

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

Богомолов С. И.

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ**

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки 11.03.02  
по дисциплине Сигналы электросвязи

Томск – 2021

УДК 621.391

ББК 32.841

Б 744

**Рецензент:**

**Попова А. И.**, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа, канд. физ.-мат. наук

**Богомолов, Сергей Ильич**

Б 744 Нелинейные цепи: Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 11.03.02 по дисциплине Сигналы электросвязи / С. И. Богомолов. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2021. - 36 с.

Настоящие учебно-методическое пособие содержит методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине Сигналы электросвязи. Вторая часть лабораторного практикума по данной дисциплине имеет целью ознакомить студентов с методикой исследования нелинейных электронных цепей и основными принципами формирования сигналов в устройствах радиотехники и связи.

Одобрено на заседании кафедры ТОР, протокол № 7 от 1 апреля 2021 г.

УДК 621.391  
ББК 32.841

© Богомолов С. И., 2021  
© Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Лабораторная работа № 1 .....	5
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УСИЛИТЕЛЯ И УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ .....	5
2 Лабораторная работа № 2 .....	18
ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ .....	18
3 Лабораторная работа № 3 .....	25
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АМ КОЛЕБАНИЙ .....	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	33
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по курсу "Сигналы электросвязи" имеет целью закрепить и расширить теоретические знания студентов в области радиоэлектроники, ознакомить их с методикой исследования электронных схем и дать практические навыки в работе с основными радиоизмерительными приборами.

Вторая часть лабораторного практикума, предназначенного для студентов направления подготовки 11.03.02, содержит описание следующих работ:

1. Исследование нелинейного усилителя и умножителя частоты.
2. Исследование амплитудной модуляции.
3. Исследование детектирования АМ колебаний.

Лабораторные работы данного перечня выполняются на базе пакета программ схемотехнического моделирования QUCS. Программный продукт Qucs – это один из симуляторов электрических цепей с открытой лицензией, который может работать под управлением операционных систем Windows, Linux. Русифицированную версию можно скачать в ЛВС кафедры ТОР: S:\FreeSoftware\Qucs\, либо в одном из возможных источников в сети интернет, например, <https://soft.mydiv.net/win/download-Qucs.html>.

## 1 Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО УСИЛИТЕЛЯ И УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Целью выполнения работы является:

- освоение методики выбора параметров расчёта в настройки нелинейного резонансного усилителя и умножителя частоты;
- исследование режимов работы нелинейного резонансного усилителя и измерение его параметров;
- исследование амплитудных характеристик нелинейного усилителя в различных режимах;
- исследование удвоителя частоты с отсечкой тока;
- исследование квадратичного режима удвоения частоты.

#### Определения и расчетные формулы

В работе исследуются линейный и нелинейный режим усиления электрических колебаний и умножение частоты гармонических колебаний. На вход УЭ может подаваться колебание большой амплитуды, в результате этого коллекторный ток УЭ не повторяет форму входного сигнала.

Принцип работы усилительного элемента в нелинейном режиме иллюстрируется рисунком 1.1.

Как видно из рисунка 1.1 при гармоническом входном большой амплитуды сигнале коллекторный ток имеет форму усеченных косинусоидальных импульсов и, следовательно, содержит большое число гармоник, из которых полезной в усилительном режиме является первая, а в режиме умножения та гармоника, которая соответствует коэффициенту умножения частоты ( $n$ ). Нужная гармоника выделяется с помощью избирательной нагрузки (одиночный контур или связанные контуры).

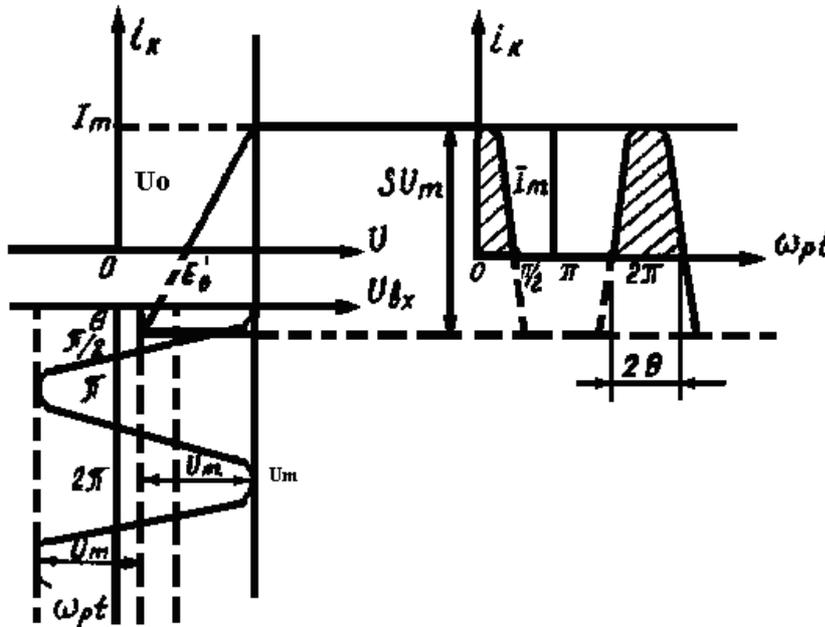


Рис. 1.1 Работа нелинейного элемента в режиме «большого» сигнала

Амплитуда импульса коллекторного тока определяется выражением:

$$I_m = S * U_m (1 - \cos \theta), \quad (1.1)$$

где  $S$  – крутизна характеристики УЭ,

$U_m$  - амплитуда напряжения входного сигнала,

$\theta$  - угол отсечки коллекторного тока, определяемый напряжением запираания УЭ  $E_0'$ , напряжением смещения  $U_0$  и входной амплитудой  $U_m$ :

$$\cos\theta = \frac{E_0' - U_0}{U_m} \quad (1.2)$$

Амплитуда  $n$ -й гармоники может быть найдена по формуле:

$$I_n = \alpha_n(\theta) I_m, \quad (1.3)$$

где  $\alpha_n(\theta)$ - коэффициенты разложения косинусоидальных импульсов в ряд Фурье или коэффициенты Берга, величина которых определяется номером гармоники и зависит только от угла отсечки  $\theta$ . Значение коэффициентов Берга берутся из таблиц или графиков либо вычисляются по определённым формулам.

Относительная амплитуда каждой гармоники в импульсе коллекторного тока достигает наибольшего значения при определенном (оптимальном) угле отсечки  $\theta_{opt}$  равном:

$$\theta_{opt} \approx 120^\circ/n$$

Амплитуду напряжения на контуре можно найти по формуле:

$$U_{mn} = I_{mn} \cdot R_p, \quad (1.4)$$

где  $R_p$  – резонансное сопротивление контура.

Используя формулы (1.1), (1.3), (1.4), напряжение на контуре в режиме усиления будет равно:

$$U_{m1} = \alpha_1(\theta) \cdot S \cdot U_m (1 - \cos\theta) \cdot R_p \quad (1.5)$$

где  $\alpha_1(\theta)$ - можно вычислить по формуле:

$$\alpha_1(\theta) = \frac{\theta - \cos\theta \sin\theta}{\pi(1 - \cos\theta)} \quad (1.6)$$

Зависимость амплитуды выходного напряжения  $U_{m1}$  от амплитуды входного напряжения  $U_m = f(U)$  называется колебательной характеристикой, форма которой зависит от положения рабочей точки на характеристике нелинейного элемента.

Основным достоинством нелинейного режима усиления является высокий коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_{\sim} / P_o, \quad (1.7)$$

где  $P_{\sim} = I_{m1} U_{m1} / 2$  - полезная мощность сигнала, вычисляемая на нагрузке,

$P_o = I_o E$  - мощность, подводимая к усилителю от источника питания,

$I_o$  - постоянная составляющая коллекторного тока,

$E$  - напряжение питания.

### **Предварительная подготовка**

Предварительная подготовка заключается в следующем:

1. Изучить схемы резонансного усилителя и умножителя частоты.

2. Задавшись максимальным импульсом коллекторного тока

$I_m = 40-50$  мА и крутизной характеристики нелинейного усилительного элемента  $S = 75$  мА/В, рассчитать значения напряжения смещения  $U_0$  и амплитуду входного сигнала  $U_m$ , необходимые для обеспечения режима нелинейного усиления с углом отсечки  $\theta = 90^\circ$  и режима удвоения  $\theta = 60^\circ$ , приняв напряжение запираания  $E_0 = 0.4$  В.

3. Рассчитать коэффициент усиления резонансного усилителя в линейном (рабочая точка на середине линейного участка характеристики) и нелинейном режимах. Параметры нагрузки для каждого рабочего места приведены в таблице 0.1.

4. Рассчитать коэффициент передачи усилителя в режиме с отсечкой тока.

5. Изобразить примерные колебательные характеристики усилителя в линейном и нелинейном режимах.

6. Ознакомиться с лабораторным заданием, контрольными вопросами и подумать, какие таблицы и графики нужны при выполнении работы.

7. Изобразить спектральные диаграммы входного сигнала, тока нелинейного элемента, выходного сигнала усилителя и умножителя частоты.

### ***Лабораторное задание***

1. Ознакомиться с описанием и схемой модели "Нелинейные цепи".

2. Снять статическую характеристику усилительного элемента путем изменения напряжения смещения на входе нелинейного элемента в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.2. УЭ выбирать в соответствии с номером студента в списке группы из таблицы 0.1.

3. Построить полученную характеристику в крупном масштабе и аппроксимировать её отрезками прямых линий. Эта характеристика может быть использована и при выполнении последующих лабораторных работ.

4. По полученной характеристике уточнить расчёты в домашнем задании.

5. Собрать схему для исследования резонансного усилителя. (Рис.1.6). Установить частоту сигнала равной резонансной частоте нагрузочного контура. Снять и построить частотные характеристики.

6. Снять колебательные характеристики усилителя для двух значений напряжения смещения:

а)  $U_{01}$  - на середине линейного участка характеристики;

б)  $U_{02}$  - соответствует углу отсечки  $90^\circ$ .

Указанные зависимости построить на одном графике. Определить коэффициенты усиления для линейных участков колебательных характеристик и сравнить с расчётными данными.

7. Исследовать режим удвоения частоты с отсечкой тока УЭ. Измерить коэффициент передачи удвоителя и зарисовать характерную осциллограмму выходного напряжения.

8. Исследовать эффект удвоения частоты за счёт квадратичного участка характеристики УЭ.

9. Включить вместо колебательного контура резистор  $R_1=100$  Ом и исследовать зависимость формы тока усилительного элемента и выходного сигнала удвоителя частоты в различных режимах работы от амплитуды входного сигнала.

### ***Методические указания по выполнению лабораторного задания***

Установить свободно распространяемый продукт QUCS на своем компьютере, используя приведенные выше ссылки, либо поисковые системы интернета.

Запустить программу QUCS. Ознакомиться с основными приемами работы в ней.

Первые шаги работы с QUCS изложены непосредственно в программе в разделе «Справка. Быстрый старт». Более подробная информация содержится в руководстве «Work book», размещенной на ресурсе данного занятия. В частности, в разделе.3. «DC анализ, развертка параметра и модели устройств» более подробно анализируется процесс моделирования нелинейных устройств.

#### ***А) Исследование статической характеристики нелинейного элемента***

Для определения статической характеристики УЭ собирается схема, приведенная на рисунке 1.2.

Компоненты схемы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивностей...) выбираются в Главном прикрепляемом окне (слева от основной схемы) во вкладке «Компоненты» >> «Дискретные компоненты». Источники постоянного и переменного тока в разделе «Компоненты» >> «Источники», измерители – в разделе «Измерители». Режимы моделирования за-

даются выбором соответствующих опций во вкладке «Компоненты» >> «Виды моделирования».

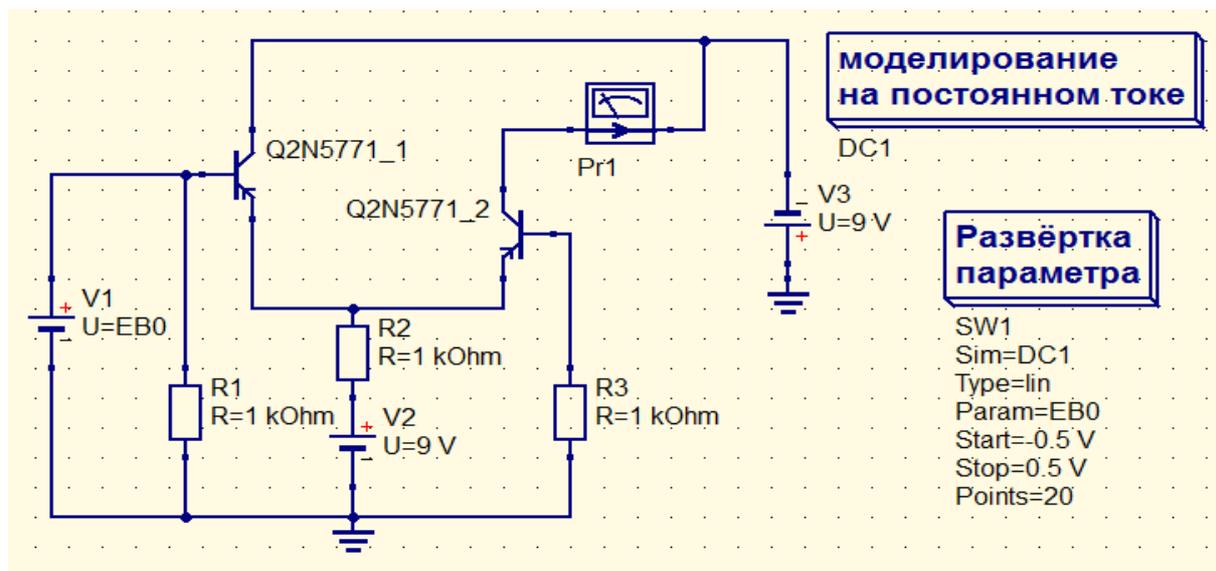


Рисунок 1.2 Схема для определения статической характеристики УЭ

Транзисторы в соответствии с вариантом выбираются во вкладке «Библиотеки» в разделе «Transistors». Параметры индивидуального задания (типы и номиналы компонентов, используемых в работе) приведены в таблице А.1 Приложения.

Для изменения параметров элемента или вида моделирования следует активировать этот объект двойным кликом. Например, компонент программы «Развертка параметра» (величина напряжения источника постоянного смещения нелинейного элемента) при его активации принимает вид, приведенный на рисунке 1.3. В данном случае, изменяется величина напряжения источника (параметр EB0) в пределах от -0.5 V до + 0.5 V. Обратите внимание, что в данной программе в качестве разделителя целой и дробной частей используется точка.

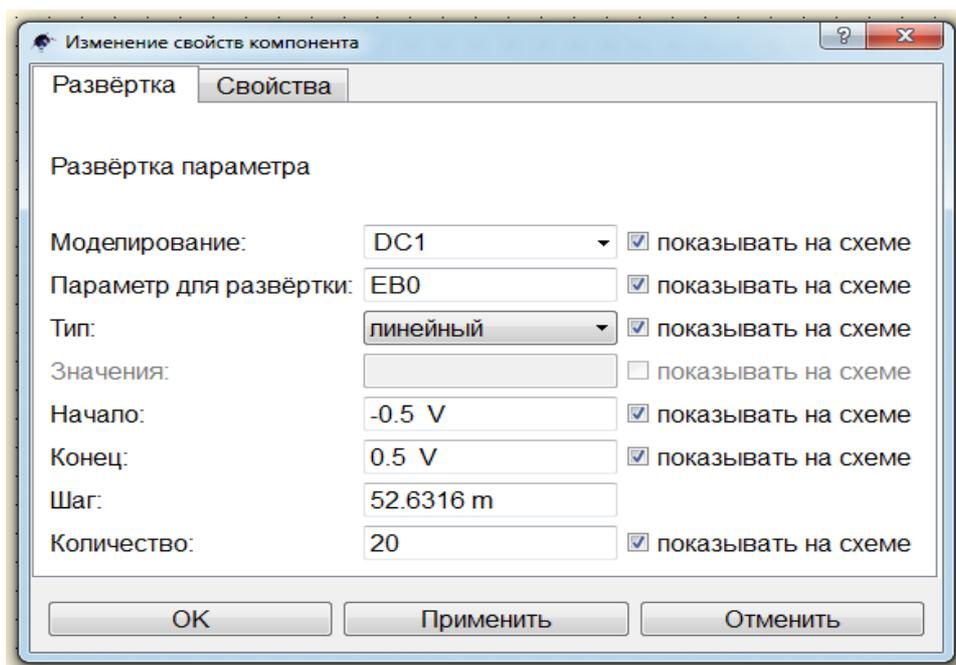


Рисунок 1.3 Окно изменения параметров вида моделирования «Развертка параметра»

По окончании построения схемы ее следует сохранить с уникальным именем и запустить на «Моделирование» (F2). Если при моделировании будут обнаружены ошибки, появятся соответствующие сообщения (просмотр сообщений – по клавише F5). Вернуться в режим «Моделирование» можно после устранения замечаний по ошибкам.

При отсутствии ошибок в проекте моделирование пройдет успешно, и в программе откроется новое окно. Следует вернуться в предыдущее окно и вывести результаты моделирования в виде таблиц либо графиков.

Для этого надо перетащить на основную схему необходимый вид графика или таблицы из раздела «Компоненты» >> «Диаграммы». После активации этого компонента откроется вкладка изменения параметров данного графика. Например, для «Декартовой диаграммы» вкладка изменения параметров принимает вид, приведенный на рисунке 1.4.

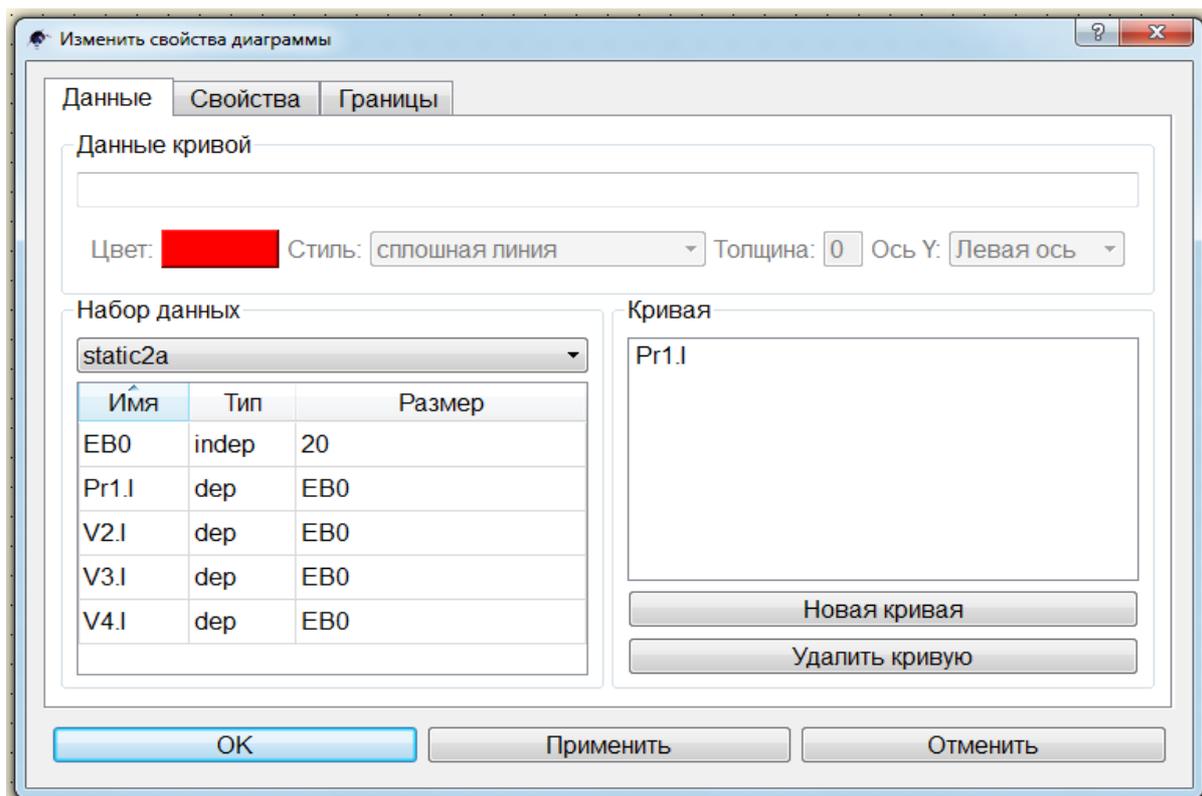


Рисунок 1.4 Окно изменения параметров вида диаграммы «Декартовая»

Двойным кликом выбирается график зависимости Pr1.I от EB0, и в окне «Кривая» появляется соответствующая запись. Если больше не надо чертить других кривых, выбирается «Ок», и на основной схеме формируется график, подобный приведенному на рисунке 1.5.

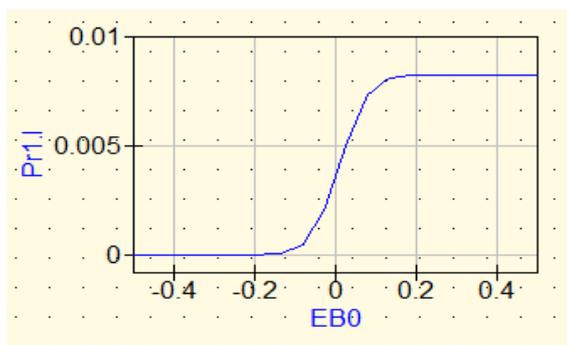


Рисунок 1.5 График зависимости тока нелинейного элемента (Pr1.I [A]) от напряжения смещения на нелинейном элементе (EB0[V])

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Сопротивление нагрузки УЭ выбрано таким, что статическая и динамическая характеристики УЭ практически совпадают.

*В) Исследование резонансного усилителя.*

*В,1) Настройка усилителя в резонанс*

Для выполнения данного пункта задания в программе собирается каскад резонансного усилителя на основе схемы, приведенной на рисунке 1.6. Параметры схемы выбираются в соответствии с вариантом индивидуального задания (таблица А.1 Приложения).

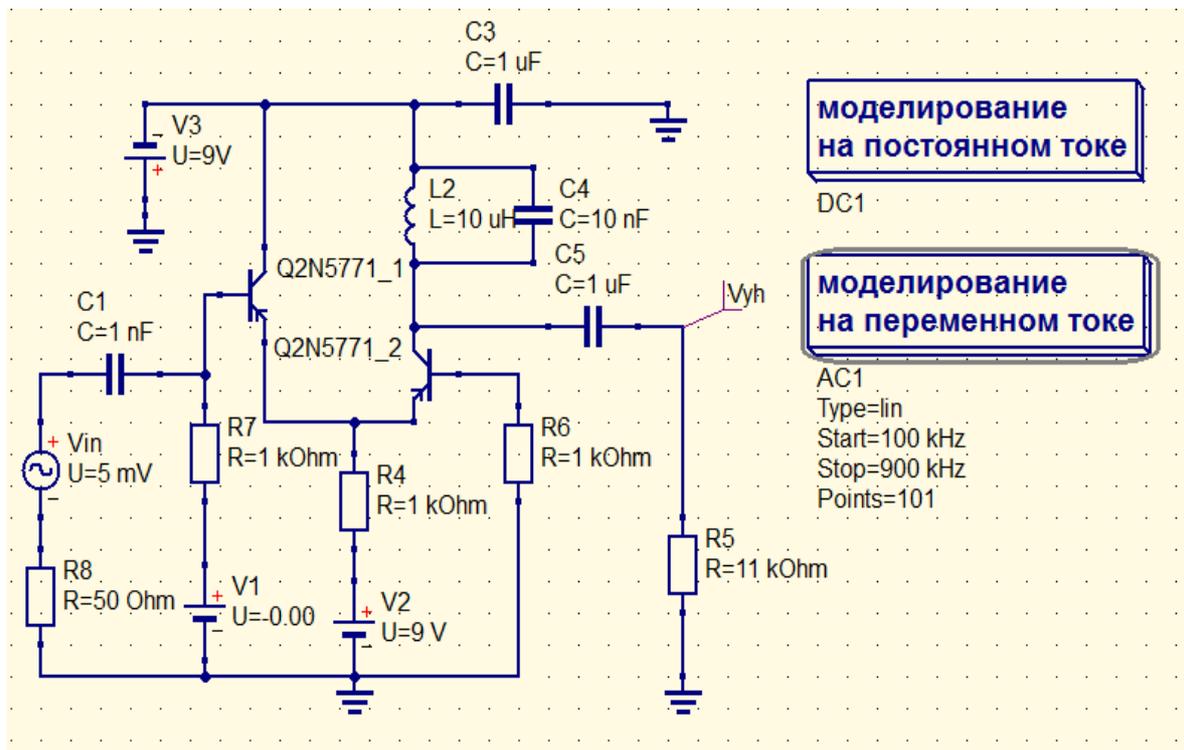


Рисунок 1.6 Схема для исследования резонансного усилителя

Для обеспечения линейного режима усилителя рабочую точку с помощью источника постоянного напряжения  $V1$  выбирают на середине линейного участка ВАХ, а уровень сигнала на входе усилителя (генератор  $V_{in}$ ) устанавливают порядка нескольких милливольт.

После сохранения схемы включают режим «Моделирование» (F2). При успешном моделировании следует вывести его результаты в виде таблиц либо графиков. Для этого на основную схему из раздела «Компоненты» >> «Диаграммы» переносят «Декартовую» диаграмму. После активации этого компонента вкладка изменения параметров «Декартовой» диаграммы принимает вид, приведенный на рисунке 1.7.

Двойным кликом выбирается график зависимости  $V_{yh.v}$  от частоты, и в окне «Кривая» появляется соответствующая запись. После закрытия этой вкладки на основной схеме формируется график, подобный приведенному на рисунке 1.8.

Очевидно, что по приведенному на рисунке 1.8 графику сложно определить точное значение резонансной частоты настройки контура, и график АЧХ в области резонанса следует представить в другом масштабе.

Для повышения точности определения резонансной частоты усилителя изменим пределы изменения частоты в окрестностях резонансной частоты усилителя. Для этого изменим параметры моделирования в соответствии с рисунком 1.9.

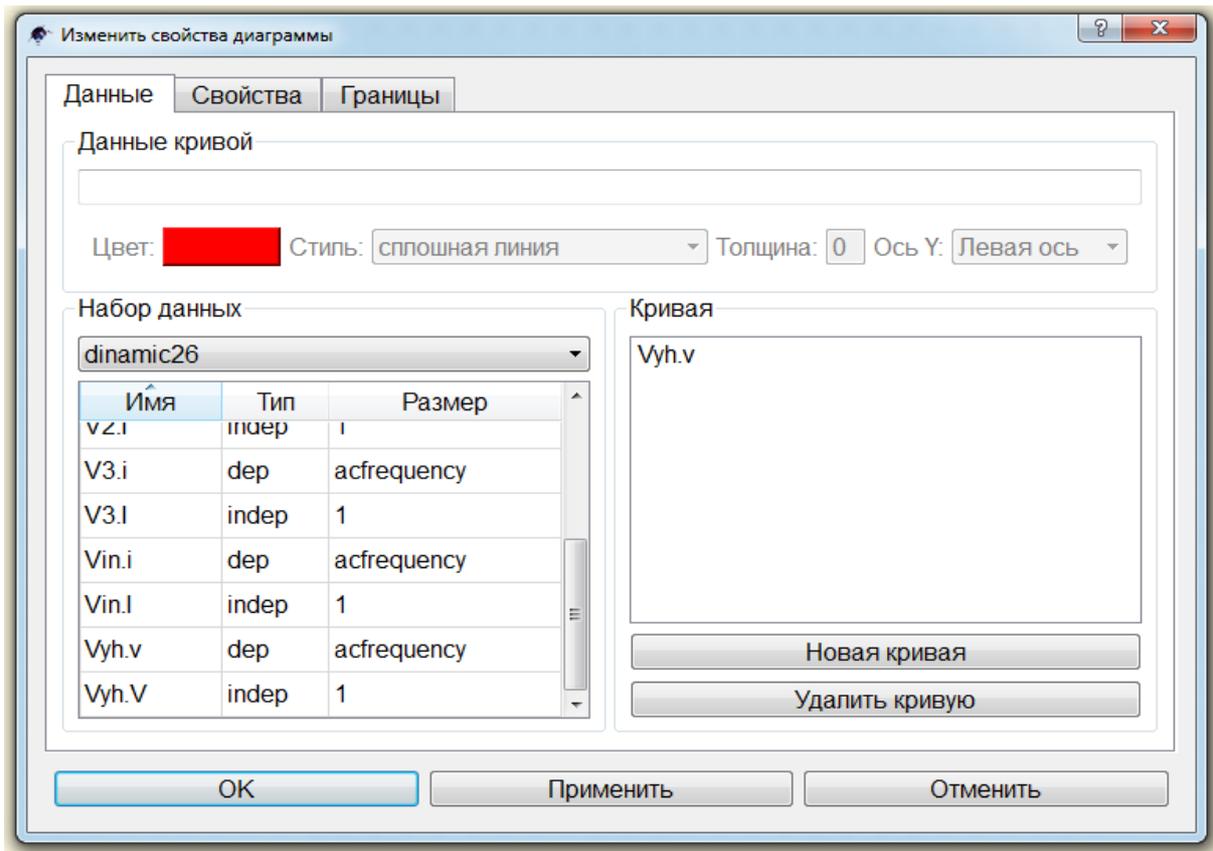


Рисунок 1.7 Окно изменения параметров вида диаграммы «Декартовая»

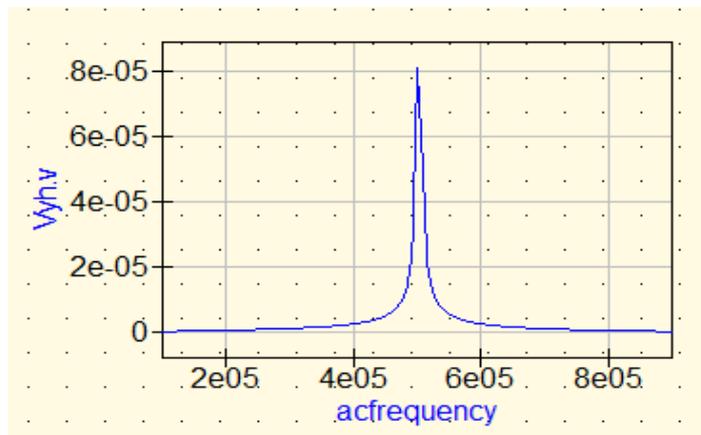


Рисунок 1.8. АЧХ резонансного усилителя в режиме малого сигнала.



Рисунок 1.9 Изменение параметров моделирования для уточнения резонансной частоты усилителя.

В результате повторного моделирования график АЧХ принимает вид, подобный графику, приведенному на рисунке 1.10.

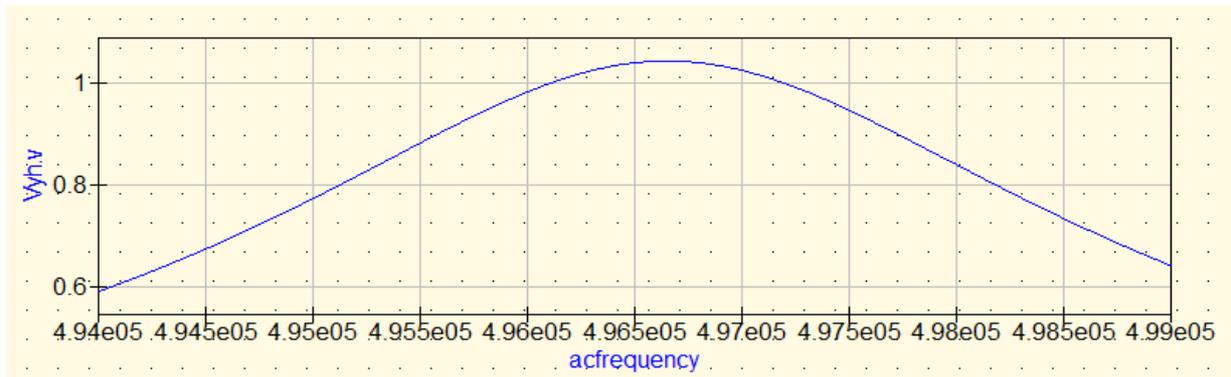


Рисунок 1.10 АЧХ резонансного усилителя в области резонанса

По графику уточняем величину резонансной частоты (в данном случае это 496,6 кГц), и используем это значение для дальнейшей работы, задавая частоту колебаний генератора  $V_{in}$ .

### В,2) Исследование колебательных характеристик усилителя

Для выполнения этого пункта задания используется тот же каскад резонансного усилителя с дополнительными опциями моделирования на основе схемы, приведенной на рисунке 1.11.

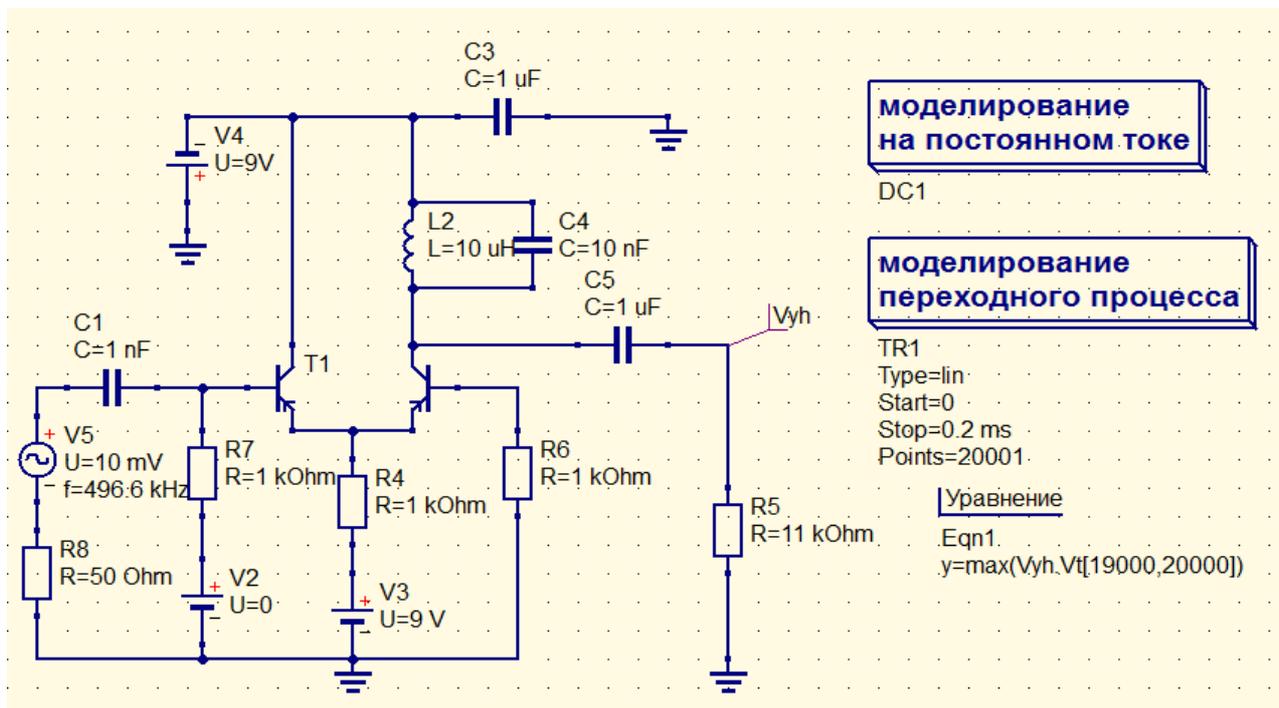


Рисунок 1.11 . Схема для исследования характеристик резонансного усилителя

Измерение выходного напряжения в данной схеме должно осуществляться по окончании переходного процесса (теоретически – это бесконечность). На практике измерения проводят, когда переходный процесс практически закончится. Это позволяет сократить время измерений, но вносит некоторую погрешность. Для уменьшения погрешности измерений используем результаты моделирования, формируемые самой программой. Например, можно определять максимальное значение исследуемого сигнала на последнем этапе моделирования.

Для вывода числового значения выходного напряжения в схему моделирования вводят компонент «Уравнение» (расположен на панели «Инструменты»). Ввод математического выражения в уравнение осуществляется при открытии компонента «Уравнение» (рисунок 1.12).

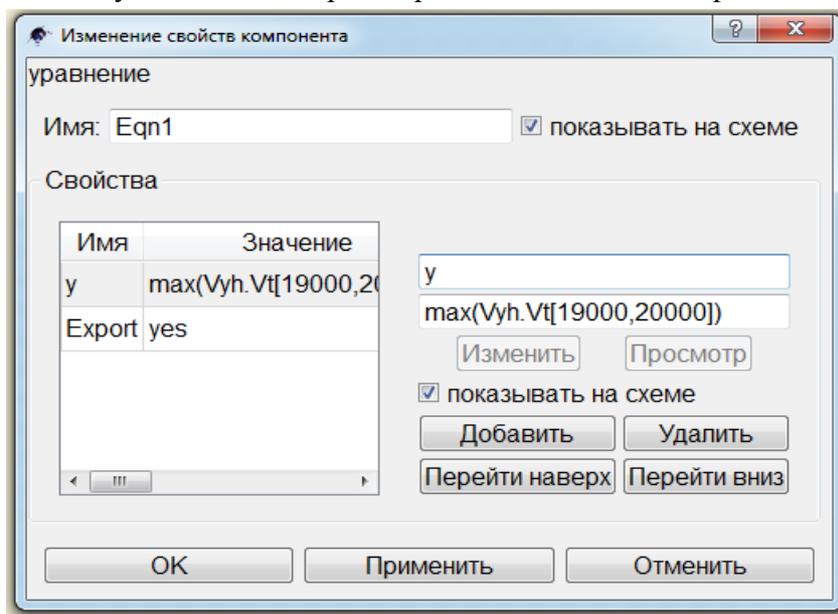


Рисунок 1.12 . Окно ввода математического выражения в уравнение

После сохранения схемы можно выполнять моделирование и при его успешном окончании вывести график переходного процесса, чтобы убедиться в его завершении. После переноса «Декартовой» диаграммы из раздела «Компоненты» >> «Диаграммы» на основную схему и ее активации, вкладка изменения параметров «Декартовой» диаграммы принимает вид, приведенный на рисунке 1.13.

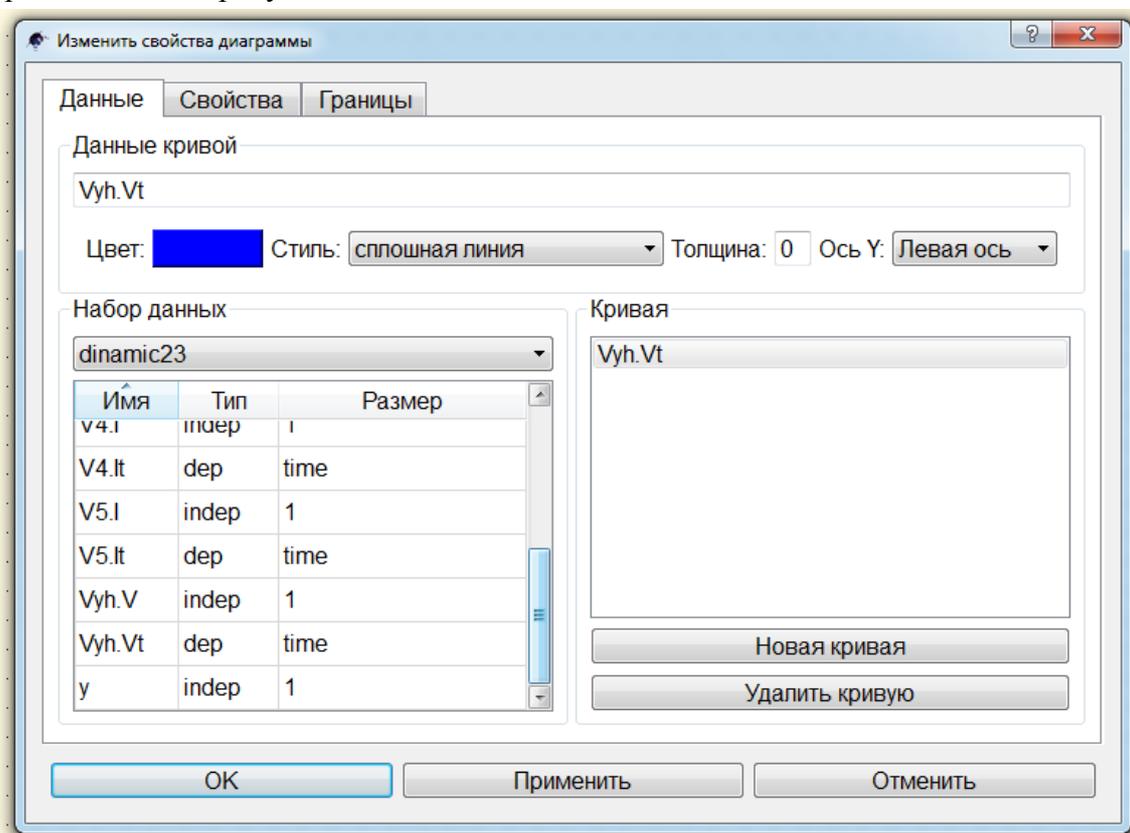


Рисунок 1.13 Окно изменения свойств диаграммы «Декартовая»

На рисунке 1.14 представлены результаты выполненного моделирования. Из анализа графика следует, что переходный процесс, практически закончился, и его результаты с некоторой погрешностью могут быть использованы. В таблице выведено максимальное значение выходного напряжения при данном входном напряжении.

Увеличив на 10 mV напряжение генератора  $V_{in}$ , повторить моделирование и получить новое значение выходного напряжения. Данные занести в таблицу «Амплитуда напряжения входа»/ «Амплитуда напряжения выхода» и построить эту зависимость.

Продолжить испытания, увеличивая входной сигнал, до появления ощутимой нелинейности этой зависимости.

На рисунке 1.14 представлены результаты выполненного моделирования. Из анализа графика следует, что переходный процесс, практически закончился, и его результаты с некоторой погрешностью могут быть использованы. В таблице выведено максимальное значение выходного напряжения при данном входном напряжении.

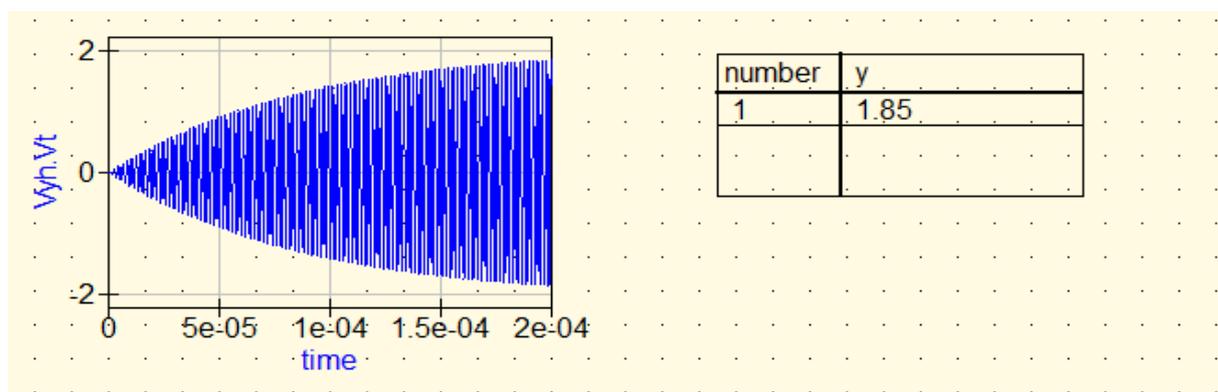


Рисунок 1.14 Результаты моделирования: оциллограмма выходного напряжения усилителя и величина его максимального значения.

Увеличив на 10 mV напряжение генератора  $V_{in}$ , повторить моделирование и получить новое значение выходного напряжения. Данные занести в таблицу «Амплитуда напряжения входа»/ «Амплитуда напряжения выхода».

Продолжить испытания, увеличивая входной сигнал, до появления ощутимой нелинейности этой зависимости. Построить график этой зависимости.

Повторить подобные испытания для рабочей точки  $U_{02}$ . Это соответствует точке излома ВАХ (для данного нелинейного элемента это соответствует напряжению  $U_{02} = \pm 0,1$  V).

### С) Исследования режима удвоения частоты

#### С,1). Исследования режим удвоения частоты с отсечкой тока $UЭ$ .

Установить частоту входного сигнала таким образом, чтобы контур оказался настроен на вторую гармонику входного сигнала. То есть, частоту сигнала генератора надо уменьшить в два раза, при этом проконтролировать явление резонанса на выходе усилителя. Напряжение смещения  $U_0$  и амплитуду входного сигнала  $U_m$  установить равными рассчитанным в домашнем задании значениям.

Схема для исследования режима удвоения частоты приведена на рисунке 1.15. Для получения графиков выходного напряжения и определения коэффициента передачи удвоителя нужно после моделирования внести в схему соответствующие диаграммы.

Для того, чтобы проконтролировать эффект удвоения частоты, следует изменить масштаб графика переходного процесса. Для этого двойным кликом на поле графика открыть вкладку изменения параметров графика (рисунок 1.16). Во внутренней вкладке «Границы» установить режим «вручную» и ввести нужные параметры.

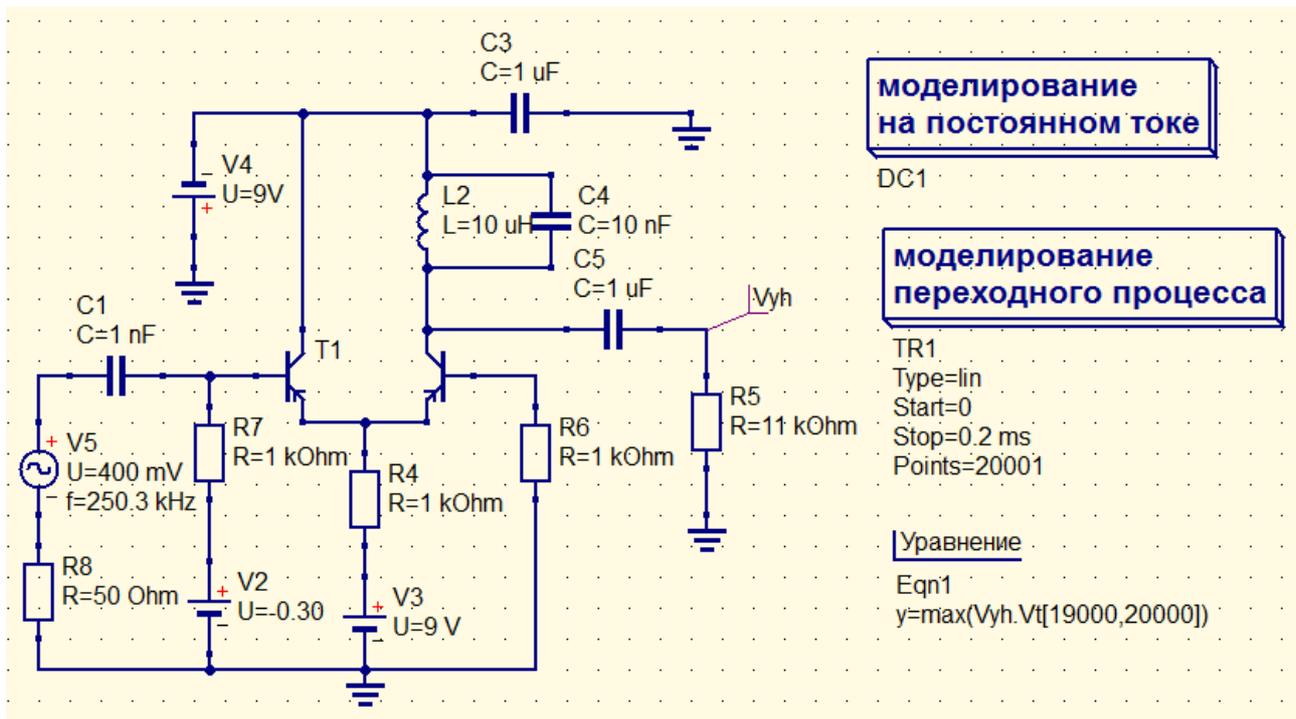


Рисунок 1.15 Схема для исследования удвоителя частоты

В данном случае введены параметры разметки оси X.

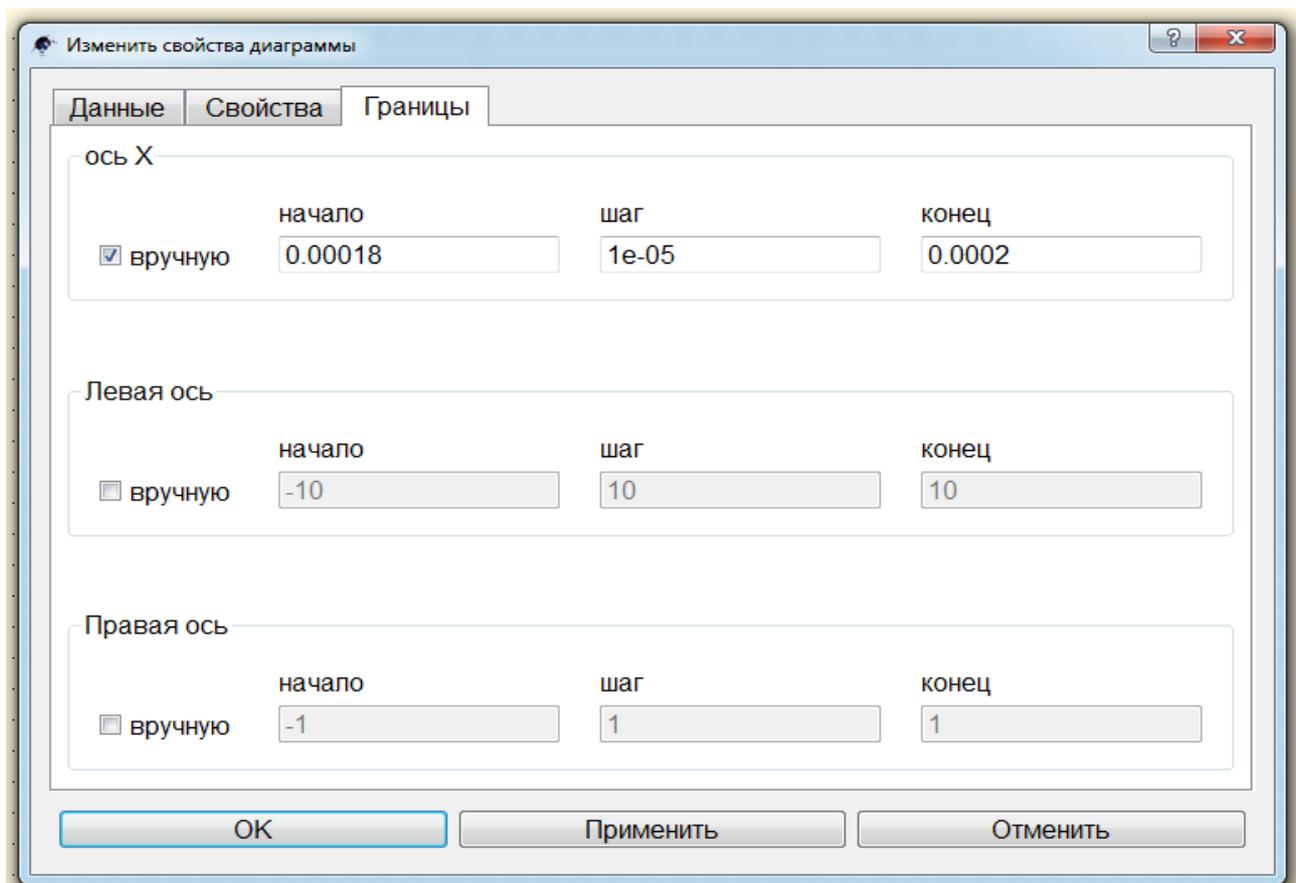


Рисунок 1.16 Вкладка изменения границ диаграммы «Декартовая»

В результате будет сформирована временная диаграмма (рисунок 1.17).

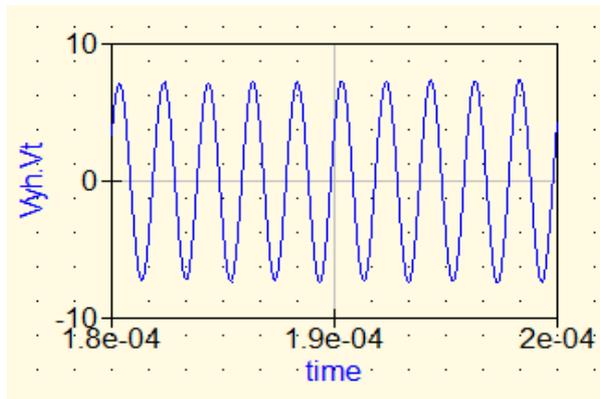


Рисунок 1.17 Временная диаграмма сигнала на выходе удвоителя частоты

Несложные вычисления показывают, что частота выходного сигнала порядка 500 кГц, то есть соответствует второй гармонике входного сигнала.

*C,2) Исследования эффекта удвоения частоты за счёт квадратичного участка характеристики УЭ.*

Для исследования эффекта удвоения частоты за счёт квадратичного участка характеристики УЭ схему исследований сохраняют прежней, но амплитуду входного сигнала уменьшить до 10...20 мВ. Снять зависимость амплитуды выходного напряжения от напряжения смещения  $V_2$ . По построенной зависимости определить максимальный коэффициент передачи удвоителя в этом режиме

*D) Исследование зависимости формы тока усилительного элемента и выходного сигнала удвоителя частоты в различных режимах работы от амплитуды входного сигнала.*

Для выполнения этого пункта задания в каскад резонансного усилителя избирательная нагрузка заменяется активным сопротивлением небольшой величины. В этом случае форма напряжения на выходе каскада практически не будет отличаться от формы выходного тока нелинейного элемента. Схема такого устройства приведена на рисунке 1.18.

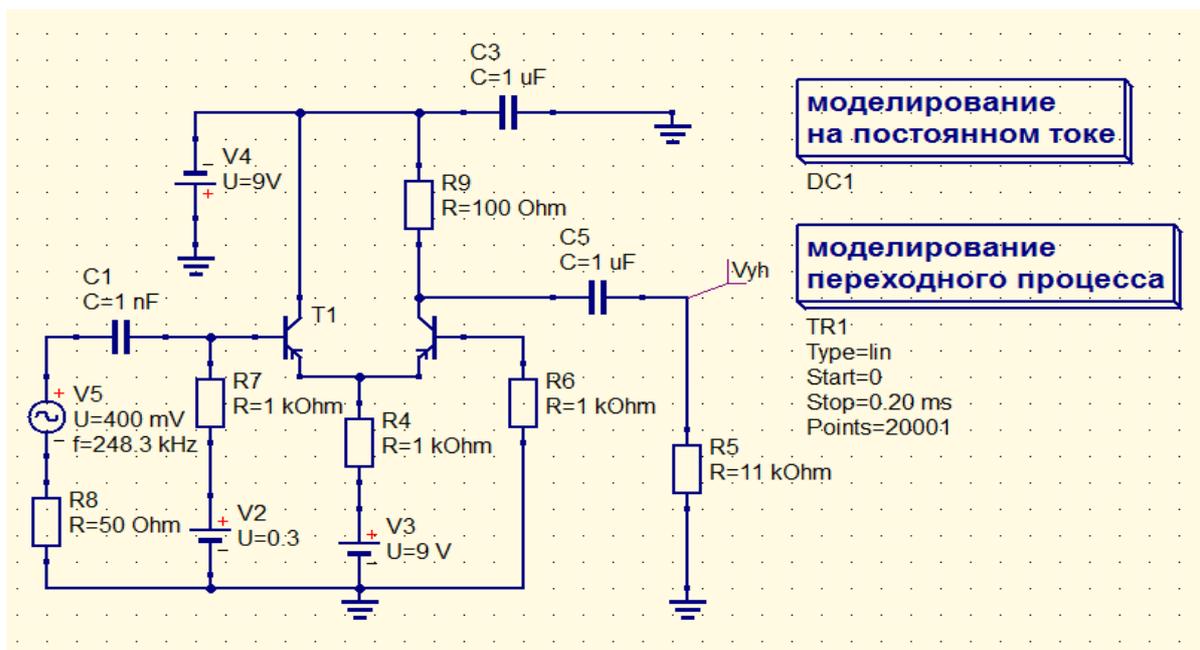


Рисунок 1.18 Схема для исследования резистивного усилителя

В данной серии испытаний получить временные диаграммы выходного напряжения для всех режимов работы каскада (малого и большого сигналов), которые были использованы для исследования усилителя и удвоителя частоты с резонансной нагрузкой.

Эпюры всех полученных сигналов представить в отчете лабораторной работы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое линейный и нелинейный режимы усиления?
2. Что такое колебательная характеристика усилителя?
3. Чем определяется форма колебательной характеристики?
4. Укажите достоинства и недостатки нелинейного режима усиления.
5. Что такое угол отсечки тока нелинейного элемента?
6. Как выбирается угол отсечки в умножителе частоты?
7. Для каких целей в схеме усилителя используются дроссель, разделительный и блокировочный конденсаторы?
8. Что такое крутизна характеристики нелинейного элемента?

## 2 Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Целью выполнения работы является:  
изучение процесса модуляции в цепи с нелинейным элементом;  
освоение методики расчёта и снятия модуляционных характеристик модулятора и определения их параметров;  
исследование амплитудных и частотных характеристик модулятора;  
исследование формы тока нелинейного элемента в режиме модуляции.

#### *Методика расчёта модуляционной характеристики.*

Модуляционной характеристикой, в данном случае, называем зависимость амплитуды первой гармоники тока нелинейного элемента (или пропорционального ей напряжения на избирательной нагрузке) от напряжения смещения при постоянной амплитуде входного высокочастотного сигнала.

Задача ставится следующим образом: по известной характеристике нелинейного элемента и выбранной амплитуде входного сигнала, рассчитать зависимость первой гармоники тока нелинейного элемента при изменении напряжения смещения, т.е. положения рабочей точки на характеристике НЭ. При изменении рабочей точки изменяется как амплитуда, так и угол отсечки тока НЭ, что необходимо учитывать при вычислении первой гармоники.

Первая гармоника тока вычисляется по тем же формулам, что и в предыдущей работе

$$I_{m1} = \alpha_1(\theta) I_m,$$

где  $\alpha_1(\theta)$  - вычисляется по формуле (1.6), а  $I_m$  и  $\theta$  определяются из графических построений для различных  $U_0$  по характеристике, полученной в предыдущей работе.

#### *Описание схемы измерений*

Схема для исследования амплитудного модулятора приведена на рисунке 2.1. Несущее колебание от высокочастотного генератора переменного напряжения  $V_{in}$  (с внутренним сопротивлением источника  $R1$ ) через разделительный конденсатор  $C1$  подается на один вход нелинейного элемента (база транзистора  $T1$  транзисторной пары  $T1-T2$ ). Источник постоянного напряжения  $V2$  с резистором  $R2$  задает рабочую точку каскада. Резистор  $R2$ , с одной стороны, обеспечивает гальваническую связь (по постоянному току) базы транзистора  $T1$  с источником  $V2$ , с другой стороны, не позволяет шунтировать вход нелинейного элемента низкоомным источником  $V2$ . Нагрузкой нелинейного элемента является параллельный LC контур, шунтируемый резистором  $R6$ . Частоту несущего колебания генератора  $V_{in}$  выбирают равной частоте настройки резонансного контура. Конденсатор  $C3$  обеспечивает шунтирование источника питания  $V1$  («заземление» по высокой частоте). Модулирующий сигнал от низкочастотного генератора  $V_{mod}$  (с внутренним сопротивлением источника  $R5$ ) через разделительный конденсатор  $C4$  подается на второй вход нелинейного элемента (база транзистора  $T2$  транзисторной сборки  $T1-T2$ ). Питание каскада по постоянному току обеспечивают элементы  $V1$  и  $V3$ .

Для снижения требований к вычислительным ресурсам при исследовании процессов модуляции изменены некоторые параметры схемы, определяющие частотный диапазон. Номиналы элементов контура ( $L2$ ,  $C2$ ) увеличены в 10 раз по сравнению с натурным макетом, сопротивление нагрузки  $R2$  – уменьшено в 30 раз. Примерно в 10 раз уменьшится и частота генератора несущего колебания.

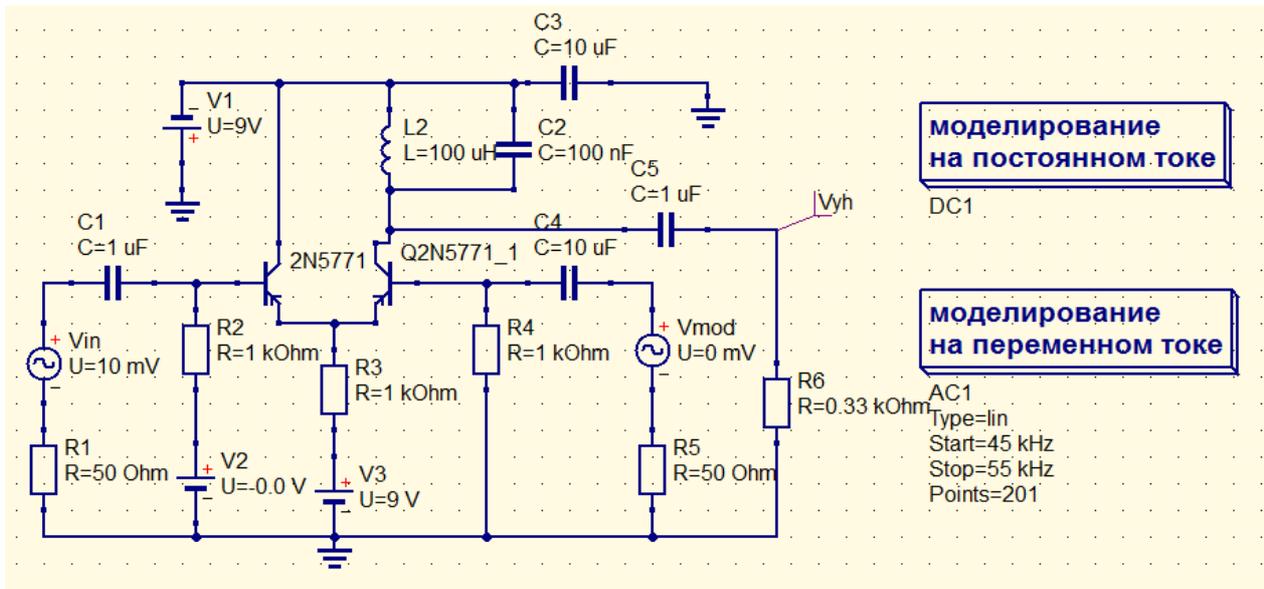


Рис. 2.1 Схема соединений для исследования амплитудного модулятора

### Предварительная подготовка

Предварительная подготовка заключается в следующем:

1. Изучить работу амплитудного модулятора применительно к схеме лабораторного макета.
2. Выбрать два значения входного напряжения  $U_m$ , соответствующих приблизительно 0,25 и 0,5 раствора характеристики УЭ и рассчитать семейство модуляционных характеристик.

ПРИМЕЧАНИЕ: При расчёте использовать кусочно-линейную аппроксимацию.

3. На модуляционных характеристиках выбрать линейный рабочий участок и рабочую точку на середине его, соответствующую наибольшей глубине неискажённой модуляции.

Расчитать максимальный коэффициент модуляции по току  $M_i$  для выбранного участка модуляционной характеристики.

4. Изобразить ход зависимости коэффициента модуляции напряжения на контуре  $M_u$  от амплитуды модулирующего напряжения  $U_F$  для выбранной рабочей точки  $U_0$  и постоянного значения модулирующей частоты  $F$ .

5. Изобразить примерный ход зависимости  $M_u$  от модулирующей частоты  $F$  для выбранных значений  $U_0$  и  $U_F$  в диапазоне от 500 Гц до 15 кГц.

6. Изобразить спектральные диаграммы входных напряжений  $U_m$ , тока УЭ и напряжения на колебательном контуре амплитудного модулятора.

### Лабораторное задание

1. Собрать схему для исследования амплитудной модуляции (рис.2.1). Проверить наличие резонанса.

2. Установив выходное напряжение ЗГ равное 0, снять семейство модуляционных характеристик для двух значений напряжений, соответствующих п.2 домашнего задания. Построить их на одном графике в одинаковом масштабе.

3. Выбрать модуляционную характеристику, обеспечивающую наибольшую глубину модуляции при незначительней искажениях. Определить по ней рабочую точку  $U_0$ , максимальную неискажаемую амплитуду низкочастотного сигнала  $U_f$  и коэффициент модуляции по напряжению.

4. Установить выбранные в п.3 значения напряжений  $U_f$ ,  $U_0$  и снять зависимость коэффициента модуляции от амплитуды модулирующего сигнала  $M=f(U_F)$  при  $F = 600-1000$  Гц.

5. При  $U_F = const$  и  $U_f = const$ , установленных в соответствии с п.3, снять зависимость коэффициента модуляции от частоты модулирующего сигнала  $M=f(F)$ , изменяя частоту модуляции от 750 Гц до 4,5 кГц.

6. Исследовать временные характеристики амплитудно-модулированных сигналов. По результатам анализа временных диаграмм оценить длительность переходных процессов и сопоставить с уровнем частотных искажений АМ колебаний.

7. Заменяв контур сопротивлением  $R_L$ , просмотреть и зарисовать осциллограммы и спектрограммы<sup>1</sup> тока УЭ при выбранных значениях  $U_m$ ,  $U_0$  и амплитуде модулирующего напряжения, соответствующий  $M_u \approx 50\%$ . Параметры развертки подобрать так, чтобы получить устойчивую осциллограмму.

В отчете по лабораторной работе сопоставить спектры токов и напряжений входных и выходных сигналов.

### Методические указания по выполнению лабораторного задания

#### А) Проверка резонанса

Методика определения частоты резонанса изложена в предыдущей работе. Несущественным отличием является необходимость более точного измерения частоты резонанса и, соответственно, уточнения последующей установки частоты генератора  $V_{in}$ . Для этого полюсу обзора АЧХ устанавливайте в пределах  $\pm 2$  кГц от предполагаемой частоты резонанса (вкладка «Границы» Декартовой диаграммы, на которой изображена АЧХ каскада, предварительно отметив соответствующее окно «Вручную»).

#### В) Исследование модуляционных характеристик

Снятие модуляционных характеристик будем проводить по схеме (рис. 2.2), подобной схеме для снятия колебательных характеристик (рассмотренной в предыдущей работе). Отличием будет лишь то, что для получения колебательной характеристики изменяют амплитуду высокочастотного колебания при постоянном положении рабочей точки, а для получения модуляционной характеристики изменяют напряжение смещения рабочей точки при постоянной амплитуде высокочастотного колебания (в диапазоне изменения ВАХ).

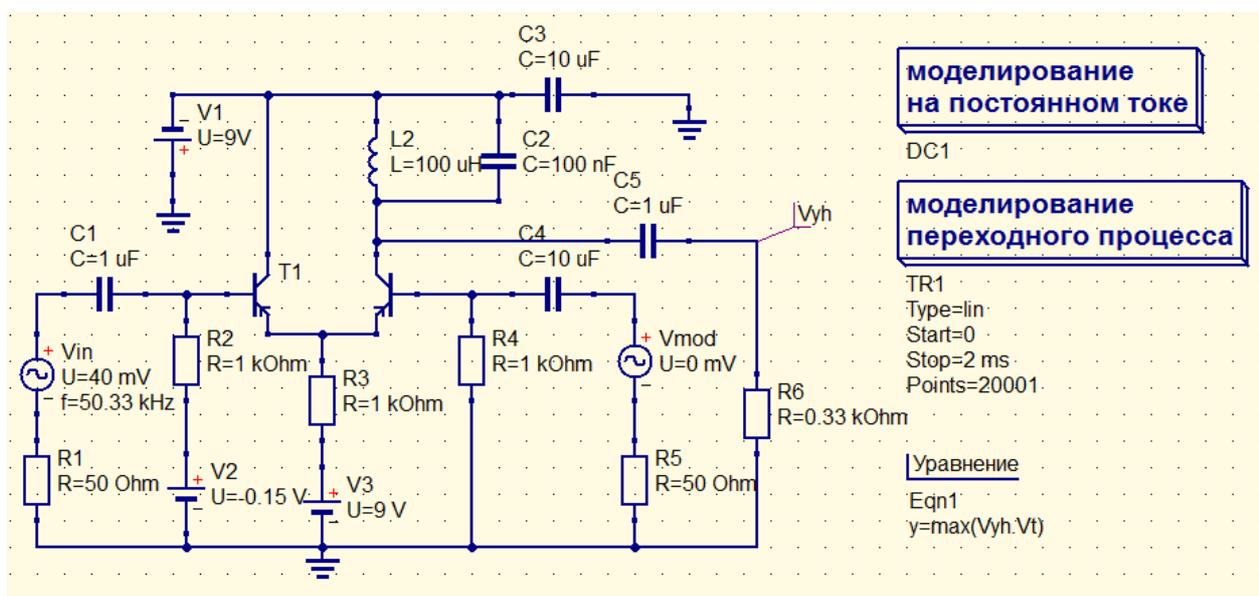


Рис. 2.2 Схема для исследования модуляционных характеристик

Амплитуда напряжения  $U_F$  модулирующего генератора  $V_{mod}$  в этом исследовании пока равна нулю.

Изменяя положение рабочей точки с помощью источника  $V_2$  при двух значениях амплитуды генератора  $V_{in}$ , рассчитанных в домашнем задании, получаем наборы значений параметра « $u$ », и строим (вручную, или с помощью любого программного обеспечения) обе зависимости на одном графике.

*С) Построение зависимости коэффициента модуляции от амплитуды и частоты модулирующего напряжения*

Схему для исследований (рис. 2.3) используем, практически, прежнюю, но параметры источников сигналов устанавливать в соответствии с текущим заданием.

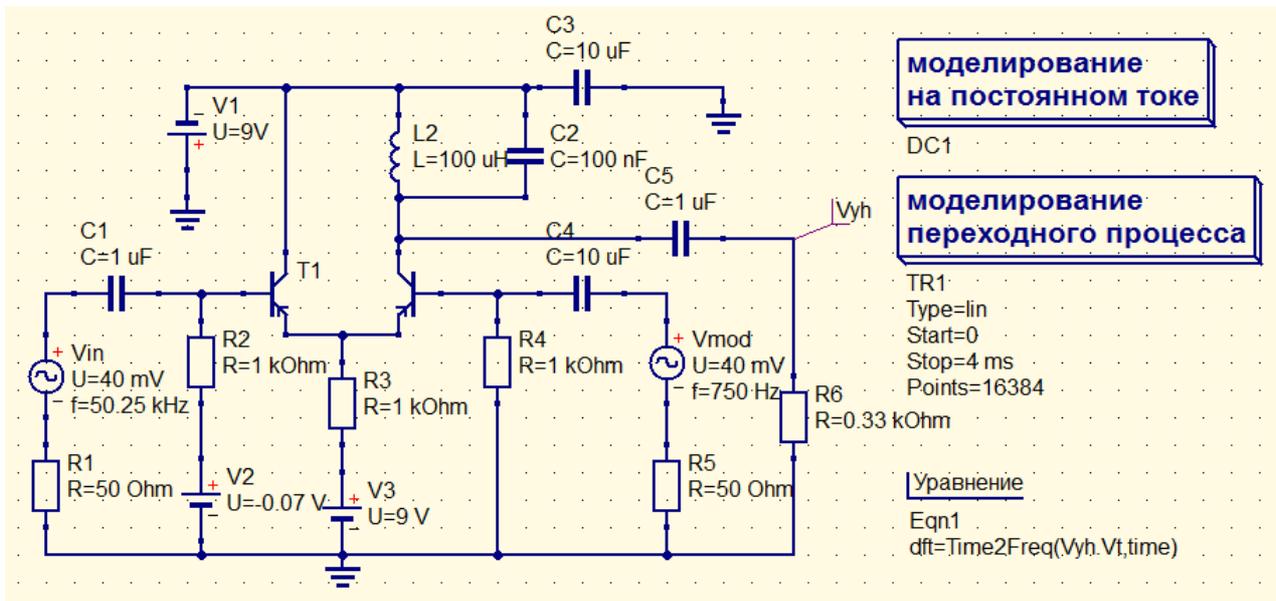


Рис. 2.3 Схема для исследования коэффициента модуляции каскада

Установить выбранные в п.3 значения напряжений  $U_f$  (генератор  $V_{in}$ ),  $U_0$  (источник постоянного смещения  $V_2$ ) и, изменяя амплитуду модулирующего напряжения  $U_F$  генератора  $V_{mod}$ , снять и построить зависимость  $M_u = f(U_F)$  при частоте модуляции  $F$ , выбранной в диапазоне 600...1000 Гц (рекомендуется выбрать частоту модуляции  $F = 750$  Гц).

Компонент «Уравнение»  $dft = \text{Time2Freq}(V_{yh}, V_t, \text{time})$  введен для получения спектральных характеристик.

После выполнения моделирования результаты вывести на двух Декартовых диаграммах (на одной диаграмме вывести график « $V_{yh}.Vt$ », на другой – график « $dft$ »). Изменить свойства графика  $dft$ : На вкладке «Данные» установить стиль кривой «Стрелочки». На вкладке «Границы» начало отсчета по оси  $Y$  следует установить на 0, предварительно отметив окно левой оси  $Y$  «вручную». В результате будут выведены временная и спектральная диаграммы, примерный вид которых приведен на рисунке 1.4. Однако слишком мелкий масштаб не позволяет выполнить измерение характеристик.

Для более удобной работы и расчета количественных характеристик подкорректировать вкладки «Границы» графиков и масштабные сетки («Шаг»), предварительно отметив соответствующее окно «Вручную», например. На временной диаграмме рекомендуется выбирать конечный участок, где колебания выходят на стационарный режим. На спектральной диаграмме рекомендуется выбрать участок в районе несущей частоты с возможностью наблюдения боковых составляющих и измерения их параметров.

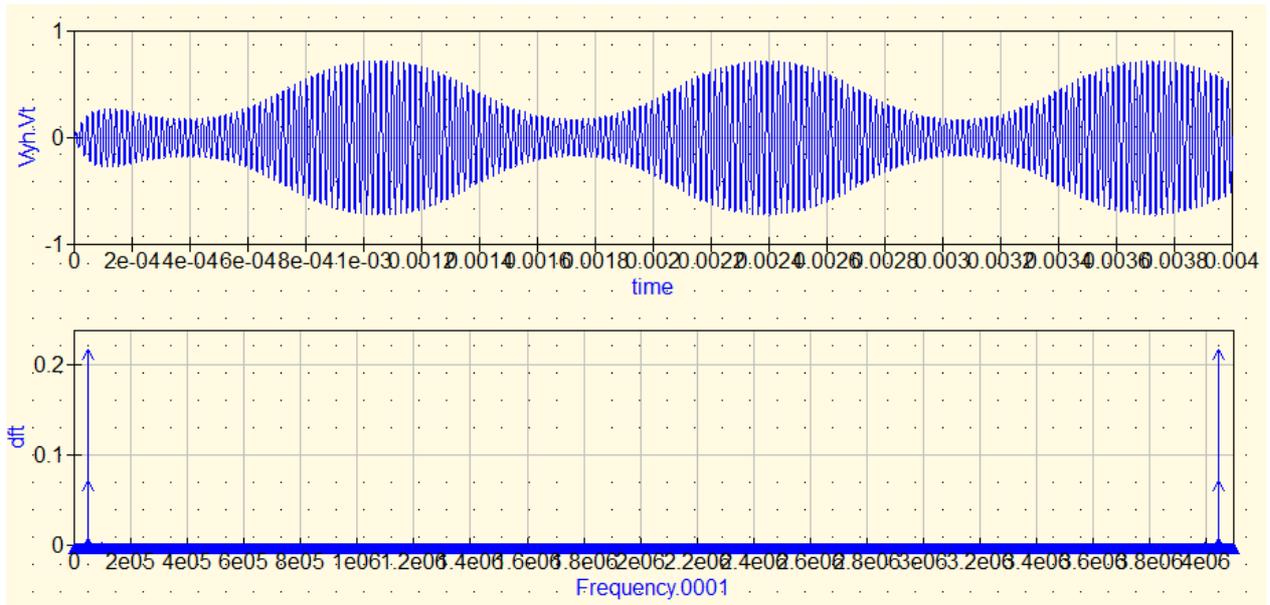


Рис. 2.4 Временная и спектральная диаграммы модулированных колебаний

В результате временная и спектральная диаграммы примут вид, приведенный на рисунке 1.5.

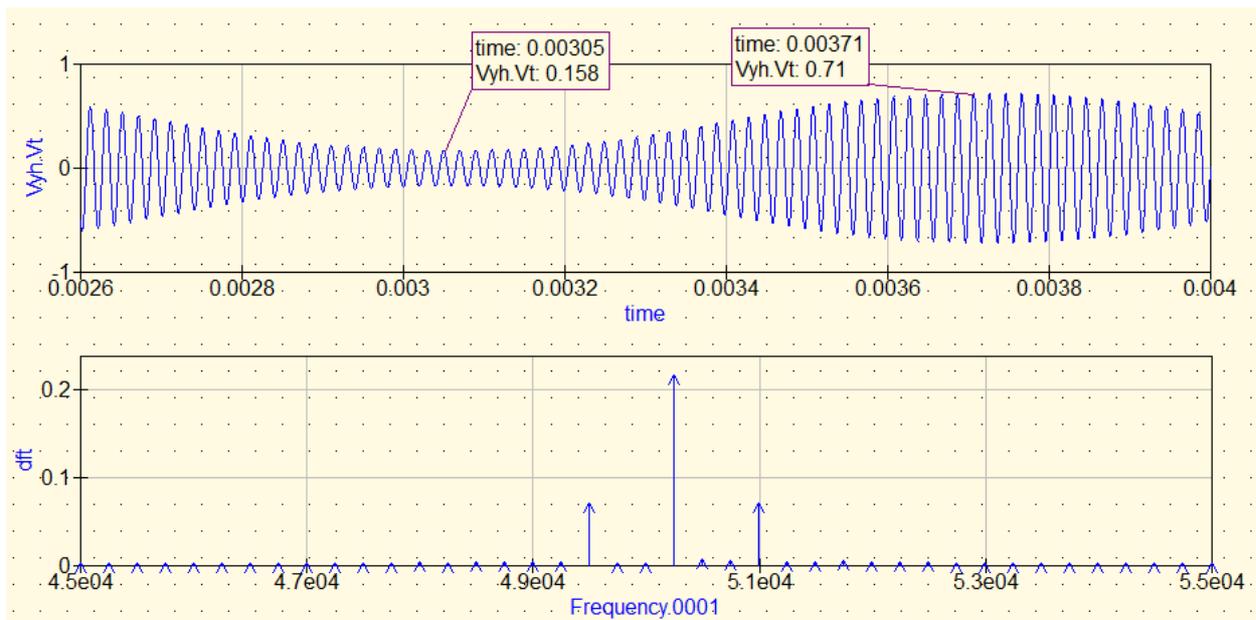


Рис. 2.5 Временная и спектральная диаграммы модулированных колебаний с коррекцией масштаба

Определение коэффициента модуляции по спектральной диаграмме осуществлять, измеряя амплитуды несущей и боковых составляющих:

$$M = (U_{\text{БокЛ}} + U_{\text{БокП}}) / U_{\text{Нес}},$$

где  $U_{\text{БокЛ}}$  и  $U_{\text{БокП}}$ , соответственно, амплитуды левой и правой боковых составляющих,  $U_{\text{Нес}}$  – амплитуда несущей модулированного колебания.

Зависимость коэффициента модуляции снимать до начала появления заметной нелинейности характеристики.

Для построения зависимости коэффициента модуляции от частоты модулирующего напряжения оставляем прежнюю схему для исследований, но параметры источников сигналов устанавливать в соответствии с текущим заданием.

Установить выбранные в п.3 значения напряжений несущего колебания  $U_f$  (генератор  $V_{in}$ ), модулирующего сигнала  $U_F$  (генератор  $V_{mod}$ ) и, изменяя частоту  $F$  модулирующего напряжения генератора  $V_{mod}$ , снять и построить зависимость  $M_u=f(F)$  при частотах модуляции  $F$ , равных, соответственно, 750, 2250 и 4500 Гц.

При выполнении этого задания контролировать, чтобы амплитуда НЧ генератора не выходила за пределы линейного участка модуляционной характеристики.

По результатам расчетов строим соответствующие графики.

#### Д) Исследование временных характеристик амплитудно-модулированных сигналов.

В схеме для исследования временных характеристик амплитудно-модулированных сигналов заменяем генератор гармонических колебаний  $V_{mod}$  на генератор прямоугольных импульсов (рис. 2.6). Модуляцию импульсными сигналами нередко называют манипуляцией.

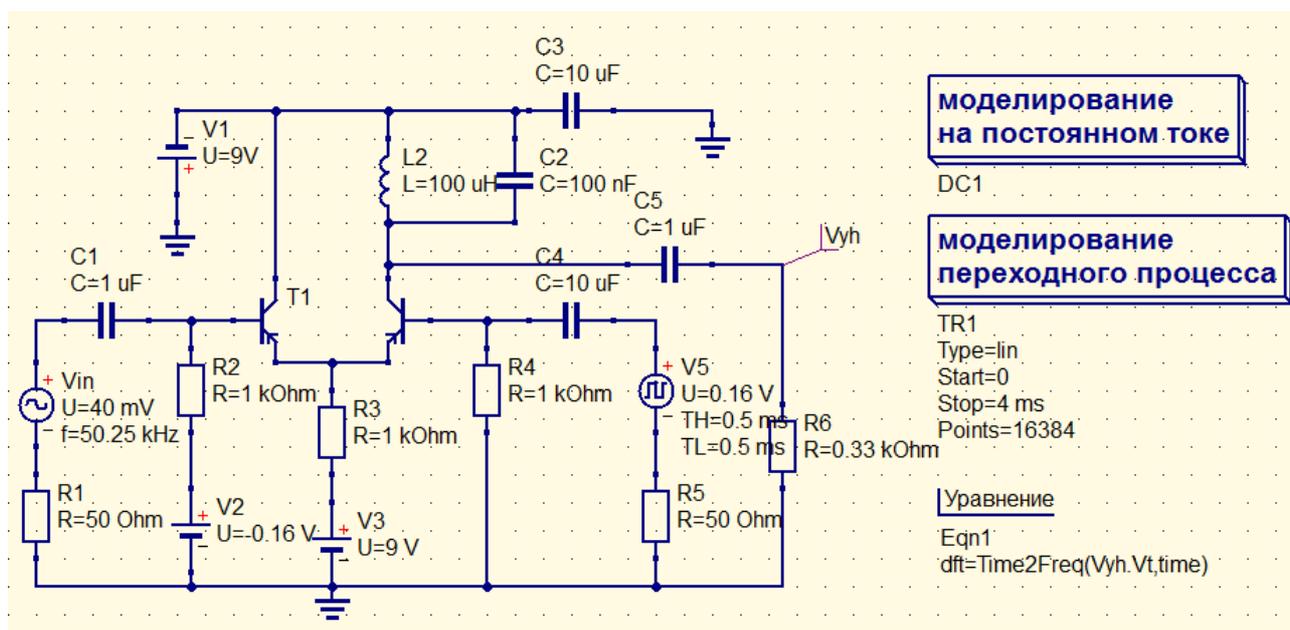


Рис. 2.6 Схема для исследования временных характеристик модулятора

Техника получения временных и спектральных диаграмм сохраняется такой же, как описано выше. Длительность процесса моделирования на графиках выбирать таким образом, чтобы было заметно, что система практически вошла в установившейся режим. По результатам анализа полученных временных диаграмм оценить длительность переходных процессов и сопоставить с уровнем частотных искажений АМ колебаний.

#### Е) Исследование характеристик тока нелинейного элемента.

В схеме для исследований характеристик тока нелинейного элемента (рис. 2.7) заменяем резонансный контур резистором с сопротивлением 1 кОм. Поэтому характеристики тока можно оценить через характеристики напряжения.

Устанавливаем значения напряжений  $U_m, U_0$ , соответствующие наиболее полному использованию характеристики нелинейного элемента, и амплитуде модулирующего напряжения, соответствующий коэффициенту модуляции  $M_u \approx 50\%$ . С использованием уже освоенных приемов получить и зарисовать осциллограммы и спектрограммы тока нелинейного элемента.

В отчете по лабораторной работе сопоставить спектры токов и напряжений входных и выходных сигналов.

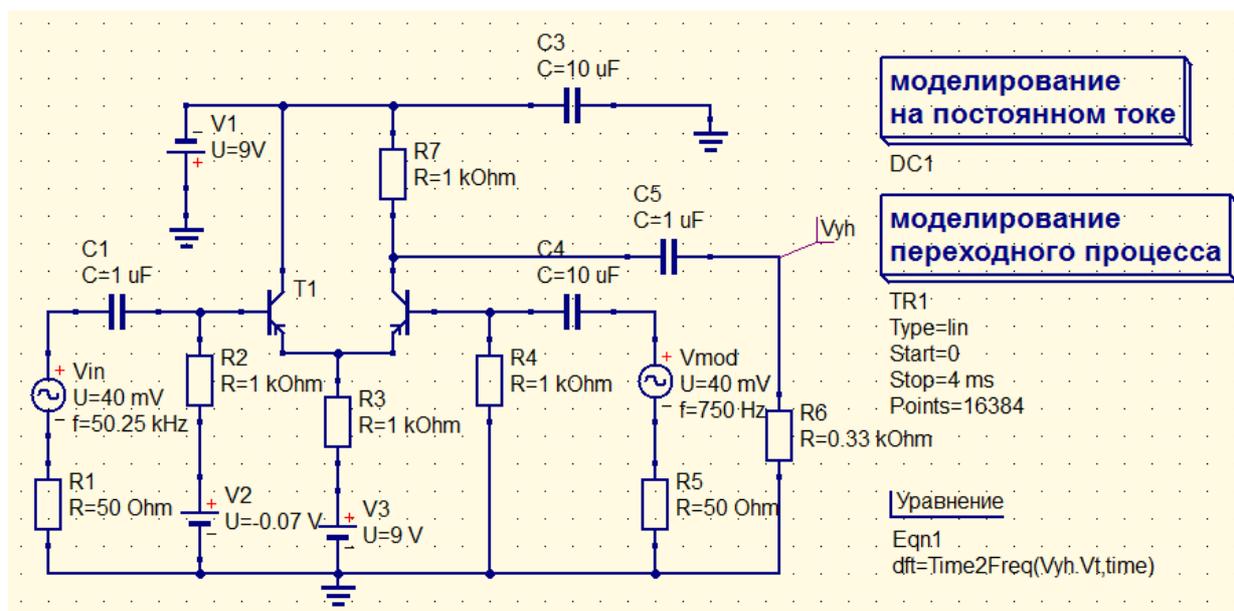


Рис. 2.7 Схема для исследования характеристик тока нелинейного элемента

### Контрольные вопросы

1. Поясните физические процессы при амплитудной модуляции. Приведите временные диаграммы иллюстрирующие получение АМ колебаний.
2. Возможно ли осуществление амплитудной модуляции с помощью линейного элемента?
3. Дайте определение статической модуляционной характеристики.
4. Как по модуляционной характеристике определить рабочую точку максимальную амплитуду модулирующего сигнала, глубину модуляции?
5. Как выбирается угол отсечки в модуляторе?
6. В каких пределах может изменяться угол отсечки нелинейного элемента для получения малых искажений при модуляции?
7. Как изменяется коэффициент модуляции  $m_u$  от величины модулирующего напряжения  $U_F$  при выбранной рабочей точке  $U_0$  и постоянном значении модулирующей частоты  $F$ .
8. Объясните, почему коэффициент модуляции напряжения на контуре уменьшается с увеличением модулирующей частоты?
9. Какие искажения передаваемого сигнала возможны при осуществлении амплитудной модуляции?
10. Как связаны спектры токов (напряжений) входных и выходных сигналов амплитудного модулятора?

### 3 Лабораторная работа № 3

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АМ КОЛЕБАНИЙ

Целью выполнения работы является:  
изучение физических процессов при детектировании АМ колебаний;  
освоение методики расчета и снятия основных характеристик детектора;  
расчет и измерение параметров детектора;  
исследование влияния параметров нагрузки детектора на его характеристики.

#### Определения и расчетные формулы

Детекторной характеристикой называется зависимость постоянной составляющей тока нелинейного элемента  $I_0$  от амплитуды  $U_f$  входного немодулированного высокочастотного сигнала (рис.3.1). Эта характеристика является основой для расчёта параметров входного сигнала и детектора. По ней можно выбрать линейный участок, где будут отсутствовать (либо не превышать заданного значения) искажения при детектировании и рабочую точку на его середине, определяющую уровень входного немодулированного сигнала  $U_{fH}$ . Зная детекторную характеристику и сопротивления нагрузки  $R_H$  детектора можно вычислить амплитуду выходного напряжения  $U_{mF}$  детектора

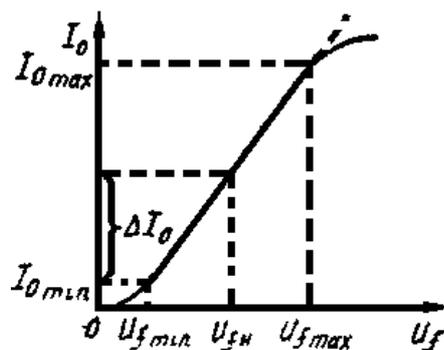


Рис. 3.1 Детекторная характеристика

$$U_F = \Delta I_0 R_H, \quad (3.1)$$

где  $\Delta I_0 = 0,5 (I_{0max} - I_{0min})$  определяется по границам линейного участка детекторной характеристики.

Коэффициент передачи детектора может быть вычислен по формуле

$$K_s = \frac{U_F}{MU_{fH}} \quad (3.2)$$

где  $M$  – коэффициент модуляции входного сигнала,

а  $U_F$  и  $U_{fH}$  определены из детекторной характеристики или экспериментально.

Начальный участок детекторной характеристики от 0 до  $U_{fmin}$  имеет квадратичный характер и описывается формулой

$$I_0 = \frac{1}{2} a_2 U_f^2 \quad (3.3)$$

где  $a_2$  – коэффициент аппроксимации начального участка характеристики нелинейного элемента.

При работе детектора на этом участке характеристики возможны значительные искажения выходного сигнала при больших коэффициентах модуляции.

Верхний участок детекторной характеристики для детектора с использованием усиленного элемента также нелинейный, за счёт ограничения тока усилительного элемента.

Для диодного же детектора такого ограничения обычно не наблюдается.

### Описание схемы измерений

Схема для исследования амплитудного модулятора приведена на рисунке 3.2.

В качестве нелинейного элемента используется та же самая транзисторная пара Т1-Т2. Источники постоянного напряжения V1 ... V3 определяют режим работы нелинейного элемента по постоянному току. В качестве источника высокочастотного сигнала используется генератор V5 несущих колебаний, модулированных по амплитуде сигналом генератора V4 переменного напряжения. Измеритель Pr1 предназначен для измерения тока нелинейного элемента (на первом этапе – его постоянной составляющей). Нагрузкой детектора является RC цепочка (R5, C2). Компонент «Уравнение» обеспечивает получение значения постоянной составляющей тока нелинейного элемента. Контрольные гнезда «Vh» и «Vyh» используются для контроля сигналов, соответственно, на входе и выходе детектора.

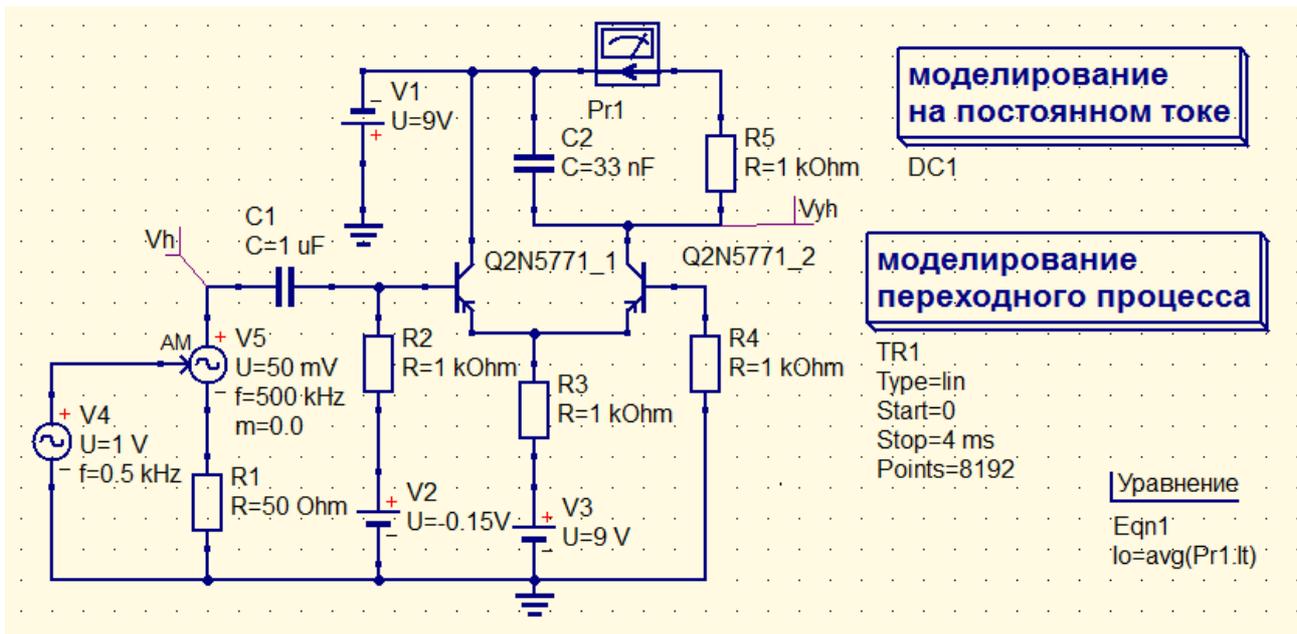


Рис. 3.2 Схема для исследования детекторной характеристики амплитудного детектора

### Предварительная подготовка

1. Изучить схемы детекторов АМ колебаний.
2. Рассчитать величину ёмкости нагрузки  $C_H$  детектора, при которой возможно неискажённое детектирование АМ колебания с частотой модуляции  $F = 400$  Гц и несущей частотой  $f_0 = f_p$ . Величину сопротивления нагрузки  $R_I$  взять из таблицы.
3. Изобразить качественно временные диаграммы входного АМ напряжения  $U_{вх}(t)$  и напряжения на нагрузке  $U_{вых}(t)$ :
  - а) при правильно выбранной величине ёмкости нагрузки  $C_H$ ;
  - б) при слишком большой ёмкости нагрузки  $C_H$ ;
  - в) при отключённом конденсаторе нагрузки.
4. Определять коэффициент передачи детектора в режиме линейного детектирования.
5. Определить коэффициент передачи диодного детектора, приняв внутреннее сопротивление диода порядка  $R_i = 20-30$  Ом.
6. Изобразить примерный вид частотной характеристики диодного детектора.
7. Изобразить спектральные диаграммы входного сигнала, тока нелинейного элемента и выходного сигнала.
8. Ознакомиться с лабораторным заданием, контрольными вопросами.

### ***Лабораторное задание***

1. Собрать схему для исследования детектора АМ колебаний с использованием усиленного элемента (рис.3.2).
2. Установить напряжение смещения нелинейного элемента, равное напряжению отсечки по аппроксимирующей характеристике, полученной в предыдущей работе.
3. Снять и построить детекторную характеристику, изменяя входное немодулированное напряжение генератора V5 от 10 мВ до получения заметной нелинейности характеристики.
4. Определить границы линейного рабочего участка детекторной характеристики и выбрать рабочую точку (т.е. максимальную величину немодулированного высокочастотного сигнала на входе детектора).
5. Дополнить схему гальванически развязанной с детектором нагрузкой (рис.3.3). Величину сопротивления нагрузки R6 выбирать согласно варианту (Rн) из работы 1.  
Снять зависимость амплитуды выходного напряжения амплитудного детектора от глубины модуляции входного сигнала.
6. Исследовать квадратичный режим детектирования. Уменьшить входной сигнал до уровня 5 мВ и зарисовать осциллограммы выходного напряжения для нескольких значений коэффициентов модуляции. Пронаблюдать искажения выходного сигнала в этом режиме.
7. Собрать схему диодного детектора (рис.3.5).
8. Установив уровень немодулированной несущей на входе детектора порядка 0,5-1,0 В, снять зависимость напряжения на выходе детектора от глубины модуляции входного сигнала. Определить коэффициент передачи детектора. Сравнить с расчётным.
9. Пронаблюдать искажения выходного сигнала диодного детектора и уменьшение коэффициента передачи при увеличении ёмкости нагрузки в 3 раза, в 10 раз.
10. Снять частотную характеристику диодного детектора при правильно выбранных параметрах нагрузки.  
Изменяя частоту модуляции в пределах 500 Гц - 5 кГц, измерить напряжение на выходе детектора при постоянной глубине модуляции  $m = 0.3$ ,  $m = 0.6$ .

### ***Методические указания по выполнению лабораторного задания***

#### ***А) Построение детекторной характеристики***

Немодулированное колебание генератора V5 получают установкой коэффициента модуляции в положение  $m = 0$  (схема на рисунке 3.2). Рабочую точку (V2) нелинейного элемента устанавливают на изломе ВАХ (полученной по результатам предыдущей работы). Для построения детекторной характеристики нужно после первого успешного сеанса моделирования вывести на рабочее поле Табличную диаграмму и выбрать в ней переменную «Iо». Далее следует повторить испытания при других значениях амплитуды, и получить серию значений постоянной составляющей Iо нелинейного элемента при различных значениях амплитуды высокочастотного немодулированного колебания. Увеличивать амплитуду следует до появления заметной нелинейности детекторной характеристики. С помощью любого ПО или вручную построить график зависимости постоянной составляющей от амплитуды высокочастотного колебания при постоянном смещении.

Линейный участок детекторной характеристики определяет диапазон возможных амплитуд модулированного сигнала, который может быть демодулирован без искажений. Определив границы линейного рабочего участка детекторной характеристики, на его середине выбирают рабочую точку (т.е. величину немодулированного высокочастотного сигнала на входе детектора).

В) Построение зависимости амплитуды выходного напряжения детектора от глубины модуляции входного сигнала.

Для снятия зависимости выходного напряжения амплитудного детектора от глубины модуляции входного сигнала используем ту же схему исследований. Параметры входного модулированного сигнала выбираем таким образом, чтобы полностью использовать линейную часть детекторной характеристики при максимальной амплитуде АМ сигнала. В процессе исследований изменяем коэффициент модуляции генератора V5 в соответствии с заданием. от максимального значения до нуля. С помощью любого ПО или вручную построить график зависимости амплитуды выходного напряжения детектора от глубины модуляции входного сигнала.

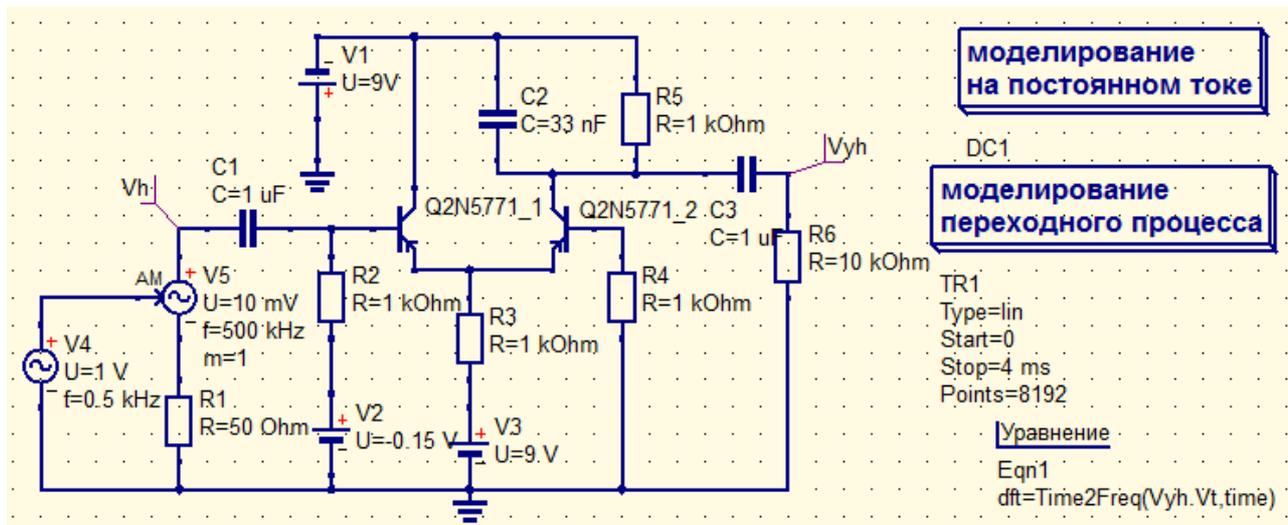


Рис. 3.3 Схема исследования характеристик амплитудного детектора

После успешного этапа моделирования поместить на рабочий стол три декартовы диаграммы и выбрать на них кривые «Vh», «Vyh» и «dft» для контроля входного и выходного сигналов амплитудного детектора (рис. 3.4 ).

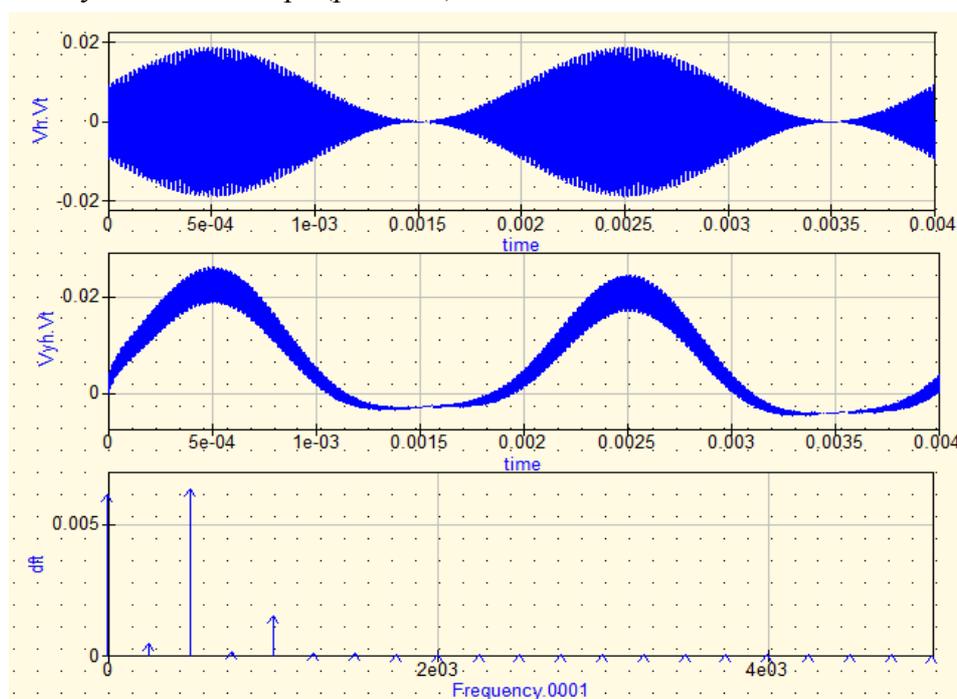


Рис. 3.4 Результаты исследований амплитудного детектора

Стиль кривой на графике «dft» установить «Стрелочки». На вкладке «Границы» графика «dft» вручную установить пределы анализа по оси X до 5000 Гц. По левой оси Y вручную установить начало оси на 0.

Частоты модуляции выбирать кратными 0,5 кГц. Под величиной выходного напряжения детектора следует понимать амплитуду первой гармоники выходного напряжения (брать из графика, либо дополнительно вывести на рабочий стол табличную диаграмму «dft»).

Результаты исследований могут быть подобны диаграммам, представленным на рисунке 3.4.

*C) Исследование квадратичного режима детектирования.*

Квадратичный режим детектирования исследуется по той же схеме. Рабочую точку установить на изломе линейной аппроксимации ВАХ. Входной сигнал уменьшается до уровня 5 мВ, и снимаются осциллограммы и спектрограммы выходного напряжения для нескольких значений коэффициентов модуляции. Пронаблюдать искажения выходного сигнала при изменении коэффициента модуляции в этом режиме.

Установить рабочую точку  $V2 = 0$  и повторит моделирование. Оценить полученные результаты.

*D) Исследование диодного амплитудного детектора.*

Собрать схему диодного детектора (рис.3.5). Диод выбрать из библиотеки «Diodes» с порядковым номером в списке диодов, соответствующем порядковому номеру студента в списке группы.

Техника измерений характеристик диодного детектора не отличается от ранее рассмотренных операций.

Выполнить процедуры, предусмотренные заданием.

Вывести результаты моделирования временных и спектральных характеристик на соответствующие графики.

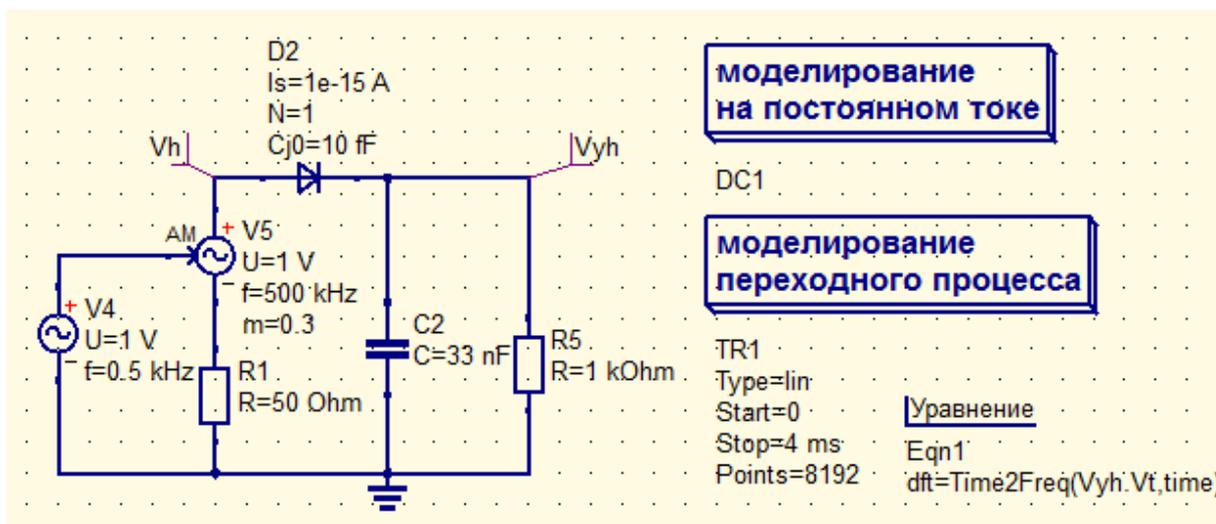


Рис. 3.5 Схема исследования диодного амплитудного детектора

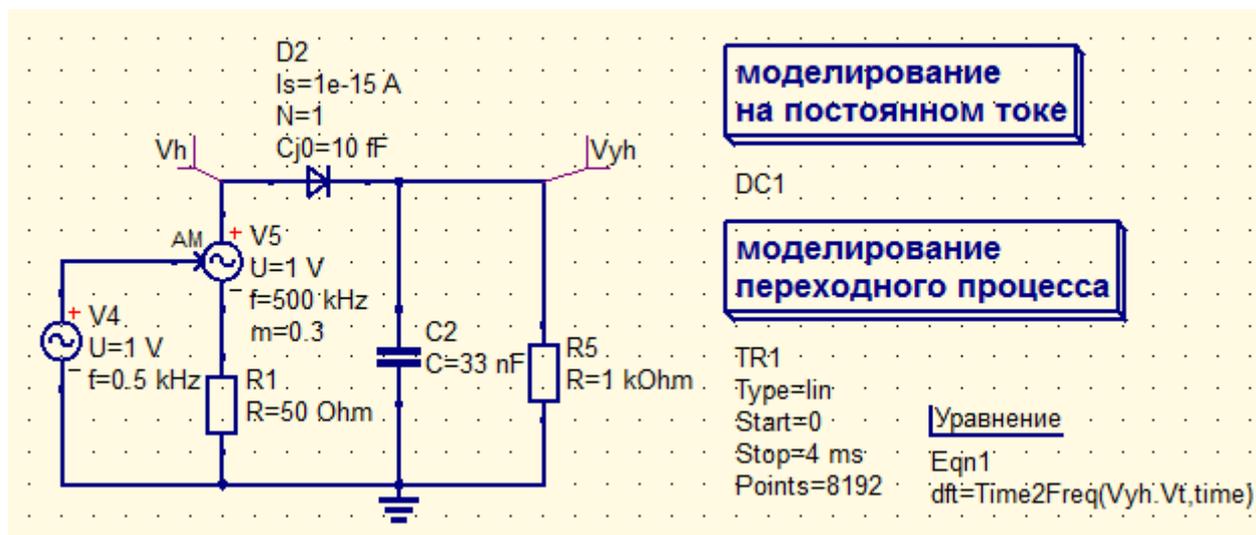


Рис. 3.5 Схема для исследования характеристик диодного амплитудного детектора

Для снятия частотной характеристики диодного изменять частоту модуляции в пределах 500 Гц - 5 кГц (кратно 500 Гц), измеряя амплитуду первой гармоники на выходе детектора при постоянной глубине модуляции  $m = 0.3$ ,  $m = 0.6$ .

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение детектора в радиоприёмнике?
2. Какие возможны режимы работы диодного детектора? Чем они определяются?
3. В чём преимущества линейного детектирования перед квадратичным.?
4. Чем следует руководствоваться при выборе параметров нагрузки диодного детектора?
5. Как будет изменяться угол отсечки при изменении сопротивления нагрузки диодного детектора  $R$  от 0 до  $\infty$  ?
6. Как будет изменяться угол отсечки при уменьшении ёмкости конденсатора нагрузки до нуля?
7. Дайте определение детекторной характеристики.
8. Какими причинами обусловлено появление нелинейных искажений на выходе детектора АМ колебаний?
9. Что такое коэффициент передачи детектора? От чего он зависит?
10. Как выбираются рабочие точки на статической характеристике УЭ для линейного и квадратичного режимов детектирования?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполнение лабораторных работ по дисциплине "Сигналы электросвязи" позволило не только закрепить и расширить теоретические знания студентов в области теоретических основ радиотехники и связи, но и получить навыки работы с аппаратурой при лабораторных исследованиях.

Вторая часть цикла работ, представленных в данном пособии, познакомила студентов с практикой исследования нелинейных цепей и устройств формирования сигналов на их основе. Выполнение теоретических расчетов и подтверждение их экспериментальными исследованиями позволила расширить и углубить знания в области теории сигналов. В частности, более детально были исследованы соотношения между временными и спектральными характеристиками сигналов при нелинейном усилении и умножении частоты, модуляции и детектировании сигналов.

Полученные знания и навыки будут полезны при изучении последующих профильных дисциплин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 2005.-462с.
2. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : Учебное пособие для вузов/ М.:ФОРУМ, 2005; М.:Инфа-М,2005.-431с.
3. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. -М: Горячая линия-Телеком, 2005.-704с.
4. Каратаева Н.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов и линейные фильтры: Учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 255 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

#### *Общие требования при выполнении работ*

1. Перед выполнением работы студенты обязаны:

- а) При домашней подготовке изучить соответствующие разделы теоретического курса.
- б) Произвести необходимые предварительные расчёты, изложенные в домашнем задании.

нии.

в) При выполнении работ в лаборатории ознакомиться с правилами техники безопасности.

2. Лабораторные работы выполняются индивидуально. Выбор варианта определяется порядковым номером студента в списке группы.

3. В процессе выполнения работы составляется отчёт, который должен содержать таблицы и графики полученных экспериментально зависимостей.

4. Если при составлении отчёта выявится недостаточность или сомнительность полученных данных, то необходимо экспериментально получить недостающие данные и произвести проверку сомнительных результатов.

5. Работа считается выполненной после защиты и утверждения отчета преподавателем.

6. Студенты, не выполнившие работу в часы занятий, обязаны выполнить ее в специально отведенное время.

#### *Содержание и оформление отчета*

1. Отчет по выполненной работе составляется индивидуально каждым студентом с указанием варианта.

2. Отчет оформлять в среде редакторов Microsoft Office либо Open Office. Отчет подписывается студентом.

3. Отчет должен содержать:

- Цель исследования.
- Расчетную часть задания.
- Структурные схемы проводимых исследований с указанием всех измерительных приборов.
- Краткое описание методик измерения параметров и характеристик исследуемого устройства.
- Результаты исследования в виде таблиц, графиков и осциллограмм с обязательным указанием условий, при которых они были получены (частота и амплитуда входного сигнала, параметры нагрузки...).
- Выводы, полученные на основании анализа расчетных и экспериментальных данных.

#### *Защита отчета*

1. Лабораторная работа считается выполненной после защиты студентом отчёта о проделанной работе.

2. При защите отчета студент должен представить оформленный надлежащим образом отчет и показать свои знания и умения в следующих вопросах:

- результаты расчётов по домашнему заданию и методика его выполнения;
- структурная схема исследований и методика выполнения работ;
- электрическая схема исследуемого устройства и назначение всех её элементов;

- теоретические закономерности, эквивалентные схемы и расчетные соотношения по данной работе.
  - полученные экспериментальные результаты и их анализ.
3. Защита отчета во время карантинных мероприятий проводится в формате конференции.

### **Краткие сведения о компонентах пакета QUCS**

Библиотека компонентов программы QUCS содержит ряд моделей источников сигналов (Компоненты / Источники), в частности, источники постоянного тока и напряжения, источники гармонических и импульсных колебаний, в том числе, и с возможностью модуляции параметров, источники шума, а также источники сигналов, форма которых задается пользователем. С описанием моделей компонентов можно познакомиться в пособии Technical.pdf (раздел 15), размещенном во вкладке Справка программы QUCS.

### **Базовый элемент цикла работ "Нелинейные цепи"**

Лабораторные работы цикла «Нелинейные цепи» выполняются с использованием общего элемента. Электрическая схема базового элемента цикла работ «Нелинейные цепи» приведена на рисунке рисунке А.1.

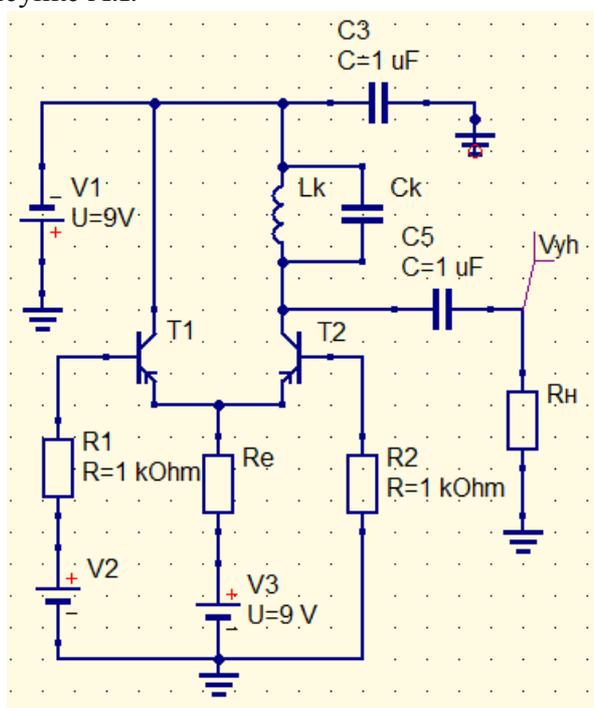


Рис. А.1 Схема базового элемента цикла работ «Нелинейные цепи»

Тип транзистора и параметры элементов нагрузки указаны в таблице А.1. Справочные данные таблицы также следует использовать для выполнения расчетов на этапе предварительной подготовки. Вариант задания соответствует номеру студента в списке группы.

Транзистор в соответствии с вариантом выбирать в библиотеке QUCS во вкладке прикрепленного окна: Библиотека/Transistors.

*Индивидуальные задания*

Таблица А.1.

Вариант	Транзистор, Т1, Т2	Индуктивность контура Lk, μH	Емкость контура Cк, nF	Сопротивление эмиттера Re, кОм	Сопротивление нагрузки Rн, кОм
1	2N2905A	10	10	1.0	10
2	2N2907A	11	9.1	1.1	11
3	2N2955	12	8.2	1.2	12
4	2N3703	13	7.5	1.3	13
5	2N3905	15	6.8	1.5	15
6	2N3906	16	6.2	1.6	16
7	2N4125	18	5.6	1.8	18
8	2N4126	20	5.1	2.0	20
9	2N4400	18	5.6	1.8	18
10	2N4401	16	6.2	1.6	16
11	2N4402	15	6.8	1.5	15
12	2N4403	13	7.5	1.3	13
13	2N4410	12	8.2	1.2	12
14	2N5086	11	9.1	1.1	11
15	2N5087	10	10	1.0	10
16	2N5088	10	10	1.0	10
17	2N5089	11	9.1	1.1	11
18	2N5172	12	8.2	1.2	12
19	2N5210	13	7.5	1.3	13
20	2N5366	15	6.8	1.5	15
21	2N5400	16	6.2	1.6	16
22	2N5401	18	5.6	1.8	18
23	2N5550	20	5.1	2.0	20
24	2N5551	18	5.6	1.8	18
25	2N5551	16	6.2	1.6	16
26	2N5769	15	6.8	1.5	15
27	2N5771	13	7.5	1.3	13
28	2N5772	12	8.2	1.2	12
29	2N5830	11	9.1	1.1	11
30	2N6431	10	10	1.0	10

В качестве справочного материала на рисунке А.2 приведены графики зависимости коэффициентов гармоник  $\alpha_0(\theta)$ ,  $\alpha_1(\theta)$ ,  $\alpha_2(\theta)$  и  $\alpha_3(\theta)$  от угла отсечки  $\theta$ . Эти характеристики могут быть использованы как при выполнении домашних заданий, так и при теоретическом обосновании корректности экспериментальных исследований.

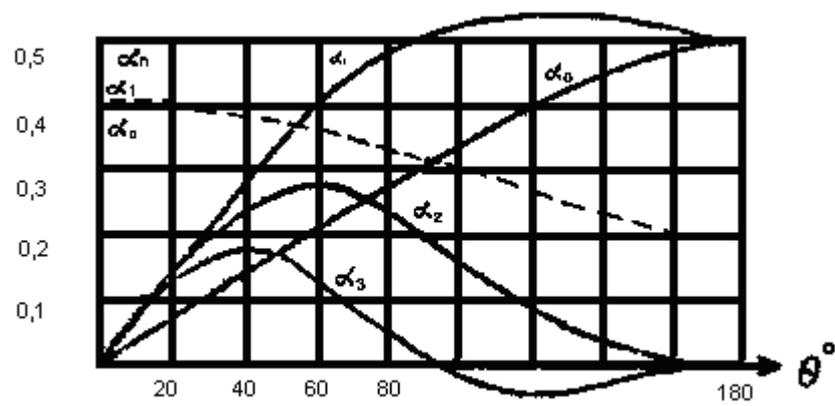


Рис. А.2 Зависимость коэффициентов  $\alpha_k$  гармоник и отношения  $\alpha_1/\alpha_0$  от угла отсечки  $\Theta$ .