma u_{\text{д}}$ ,  $K_{\text{д}}$ , — коэффициент передачи АД по постоянному току,  $J_0$ ,  $J_1$ , — функции Бесселя нулевого и первого порядков,  $\nu$  — отношение сопротивления нагрузки детектора по постоянному току к сопротивлению нагрузки по переменному току

$$\nu = \frac{R_1}{2 \cdot R_{\text{вх.УНЧ}} + R_1}$$

Для известной величин  $R_{\text{вх.УНЧ}}$ , 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  $K_{\text{Д}}$ .

## 8. ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоприемные устройства / Под ред. **Н. Н. Фомина**. М.: РиС, 2003. 512 с.
2. 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.
3. Проектирование радиоприемных устройств / С. М. Клич, А. С. Кривенко и др. / под ред. **А. П. Сиверса**. М: СР, 1976. 486 с.
4. Основы электроники, радиотехники и связи: Учебное пособие для вузов / А. Д. Гуменюк, В. И. Журавлев, Ю. Ю. Мартюшев и др.; Под редакцией Г.Д. Петрухина. — М.: Горячая линия - Телеком, 2008. — 480 с.: ил.
5. **Амелина М. А., Амелин С. А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 464 с. ил.
6. **Амелина М.А., Амелин С.А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. — Смоленск, СФ МЭИ, 2012. — 617 с., ил. [МС9-10\\_СФМЭИ.pdf](#).
7. <http://www.spectrum-soft.com/download.shtm> (адрес в Internet для получения студенческой версии CCM Micro-Cap).  
[Micro-Cap 9](#), [Micro-Cap 10](#).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Характеристика германиевого точечного диода, аппроксимированная экспонентой  $i=i_0(\exp(\gamma u_{\text{д}})-1)$  содержит коэффициенты, определяемые примерно как:  $i_0=3$  мкА,  $\gamma=29$  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  $2\Pi=450$  кГц, для частоты входного сигнала равной промежуточной частоте и резонансной частоте контуров  $f_0=10,7$  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:

$$C_{\text{к}}=1/(2\pi f_0 R_{\text{вх.УНЧ}} d_{\text{Э}} d_{\text{Э0}} (Q_{\text{Э0}}-Q_{\text{Э}})).$$

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

$$C_{кз} = C_k + C_m + C_d/2,$$

где  $C_m = 5-10$  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 величины связи между катушками  $L_1$  и  $L_3$ , ( $k_{св} = 0,99$ ) и, коэффициента трансформации, выбираемого в пределах  $n_3 = 3,5-4,5$ , для приемников первой и высшей группы сложности.

Значение коэффициента передачи ЧД определяется по формуле (1.20) для выбранной аппроксимации ВАХ диода и соотношения (1.21).

Нормированные значения коэффициента передачи по постоянному току и входного сопротивления АД [3] от уровня входного сигнала приведены на рис. П.1.

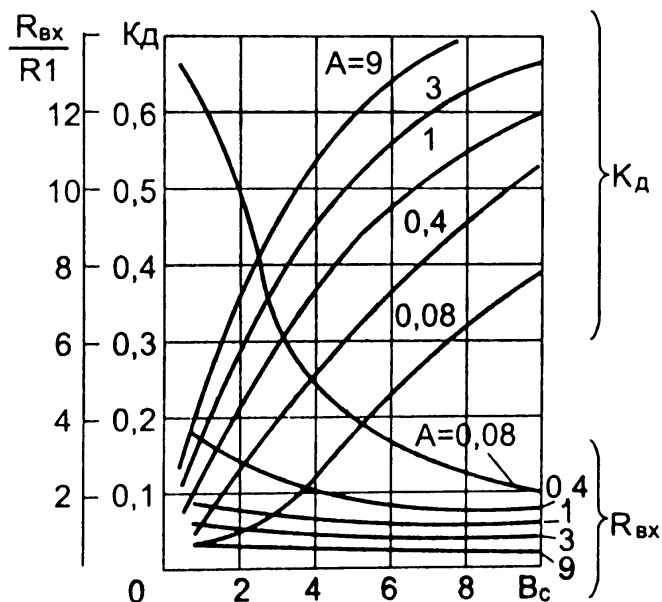


Рис. П.1