

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное бюджетное государственное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиотехнических систем (РТС)

ПУШКАРЁВ В.П., ЛИТВИНОВ В.В.

СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СЖАТИЯ
И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОНВЕРСИИ
В АНАЛОГОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

**Методические указания по выполнению лабораторной работы
и самостоятельной подготовки студентов радиотехнического профиля в
компьютерной (виртуальной) среде DINAMA**



Томск – 2019

Пушкарёв В.П., Литвинов В.В.

Исследование эффектов сжатия и амплитудно-фазовой конверсии в аналоговых радиоэлектронных функциональных устройствах на биполярных транзисторах: методические указания для самостоятельной подготовки к лабораторной работе в компьютерной среде DINAMA по дисциплине «Схемотехника аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств» для студентов радиотехнических и телекоммуникационных профилей подготовки специалистов – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2019. – 25 с.

Методические указания содержат краткие сведения из теории расчёта нелинейных характеристик аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств на примере усилительного каскада на биполярном транзисторе КТ-315, а также методику проведения экспериментального исследования.

Указания предназначены для студентов направления подготовки специалистов «Радиотехника», «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также для самостоятельной подготовки студентов других направлений подготовки всех форм обучения, изучающих основы построения функциональных радиоэлектронных устройств и систем.

© Пушкарёв В.П., Литвинов В.В., 2019

© Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, 2019

АННОТАЦИЯ

Целью методических указаний по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Схемотехника аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств» является укрепление теоретических знаний и получение практических навыков исследования основных нелинейных искажений в усилителях на биполярных транзисторах, а также привитие навыков в оформлении практических результатов экспериментального исследования.

Представленные указания содержат краткие сведения из теории описания нелинейных передаточных свойств радиоэлектронных функциональных устройств на примере усилительного каскада на биполярном транзисторе.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
1. ВВЕДЕНИЕ	6
2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ DINAMA	7
2.1. Назначение программного обеспечения и область использования	7
2.2. Краткое описание программного продукта DINAMA	7
2.2.1. Описание работы программы DINAMA.....	7
2.2.2. Порядок работы с программой анализа нелинейных эффектов в радиоэлектронных устройствах.....	9
2.2.3. Вывод результатов расчёта передаточных функций.....	12
3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА	14
3.1. Правила и порядок выполнения лабораторной работы	14
3.2. Основные требования оформления отчёта	14
3.2.1. Правила оформления пояснительной записки по отчёту	14
3.2.2. Правила оформления результатов исследований	14
3.2.3. Требования к написанию выводов	14
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА СЖАТИЯ И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОНВЕРСИИ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	15
4.1. Цель работы	15
4.2. Описание электрической принципиальной схемы устройства	15
4.3. Краткие сведения из теории анализа нелинейных эффектов в аналоговых радиоэлектронных устройствах.....	18
4.4. Расчётное задание	20
4.5. Экспериментальное задание	21
4.6. Указания и рекомендации по проведению теоретического и экспериментального исследования	22
4.7. Рекомендации по оформлению экспериментальных результатов и выводов исследования	22
4.8. Вопросы для самостоятельной подготовки.....	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример оформления титульного листа.....	25

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АЧХ	- амплитудно-частотная характеристика
АФК	- амплитудно-фазовая конверсия
НПФ	- нелинейная передаточная функция
НФЧХ	- нелинейная фазочастотная характеристика
ОЭ	- усилительный каскад по схеме с общим эмиттером
ФЧХ	- фазочастотная характеристика
ФВЧ	- фильтр верхних частот
ФНЧ	- фильтр нижних частот
ФРВ	- функциональный ряд Вольтерра
$C_{КП}$	- пассивная ёмкость перехода коллектор-база
$C_{КА}$	- активная ёмкость перехода коллектор-база биполярного транзистора
$C_{Э}$	- диффузионная ёмкость эмиттерного перехода биполярного транзистора
f	- циклическая частота
$R_{\text{конт.Э}}$	- контактное сопротивление эмиттера биполярного транзистора
$\dot{H}_1[\omega]$	- линейная передаточная функция 1-го порядка на частоте ω
$\dot{H}_2[\omega, -\omega]$	- НПФ 2-го порядка на частоте $\omega=0$
$\dot{H}_2[\omega, \omega]$	- НПФ 2-го порядка на частоте 2ω
$\dot{H}_3[\omega_1, \omega_2, -\omega_3]$	- НПФ 3-го порядка на частоте ω
$\dot{H}_3[\omega_1, \omega_2, \omega_3]$	- НПФ 3-го порядка на частоте 3ω
ω	- круговая частота сигнала
$y(t)$	- выходной отклик нелинейно-инерционной системы

1. ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Схемотехника аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств», является одной из основных дисциплин профессионального цикла по направлениям подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к разработке аналоговых радиоэлектронных устройств и систем. Основными задачами изучения дисциплины является освоение основ схемотехники. В результате изучения дисциплины студент должен знать основы схемотехники аналоговых радиоэлектронных устройств, основные принципы и методы расчёта и проектирования. Студент должен уметь применять современные методы расчёта и анализа качественных показателей качества функциональных радиоэлектронных устройств. Изучение дисциплины базируется на основе физико-математической подготовки и знания дисциплин: основы теории электрических цепей, электродинамика и распространение радиоволн, радиотехнические цепи и сигналы, схемотехника аналоговых электронных устройств и т.д.

При изучении дисциплины «Схемотехника аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств» должен выполнить лабораторную работу по исследованию эффекта сжатия и амплитудно-фазовой конверсии типового усилителя на основе биполярных транзисторов, являющегося основой построения радиоэлектронных функциональных устройств. Данная лабораторная работа позволит изучить нелинейные передаточные свойства в частотной области их использования. Результатом проделанной работы является анализ и понимание принципа работы системы в целом в соответствии с требованиями образовательного стандарта и учебного плана подготовки студентов радиотехнических и телекоммуникационного направлений.

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ DINAMA

2.1. Назначение программного обеспечения и область использования

Программный продукт DINAMA предназначен для моделирования, расчёта и анализа линейных и нелинейных характеристик аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств. Он способен выполнять различные виды моделирования: расчёт нелинейных моделей диодов, варикапов, биполярных и полевых транзисторов; расчёт ФВЧ, ФНЧ и полосовых фильтров, широкополосных усилителей на биполярных транзисторах, расчёт S – параметров линейных функциональных усилителей; анализ и синтез аналоговых линейных и нелинейных функциональных радиоэлектронных схем и устройств и т.д.

2.2. Краткое описание программного продукта DINAMA

2.2.1. Описание работы программы DINAMA

Программный продукт DINAMA разработан под операционной системой MS-DOS на языке TurboBasic. Для запуска программного продукта DINAMA необходимо запустить исполняемый файл start.bat, который находится в папке DINAMA. Главное окно программы представлено на рисунке (Рис. 2. 1).

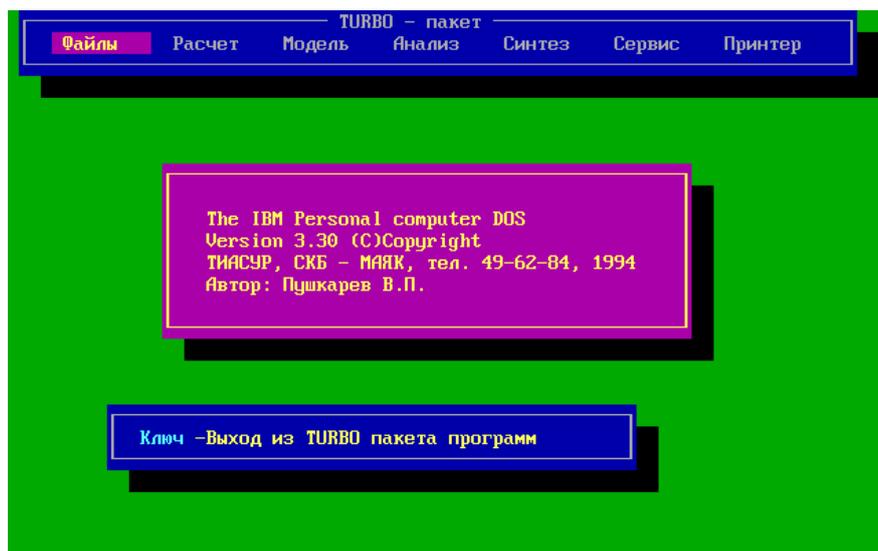


Рис. 2. 1. Главное окно DINAMA

В поле верхней части главного окна программного обеспечения находятся вкладки «Файлы», «Расчёт», «Модель», «Анализ», «Синтез», «Сервис», «Принтер». Перемещение между вкладками осуществляется с помощью стрелок на клавиатуре, выбор необходимой вкладки осуществляется с помощью нажатия клавиши Enter на клавиатуре, вернуться назад можно с помощью клавиши Esc. Навигация в окнах осуществляется с помощью стрелок, ввод вводимых параметров элемента осуществляется клавишей Enter, а перемещение между элементами с помощью клавиши PgDown. Для сохранения вводимых параметров необходимо, чтобы окно закрылось самостоятельно (использовать клавишу Esc нельзя).

Для проведения анализа радиоэлектронных устройств необходимо перейти во вкладку «Анализ» и после нажатия клавиши «Enter» или стрелки вниз выбрать вид анализа «Линейных схем» или «Нелинейных схем». Для исследования нелинейных схем необходимо выбрать вкладку «Нелинейных схем», затем ввести команду и приступить к процедуре введения данных или проведения анализа ранее введённых нелинейных схем. В последнем случае в верхнем правом углу обозначится имя последней анализируемой схемы (Рис. 2. 2). При отсутствии введённых ранее данных в верхнем правом углу обозначится имя схемы: NONAME.

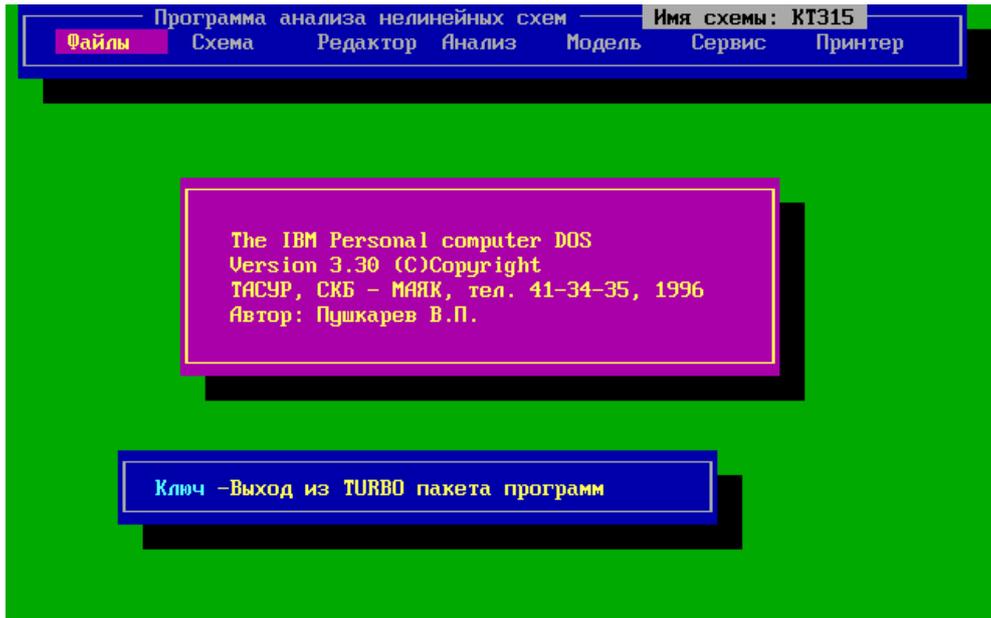


Рис. 2. 2. Окно программы анализа нелинейных схем

Для удаления предыдущей схемы необходимо выбрать вкладку «Схема» и нажать операцию «Удаление схемы», и после подтверждения удаления схемы и очистки памяти клавишей «Y» имя схемы изменится на NONAME (Рис. 2. 3).



Рис. 2. 3. Процедура удаления схемы

После очистки от данных предыдущей схемы приступают к вводу новых данных.

2.2.2. Порядок работы с программой анализа нелинейных эффектов в радиоэлектронных устройствах

Для проведения анализа нелинейных характеристик радиоэлектронных устройств на первом этапе необходимо составить электрическую принципиальную схему. В качестве примера представлен усилитель на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером (ОЭ) (Рис. 2. 4).

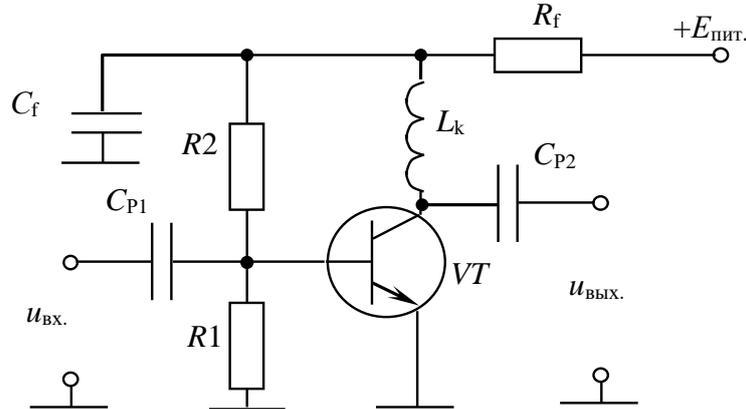


Рис. 2. 4. Схема электрическая принципиальная усилительного каскада на биполярном транзисторе КТ-315Б

$R1 = 470 \text{ Ом}$; $R2 = 3500 \text{ Ом}$; $C_{P1} = 100000 \text{ пФ}$; $C_{P2} = 100000 \text{ пФ}$; $L_k = 100000 \text{ нГн}$;
 $C_f = 100000 \text{ пФ}$; $R_f = 0,10 \text{ Ом}$

Биполярный транзистор VT (Рис. 2. 4) представляется в виде эквивалентной схемы (Рис. 2. 5).

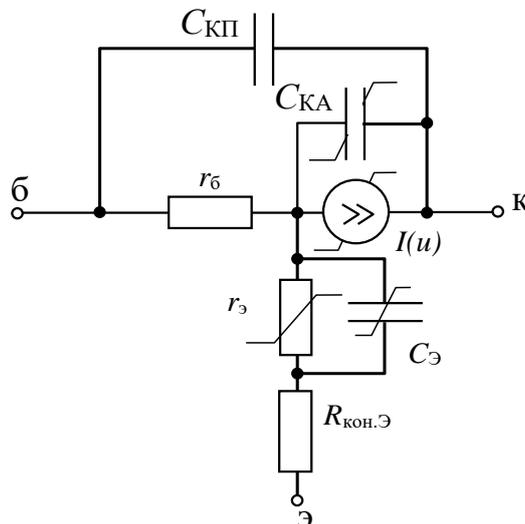


Рис. 2. 5. Эквивалентная схема биполярного транзистора

$r_б = 100 \text{ Ом}$ – сопротивление базы; $C_{КП} = 1 \text{ пФ}$ – пассивная ёмкость коллектор – база;
 $C_{КА} = 2 \text{ пФ}$ – активная ёмкость коллектор – база; $C_э = 0,5 \text{ пФ}$ – ёмкость эмиттерного перехода; $R_{кон.э} = 1 \text{ Ом}$ – сопротивление контакта эмиттера; б – база, э – эмиттер; к - коллектор

Нелинейные искажения в транзисторе связаны с нелинейностью ёмкости коллекторного перехода ($C_{КА}$), диффузионной ёмкости ($C_э$), сопротивления эмиттера ($r_э$) и источника тока, зависящего от напряжения входного сигнала.

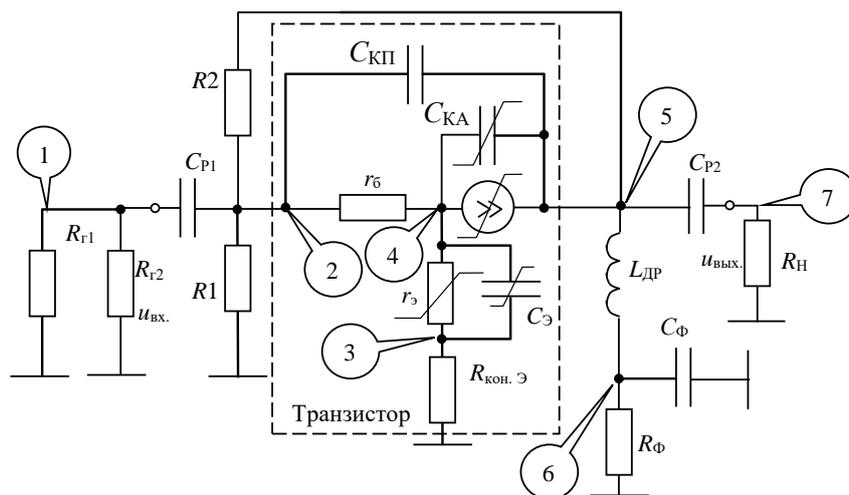


Рис. 2. 6. Эквивалентная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе ($R_{Г1} = R_{Г2} = 100 \text{ Ом}$ – сопротивление генераторов; $R_H = 50 \text{ Ом}$)

Для ввода новой схемы необходимо перейти во вкладку «Схема» → «Ввод схемы», ввести «Имя новой схемы», заполнить поля окна «Состав схемы», число узлов, узел выхода, количество R, L, C – элементов (ВНИМАНИЕ: Все активные элементы представляются в виде эквивалентных схем, поэтому необходимо учитывать количество пассивных элементов, не только вокруг активного элемента, но и внутри него), количество активных элементов (Рис. 2. 7).

После заполнения всех полей окна «Состав схемы», появится окно ввода данные RLC – элементов, в котором необходимо ввести тип элемента: r^* или R^* – сопротивление, l^* или L^* – катушка индуктивности, c^* или C^* – конденсатор, где $*$ – уникальное название элемента. Необходимо задать номинал, узлы, между которых включен этот элемент, узел «0» обозначает узел заземления (Рис. 2. 7).

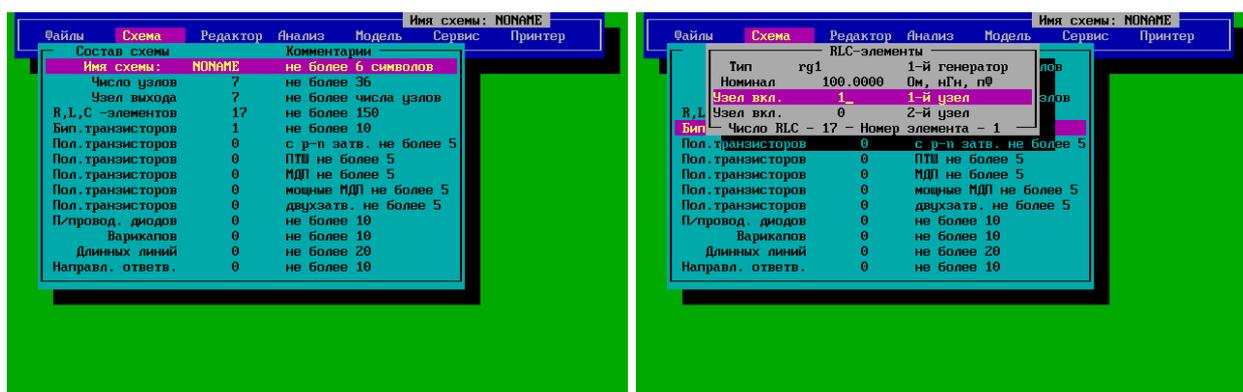


Рис. 2. 7. Создание новой исследуемой схемы

По окончании ввода сведений о пассивных элементах, программа запросит, были ли допущены ошибки при задании элементов. Если вы допустили ошибки при вводе, нажмите «У» и исправьте допущенные ошибки, или нажмите «N» или клавишу пробел для продолжения ввода данных. Далее появится окно с

названием выбранного активного элемента, где необходимо задать параметры (Рис. 2. 8). Идентификация активного элемента определяется его типом - b^* или V^* – биполярный транзистор. Следующее окно позволяет выбрать рабочую температуру, степень анализа, а также число анализируемых частот. Далее появится окно «Массив частот», где необходимо задать частоты бигармонического сигнала (Рис. 2. 9).

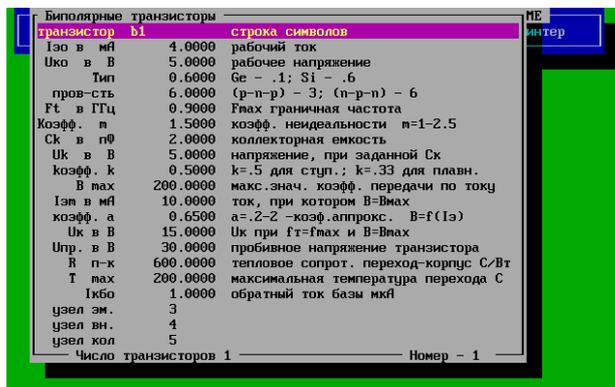


Рис. 2. 8. Окно параметров активного элемента

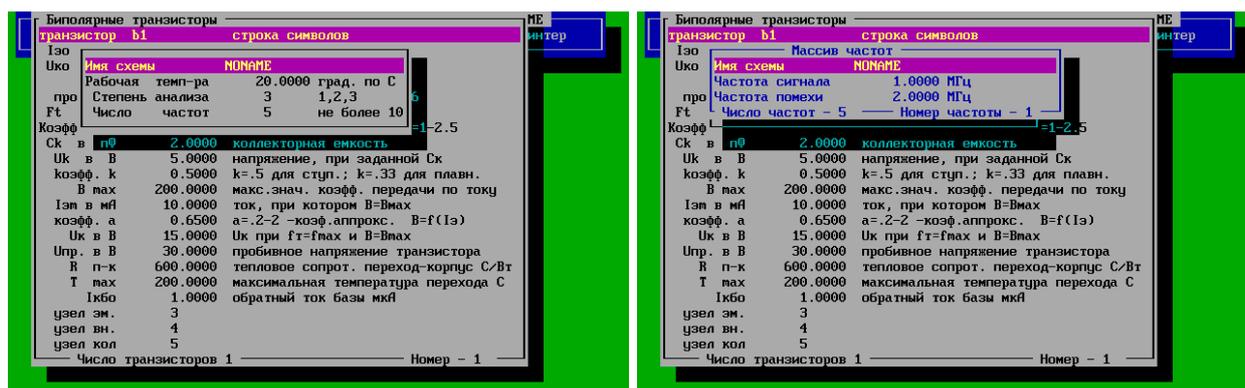


Рис. 2. 9. Определение степени анализа, число частотных меток и их значения

Для введения изменений в вашей схеме или переопределения области анализируемых частот используется вкладка «Редактор» (Рис. 2. 10).



Рис. 2. 10. Редактирование параметров схемы и анализа

После ввода данных производится запуск расчёта нелинейных передаточных функций моделирования переходят во вкладке «Анализ» и запускают процедуру «Расчёт передаточных функций» (Рис. 2. 11)

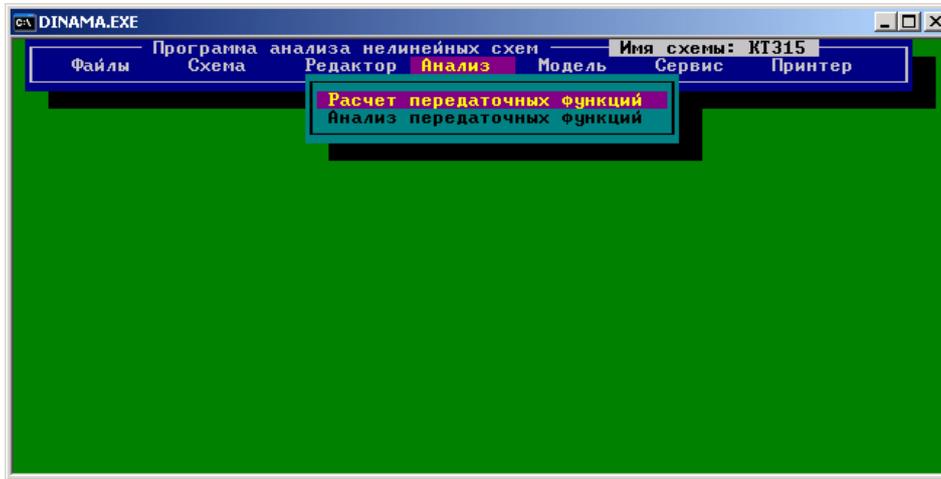


Рис. 2. 11. Запуск процедуры расчёта передаточных функций

После расчёта нелинейной модели активных элементов (биполярного транзистора) вывод параметров нелинейной НПФ устройства.

2.2.3. Вывод результатов расчёта передаточных функций

На первом этапе расчёта характеристик исследуемого аналогового функционального радиоэлектронного устройства на экран выводится результаты расчёта нелинейных параметров активного элементы для исследуемого режима работы функционального устройства (Рис. 2. 12). Если результаты расчёта нелинейной модели соответствует безаварийному режиму, то для продолжения расчёта НПФ схема необходимо нажать клавишу «Пробел».

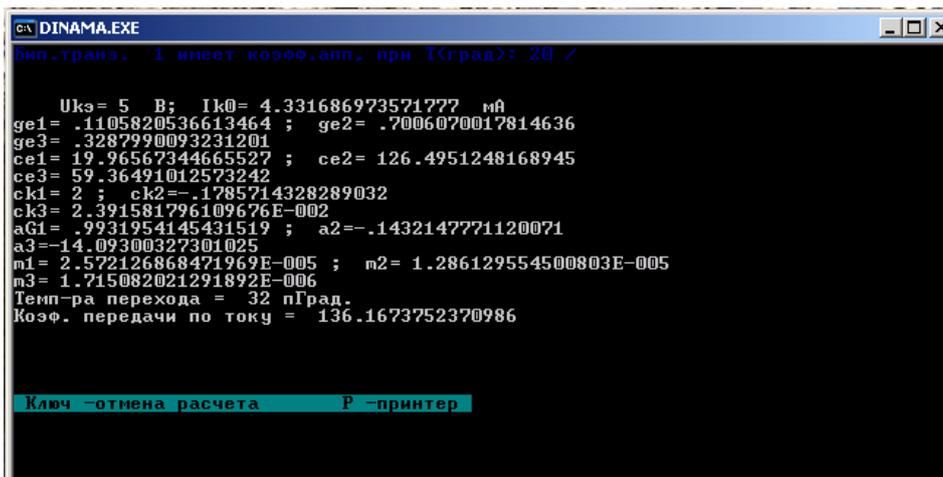


Рис. 2. 12. Результаты расчёта параметров биполярного транзистора для заданного режима работы

После задания всех параметров схемы и определения области исследуемых частот можно перейти к анализу, для этого перейдите на вкладку «Анализ» → «Расчёт передаточных функций». После выполнения расчёта передаточных

функция на экран выводятся режимы и динамические параметры активных элементов. Для возврата в основное меню нажмите клавишу Esc, а для продолжения расчета нажмите клавишу пробел. По окончании расчета необходимо задать амплитуды сигнала U_c и/или помехи U_n , после чего вы попадёте в окно «Нелинейные передаточные функции», где приводятся результаты для заданных частотных значений амплитуд сигнала и помехи. Просмотр частотных значений выходного отклика производится нажатием клавиши пробел. При просмотре результатов расчета возможен возврат в основное меню нажатием клавиши F10. По окончании просмотра данных выходного отклика происходит возврат в меню для задания новых значений амплитуд сигнала и помехи (Рис. 2. 13).

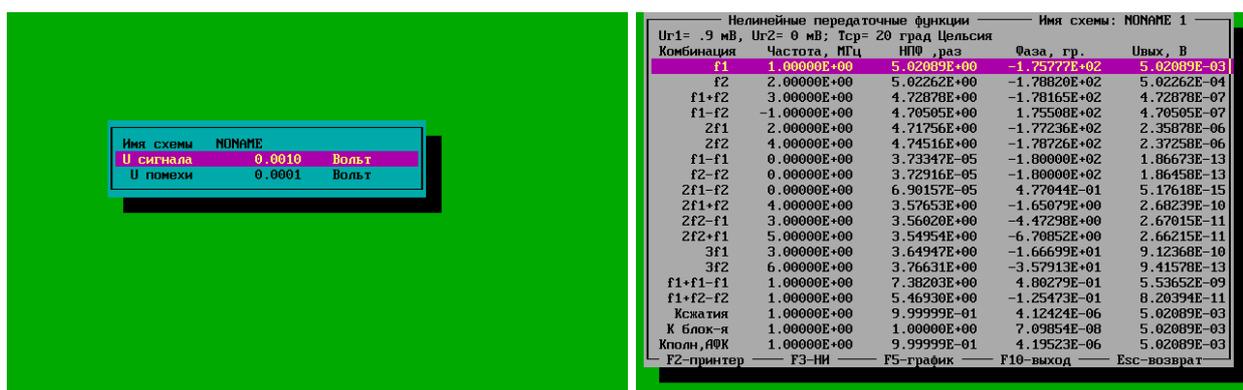


Рис. 2. 13. Окно задания амплитуды сигналов и результат анализа передаточных функций

Для удобства анализа результатов можно воспользоваться возможностями захвата и сохранения скриншота экранного изображения, для этого необходимо воспользоваться комбинацией клавиш Ctrl+F5 (скриншоты хранятся по следующему адресу: ... \DINAMA \Data \settings \capture).

3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

3.1. Правила и порядок выполнения лабораторной работы

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима тщательная подготовка, предварительно изучив цель работы, основные сведения из теории и принципа работы, исследуемой электрической принципиальной схемы. В результате выполнения лабораторной работы представляется отчёт. Варианты исходного задания представлены в настоящих указаниях. Выбор варианта производится по указанию преподавателя.

3.2. Основные требования оформления отчёта

3.2.1. Правила оформления пояснительной записки по отчёту

Отчет по лабораторной работе должен содержать наименование темы лабораторной работы, цель и задачу исследования. В нем приводится исследуемая электрическая принципиальная схема, краткое ее описание, а при необходимости и эквивалентная схема. В основной части отчета по лабораторной работе излагаются результаты теоретического расчета и экспериментальных исследований. В завершении исследований представляются выводы по каждому пункту исследования. В выводах необходимо представить количественную и качественную оценку исследуемых зависимостей с пояснением причин поведения и характера зависимостей или параметра.

3.2.2. Правила оформления результатов исследований

Все результаты теоретического расчета и экспериментального исследования рекомендуются приводить в виде таблиц или графиков. Предпочтительно, чтобы результаты исследований представлялись в виде графиков, по возможности на одном рисунке. Такое представление дает возможность провести сравнительный анализ зависимостей при различных вариантах схемотехнической реализации или при различных изменениях входных параметрах исследуемого объекта.

3.2.3. Требования к написанию выводов

Лабораторная работа завершается написанием выводов по каждому исследуемому пункту задания на экспериментальное исследование. Формирование вывода производится в три этапа: описательного, констатирующего и пояснения закономерностей и/или причин их изменения или отклонения от теории. На первом этапе необходимо проиллюстрировать результаты экспериментального исследования в графическом или табличном виде и описать поведение зависимостей при различных режимах исследования. На втором – необходимо представить качественную и количественную оценку исследуемой зависимости и описать характер изменения ее поведения. На третьем этапе - производится анализ причин поведения теоретических и экспериментальных зависимостей с последующей оценкой результатов расчета и эксперимента, а также поясняется причина их расхождения. В завершение выводов необходимо представить общие закономерности поведения измеряемых зависимостей и их связи с параметрами исследуемой схемы или системы.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА СЖАТИЯ И АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ КОНВЕРСИИ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

4.1. Цель работы

Целью работы по исследованию нелинейных процессов является исследование:

- определение спектрального состава выходного отклика усилителя на бигармоническое воздействие
- частотно зависимых нелинейных передаточных функций 1-го, 2-го и 3-го порядков усилителя при различных режимах работы транзистора;
- частотно зависимой амплитудно-фазовой конверсии усилителя на биполярном транзисторе при различных режимах работы;
- анализ результатов экспериментального исследования усилителя.

Объектом исследований является биполярный транзистор КТ-315, включённый по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

По результатам исследования необходимо, по каждому пункту, необходимо представить выводы.

4.2. Описание электрической принципиальной схемы устройства

Целью работы по исследованию нелинейных процессов является исследование эффектов сжатия и амплитудно-фазовой конверсии в усилительном каскаде на биполярном транзисторе КТ-315Б по схеме с ОЭ (Рис. 4. 1).

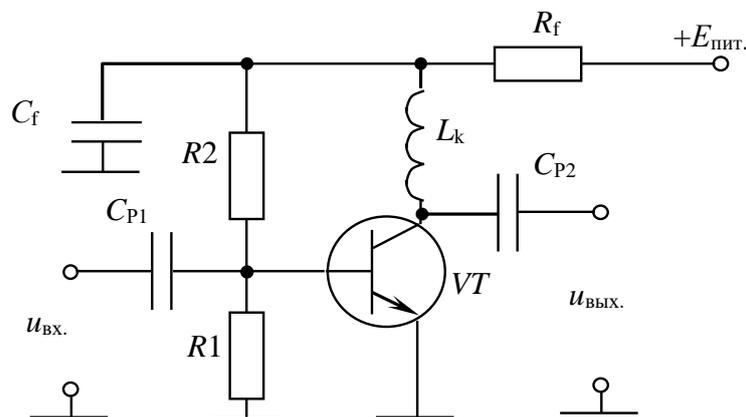


Рис. 4. 1. Схема электрическая принципиальная усилительного каскада на биполярном транзисторе КТ-315Б

$R1 = 470 \text{ Ом}; R2 = 3500 \text{ Ом}; C_{P1} = 100000 \text{ пФ}; C_{P2} = 100000 \text{ пФ}; L_k = 100000 \text{ нГн}; C_f = 100000 \text{ пФ}; R_f = 0,10 \text{ Ом}$

Исследуемый усилительный каскад выполнен на основе биполярного транзистора КТ-315Б VT , включённого по схеме с ОЭ. Режим работы усилителя по постоянному току, определяется базовым делителем $R1$ и $R2$. Элементы R_f и C_f обеспечивают фильтрацию источника питания, а также регулировку фактора

обратной параллельной обратной связи по постоянному напряжению. Для исключения дополнительной обратной связи, в цепь коллектора, включена индуктивность L_k . Для удаления постоянной составляющей источник подключается ко входу каскада через разделительную ёмкость C_{P1} , а выход каскада подключается к нагрузке через ёмкость C_{P2} (Рис. 4. 2).

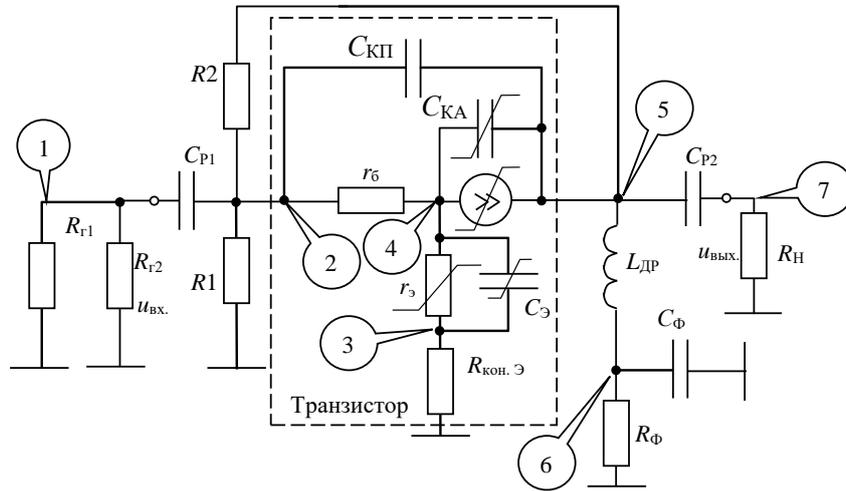


Рис. 4. 2. Эквивалентная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе

Данные по составу схемы представлены в таблице (Таблица 4. 1)

Таблица 4. 1. Окно редактора состава схемы

Имя схемы	Число узлов	Узел выхода	Число R [Ом], L [нГн], C [пФ]	Число биполярных транзисторов
КТ315	7	7	14	1

Примечание: для изменения узла выхода, в процессе исследования передаточных свойств необходимо войти в режим редактора состава схемы и проделать соответствующие действия.

Массив данных схемы (Рис. 4. 2) представлены в таблице (Таблица 4. 2)

Таблица 4. 2. Окно редактора пассивных элементов схемы

№ п/п	Элемент	Номинал R [Ом], L [нГн], C [пФ]	Узел 1	Узел 2	Комментарий
1.	Rg1	100	1	0	Сопротивление 1-го генератора
2.	Rg2	100	1	0	Сопротивление 2-го генератора
3.	Rn	50	7	0	Сопротивление нагрузки
4.	Cr1	100000	1	2	Разделительная ёмкость на входе
5.	Rb1	470	2	0	Сопротивление базового делителя
6.	Rb2	3500	2	6	Сопротивление базового делителя
7.	Cкр	1	2	5	Пассивная ёмкость коллектор – база
8.	Rb	100	2	4	Сопротивление тела базы транзистора
9.	Ce	0.5	3	4	Ёмкость эмиттерного перехода
10.	Re	0.5	3	0	Сопротивление контакта эмиттера
11.	Lk	100000	5	6	Индуктивность нагрузки
12.	Cf	100000	6	0	Ёмкость фильтра питания
13.	Rf	0.1	6	0	Сопротивление фильтра питания
14.	Cr2	100000	5	7	Разделительная ёмкость на выходе

Примечание: 1. Для изменения варьируемого параметра R_b , в процессе исследования передаточных свойств необходимо войти в режим редактора пассивных элементов схемы и произвести соответствующие действия. 2. Первые символы, обозначающие тип пассивного элемента (R, L, C) могут быть строчные.

Основные параметры транзистора КТ315 с комментариями приведены в таблице (Таблица 4. 3).

Таблица 4. 3. Исходные параметры транзистора КТ315

№ п/п	Наименования параметра	Параметр	Комментарий
1.	Тип транзистора	В или в	Транзистор биполярный
2.	$I_{э0}$, мА	5	Рабочий ток
3.	$U_{к0}$, В	5	Рабочее напряжение
4.	Тип транзистора	0.6	Ge=0,1; Si=0.6
5.	Проводимость	6	(p-n-p) – 3; (n-p-n) – 6
6.	F_t , ГГц	0.9	Максимальная граничная частота
7.	Коэфф. m	1.5	Коэффициент неидеальности 1.0...2.5
8.	C_k , пФ	2	Ёмкость коллектора активная
9.	U_k , В	5	Напряжение для C_k
10.	Коэффициент k	0.33	$k=0.5$ (ступ.); $k=0.33$ (плавный) переход
11.	I_{max}	200	Макс. стат. коэф. по току в схеме с ОЭ
12.	$I_{эм}$, мА	10	Ток эмиттера при I_{max}
13.	Коэффициент a	0.65	0.2...2.0 при I_{max}
14.	U_k , В	15	Напряжение на коллекторе при I_{max}
15.	Упр.	30	Напряжения пробоя
16.	$R_{п-к}$, $С^0/Вт$	600	Тепловое сопротивление переход-корпус
17.	T_{max} , $С^0$	200	Максимальная температура перехода
18.	$I_{кб0}$, мкА	1	Обратный ток базы
19.	Узел эмиттера	3	Эмиттер
20.	Узел внутренний	4	Внутренний узел перехода база-эмиттер
21.	Узел коллектора	5	Коллектор

Исследование частотных зависимостей нелинейных эффектов проводится для следующих параметров биполярного транзистора (Таблица 4. 4).

Таблица 4. 4. Варианты значений тока эмиттера $I_{э0}$, сопротивления базы r_b и статического коэффициента по току с общим эмиттером β_0

№ Варианта	$I_{э0}$, мА	r_b , Ом	Статический коэффициент передачи по току β_0
0.	–	100	200
1.	1	95	195
2.	2	96	196
3.	3	97	197
4.	4	98	198
5.	5	99	199
6.	6	101	201
7.	7	102	202
8.	8	103	203
9.	9	104	204
10.	10	105	205

Примечание: 1. Для установки варьируемого параметра тока эмиттера $I_{\text{эо}}$, или других параметров (Таблица 4. 4) параметров транзистора, в процессе исследования передаточных свойств необходимо войти в режим редактора транзистора (Таблица 4. 3) и проделать соответствующие действия.

Вариант задания выдаётся преподавателем из таблицы (Таблица 4. 4). Значения рабочего тока $I_{\text{эо}}$, и сопротивления базы транзистора r_6 и статического коэффициента передачи по току β_0 в схеме с общим эмиттером. Вариант «0» используется для расчётной части лабораторной работы. Ток эмиттера в расчётной части принимается в соответствии с заданным вариантом.

4.3. Краткие сведения из теории анализа нелинейных эффектов в аналоговых радиоэлектронных устройствах

Аналоговое радиоэлектронное функциональное устройство представляется в виде нелинейно-инерционной системы (Рис. 4. 3).

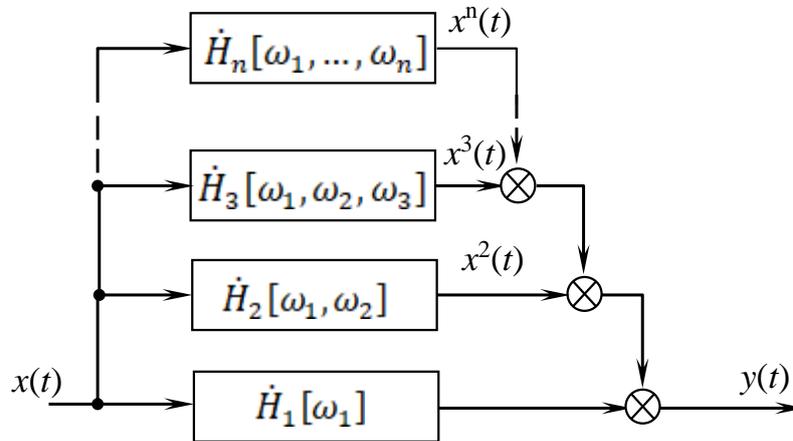


Рис. 4. 3. Структурная схема нелинейно-инерционной системы

Выходной отклик нелинейно-инерционной системы 3-го порядка представляется степенным функциональным рядом Вольтерра (ФРВ):

$$y(t) = \dot{H}_1[\omega_1] \cdot x(t) + \dot{H}_2[\omega_1, \omega_2] \cdot x^2(t) + \dot{H}_3[\omega_1, \omega_2, \omega_3] \cdot x^3(t) \quad (4. 1)$$

где $\dot{H}_1[\omega_1]$ – линейная передаточная функция;

$\dot{H}_2[\omega_1, \omega_2]$, $\dot{H}_3[\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ – нелинейная передаточная функция 2-го и 3-го порядков.

для моногармонического сигнала $x(t) = u \cdot \cos(\omega t)$ имеет вид

$$y(t) = \dot{H}_1[\omega] \cdot u \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \dot{H}_2[\omega, -\omega] \cdot u^2 + \frac{1}{2} \dot{H}_2[\omega, \omega] \cdot u^2 \cos(2\omega t) + \frac{3}{4} \dot{H}_3[\omega, \omega, -\omega] \cdot u^3 \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \dot{H}_3[\omega, \omega, \omega] \cdot u^3 \cos(3\omega t). \quad (4. 2)$$

Выходной отклик нелинейно-инерционной системы на частоте полезного сигнала $x(t) = u \cdot \cos(\omega t)$ относительно линейной части (4. 2) имеет вид

$$y(t) = \dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u] \cdot \dot{H}_1[\omega] \cdot u \cdot \cos(\omega t), \quad (4.3)$$

Подставив (4.3) в левую часть выражения (4.2) получим

$$\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u] \cdot \dot{H}_1[\omega] \cdot u \cdot \cos(\omega t) = \dot{H}_1[\omega] \cdot u \cdot \cos(\omega t) + \frac{3}{4} \dot{H}_3[\omega, \omega, -\omega] \cdot u^3 \cos(\omega t), \quad (4.4)$$

где $\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u]$ – коэффициент сжатия, обусловленный влиянием НПФ 3-го порядка на частоте ω .

Разделив левую и правую части в выражении (4.4) получим коэффициент сжатия, имеющего частотную, временную и амплитудную зависимости от входного полезного сигнала

$$\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u] = 1 + \frac{3}{4} \frac{\dot{H}_3[\omega, \omega, -\omega]}{\dot{H}_1[\omega]} \cdot u^2. \quad (4.5)$$

Обозначим $\frac{\dot{H}_3[\omega, \omega, -\omega]}{\dot{H}_1[\omega]} = \dot{M}_{3,1}[\omega, \omega, -\omega]$ – мера нелинейности 3-го порядка на частоте полезного сигнала.

Выражение (4.5) примет вид

$$\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u] = 1 + \frac{3}{4} \dot{M}_{3,1}[\omega, \omega, -\omega] \cdot u^2. \quad (4.6)$$

Если $\dot{M}_{3,1}[\omega, \omega, -\omega] < 1$, то амплитуда сигнала на частоте полезного сигнала на выходе нелинейной системы будет уменьшаться – эффектом сжатия. Если $\dot{M}_{3,1}[\omega, \omega, -\omega] > 1$ – эффект десжатия при $\dot{M}_{3,1}[\omega, \omega, -\omega] = 1$ – система линейная.

Коэффициентом сжатия будет определяться выражением

$$|K_{\text{СЖ}}[\omega t, u]| = \sqrt{\text{Re}(\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u])^2 + \text{Im}(\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u])^2} \quad (4.7)$$

Изменение фазы на выходе нелинейно-инерционной системы, обусловленной амплитудой входного полезного сигнала, называется *собственной амплитудно-фазовой конверсией* и имеет вид

$$\Delta\varphi_{\text{СОБ}}[\omega t, u] = \arg(\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u]) = \arctg \left[\frac{\text{Im}(\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u])}{\text{Re}(\dot{K}_{\text{СЖ}}[\omega t, u])} \right] \quad (4.8)$$

С учётом принятых обозначений модуль коэффициента сжатия и АФК будет равным

$$|K_{\text{СЖ}}(\omega t, u)| = 1 + \frac{3}{4} \frac{|H_3[\omega, \omega, -\omega]| e^{j\varphi_3[\omega, \omega, -\omega]}}{|H_1[\omega]| e^{j\varphi_1[\omega]}} \cdot u^2 \quad (4.9)$$

$$|K_{\text{СЖ}}(\omega t, u)| = \sqrt{1 + \frac{3}{2} |M_{3,1}| u^2 \cos(\Delta\varphi_{3,1}) + \left(\frac{3}{4} |M_{3,1}| u^2 \right)^2}, \quad (4.10)$$

где $|M_{3,1}| = \frac{|H_3[\omega, \omega, -\omega]|}{|H_1[\omega]|}$ – модуль меры нелинейности 3-го порядка,

$\Delta\varphi_{3,1} = \varphi_3[\omega, \omega, -\omega] - \varphi_1[\omega]$ – разность фаз между передаточными функциями 3-го и 1-го порядка.

Выходное напряжение усилителя при заданном напряжении на входе, с учётом нелинейных свойств будет

$$u_{\text{ВЫХ}} = |K_{\text{СЖ}}[\omega t, u]| \cdot |H_1[\omega]| \cdot u_{\text{ВХ}}, \quad (4.11)$$

Собственная амплитудно-фазовая конверсия

$$\Delta\varphi_{\text{СОБ}}(\omega t, u) = \arg(K_{\text{СЖ}}(u\omega t, u)) = -\arctg \left(\frac{\sin(\Delta\varphi_{1,3})}{\cos(\Delta\varphi_{1,3}) + \frac{4}{3} \frac{1}{|M_{3,1}|} \frac{1}{u^2}} \right). \quad (4.12)$$

Подробная информация по описанию частотных зависимостей нелинейно-инерционной системы представлена в [1, 2]

4.4. Расчётное задание

В процессе подготовки лабораторной работы необходимо произвести расчёт выходного напряжения усилителя и АФК на частоте 5 МГц при заданном значении тока эмиттера.

1. Выписать модуль и фазу НПФ 1-го и 3-го порядка согласно варианта, выданного преподавателем (Таблица 4. 5).

Таблица 4. 5. Нелинейные передаточные функции усилителя на КТ315

Тип транзистора КТ315Б: $f_c=5$ МГц; $r_{\bar{\sigma}} = 100$ Ом; $\beta_0 = 200$					
№ вар.	$I_{\text{Э0}}, \text{мА}$	$\dot{H}_1[\omega_c]$		$\dot{H}_3[\omega_c, \omega_c, -\omega_c]$	
		Модуль, раз	Фаза, гр.	Модуль, раз	Фаза, гр.
1.	1	1,45088	178,083	1,06361	-26,218
2.	2	2,65384	177,204	2,83031	-24,3874
3.	3	3,7835	176,296	4,94436	-25,2993
4.	4	4,83931	175,352	6,98954	-27,5031
5.	5	5,82234	174,374	8,63276	-30,3672
6.	6	6,73510	173,366	9,68435	-33,59
7.	7	7,58120	172,333	10,0932	-37,0125
8.	8	8,36485	171,278	9,90910	-40,5521
9.	9	9,09055	170,201	9,23986	-44,1725
10.	10	9,76261	169,099	8,21625	-47,8692

2. Используя выражение (4. 11) рассчитать напряжение на выходе усилителя при напряжении на входе $U_{\text{ВХ}} = 0,4\text{В}$.

3. Используя выражение (4. 12) АФК усилителя при напряжении на входе $U_{\text{вх}} = 0,4B$.

4.5. Экспериментальное задание

Для выполнения лабораторной работы по исследованию эффекта сжатия и АФК в усилительном каскаде на биполярном транзисторе КТ315 необходимо:

4.5.1. Запустить файл start.bat в папке DINAMA;

4.5.2. Выбрать вкладку «Анализ» → «Нелинейных схем». Если предыдущая схема не удалена, то будет загружена последняя вариант схемы;

4.5.3. При необходимости удаления текущей схемы выполнить процедуру: «Схема» → «Удаление схемы» → «Подтвердить удаление» (Y) → Enter. Название схемы изменится на NONAME.

4.5.4. Загрузить файл для исследования: «Файлы» → «С диска» → КТ315 → Enter. Появится сообщение: «Файл КТ315 загружен» и название схемы в правом верхнем углу программы изменится на КТ315. (Примечание. Если у вас нет данной схемы, то необходимо получить у преподавателя файл содержащий схему усилителя КТ315.NDT и поместить его по адресу: ... \DINAMA\PUSKAREV\DATA\NDT\).

4.5.5. Создать массив анализируемых частот и/или коррекцию температурного режима окружающей среды. По умолчанию устанавливается режим комнатной температуры 20 C^0 . Для этого нужно перейти на вкладку «Редактор» → «Температура, частота», задайте «Число частот», равное 10, и пролистать список до конца с помощью клавиши «Вниз» или PgDown. В окне «Номер частоты – 1» надо задать частоту сигнала $f_c = 1\text{ МГц}$, частоту помехи $f_{\text{п}} = 3\text{ МГц}$ и, доведя выделение до конца, перейти в «Номер частоты – 2» и заполнить все оставшиеся частоты по аналогии в соответствии с заданным вариантом (Таблица 4. 6).

4.5.6. Задать значение рабочего тока I_{90} в соответствии со своим вариантом (Таблица 4. 5). Для этого перейти во вкладку «Редактор» → «Биполярные транзисторы». Задайте рабочий ток I_{90} и нажмите клавишу PgDown, чтобы сохранить внесённые изменения.

4.5.7. Перейти во вкладку «Анализ» → «Расчёт передаточных характеристик» → Enter.

4.5.8. Задать значения амплитуды сигнала $U_c = 0,4\text{ В}$ и помехи $U_{\text{п}} = 0\text{ В}$. Программа выведет на экран таблицу «Нелинейных передаточных функций».

4.5.9. Занесите в таблицу значения выходных напряжений $U_{\text{вых}}$ для линейного и нелинейного коэффициентов передачи $K_{\text{сж}}$ на частоте f1, а также значения АФК в градусах.

4.5.10. Перейти на следующую страницу расчёта нелинейных передаточных функций (для следующих значений частот f_c и $f_{\text{п}}$) с помощью клавиши Пробел. Заполнить таблицу (Таблица 4. 5 и Таблица 4. 6).

4.5.11. Произвести расчёт значений коэффициента сжатия $K_{\text{сж}}$ по формуле:

$$K_{\text{сж}} = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_{\text{вых.нелин.}}}{U_{\text{вых.лин.}}} \right). \quad (4. 13)$$

Если $U_{\text{вых.нелин.}} < U_{\text{вых.лин.}}$ – эффект сжатия; если $U_{\text{вых.нелин.}} > U_{\text{вых.лин.}}$ – эффект десжатия; если $U_{\text{вых.нелин.}} = U_{\text{вых.лин.}}$, то $K_{\text{сж}} = 1$ – эффект сжатия (десжатия) отсутствует.

4.5.12. Построить графики частотных зависимостей коэффициента сжатия $K_{\text{сж}}$ и АФК при напряжении входного сигнала $U_{\text{вх}} = 0,4$ В.

4.6. Указания и рекомендации по проведению теоретического и экспериментального исследования

4.6.1. Расчётное задание выполняется на основе настоящего методического указания.

4.6.2. После загрузки файла установить значения номиналов и параметров из таблицы в соответствии с вариантом задания и провести необходимые корректировки в исходной электрической принципиальной схеме.

4.6.3. Все измерения выходного напряжения проводятся при напряжении на входе равным 0,4 В.

4.7. Рекомендации по оформлению экспериментальных результатов и выводов исследования

4.7.1. Результаты расчёта и экспериментального исследования рекомендуется сводить в таблицу (Таблица 4. 6).

Таблица 4. 6. Результаты исследования нелинейных искажений усилительного каскада на основе биполярного транзистора КТ315

№ п/п	Частоты		$I_{\text{э0}} = ___ \text{ мА}$	$U_{\text{сигнала}} = 0,4 \text{ В}$	$U_{\text{помехи}} = 0 \text{ В}$	$r_{\text{б}} = ___ \text{ Ом}$
	$f_{\text{с}}, \text{ МГц}$	$f_{\text{п}}, \text{ МГц}$	$U_{\text{вых.лин.}}, \text{ В.}$	$U_{\text{вых.нелин.}}, \text{ В}$	АФК, гр.	$K_{\text{сж}}, \text{ дБ}$
1.	1	3				
2.	2	3				
3.	5	3				
4.	10	3				
5.	20	3				
6.	50	3				
7.	75	3				
8.	100	3				
9.	125	3				
10.	150	3				

4.7.2. Произвести сравнение значений для фиксированной частоты 5 МГц, рассчитанной со значениями, полученными в ходе эксперимента.

4.7.3. Выводы должны быть сделаны по каждому пункту экспериментального задания.

4.8. Вопросы для самостоятельной подготовки

1. Какими свойствами обладают нелинейно-инерционные системы, описывающие передаточные характеристики аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств?
2. Что такое линейные (частотные) и нелинейного искажения?
3. Что такое «эффект сжатия» в аналоговых радиоэлектронных функциональных устройствах?
4. Что характеризует эффект десжатия и чем отличается эффект сжатия?
5. Дать определение понятию коэффициента сжатия.
6. Что такое амплитудно-фазовая конверсия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович Б.М Нелинейные искажения в приёмно-усилительных трактах устройствах. – М.: Связь, 1980. – 280 с.
2. Пушкарёв В.П. Амплитудно-фазовая конверсия в широкополосных приёмно–усилительных трактах: Дис. ... канд. техн. наук. /ТУСУР. - Томск, 2001. - 179 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример оформления титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное бюджетное государственное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиотехнических систем

Схемотехника аналоговых радиоэлектронных функциональных устройств

Лабораторная работа. **Исследование типовых звеньев аналоговых
радиоэлектронных функциональных устройств**

Выполнил студент гр. 148-М6
_____ Иванов В.А.
«__» _____ 20__ г.

Проверил Доцент каф. РТС
_____ Колесов А.Н.
«__» _____ 20__ г.