

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра информационных радиотехнологий

В. Т. Першин

**СХЕМОТЕХНИКА
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

*Рекомендовано УМО
по образованию в области информатики
и радиоэлектроники для специальности 1-39 02 02
«Проектирование и производство радиоэлектронных средств»
в качестве учебно-методического пособия*

Минск БГУИР 2014

УДК 621.396.6(076)

ББК 32.844я73

П26

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра информатики учреждения образования
«Минский государственный высший радиотехнический колледж»
(протокол №3 от 25.10.2012);

старший научный сотрудник Государственного научного учреждения
«Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной
академии наук Беларуси»,
кандидат физико-математических наук, доцент А. И. Конойко

Першин, В. Т.

П26 Схемотехника радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие /
В. Т. Першин. – Минск : БГУИР, 2014. – 124 с. : ил.

ISBN 978-985-488-947-4.

Учебно-методическое пособие содержит рабочую программу, методические указания, контрольное задание, практикум по выполнению лабораторных работ в пакете MicroCap-8 и примеры выполнения контрольных задач по дисциплине «Схемотехника радиоэлектронных средств» для студентов специальности 1-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». Также представлен перечень методических указаний по использованию средств вычислительной техники при изучении названного курса.

УДК 621.396.6(076)

ББК 32.844я73

ISBN 978-985-488-947-4

© Першин В. Т., 2014

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2014

1 ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рабочая учебная программа составлена на основе типовой учебной программы для высших учебных заведений по дисциплине «Схемотехника радиоэлектронных средств», утвержденной Министерством образования Республики Беларусь 31.08.2009 г. (рег. № ТД-1.188.тип) и учебного плана специальности 1-39 02 02 «Проектирование и производство радиоэлектронных средств».

В процессе работы над дисциплиной в восьмом семестре студент должен прослушать 12 часов лекций, посетить практическое занятие, изучить все темы курса, выполнить контрольное задание, лабораторные работы в объеме 12 часов и сдать экзамен.

Цель изучения дисциплины

Цель изучения дисциплины «Схемотехника радиоэлектронных средств» – освоить основы теории сигналов, электрических цепей, принципы работы и характеристику основ аналоговых, импульсных и аналого-цифровых устройств, принципы построения радиоэлектронных устройств и систем на базе достижений современной микроэлектроники. Занятия предусматривают изучение перспектив развития радиоэлектронных средств, формулировку насущных задач современных направлений данной области науки и техники.

Полученные знания планируется использовать при изучении дисциплин «Технология радиоэлектронных средств», «Системное проектирование изделий электроники».

Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины «Схемотехника радиоэлектронных средств» студенты должны:

- владеть методами анализа сигналов в типовых линейных и нелинейных цепях;
- знать принципы работы и электрические характеристики полупроводниковых приборов;
- знать принципы построения радиоэлектронных устройств: усилителей – переменного и постоянного напряжения, мощности, широкополосных и частотно-избирательных; источников электропитания; генераторов гармонических колебаний; преобразователей частоты, модуляторов, детекторов; импульсных устройств – генераторов и формирователей импульсов;
- иметь представление о радиоприемных устройствах, современных РЭУ и системах.

Соответствующие знания студенты получают из лекционной части и учебно-методического комплекса дисциплины. Умение и практические навыки в решении конкретных вопросов и задач формируются на лабораторных и практических занятиях.

Программа, методические указания и вопросы для самопроверки

8-й семестр

Программа

Цель и задачи курса, связь с другими дисциплинами, методические указания по изучению, источники информации. Определение аналоговой схемотехники и ее роль в формировании специалиста радиотехнического профиля. Области применения, тенденции и перспективы развития. Структура и содержание дисциплины, ее связь с другими дисциплинами учебного плана специальности. Классификация аналоговых и цифровых электронных устройств. Основные определения, области применения. Понятие об информации и сигнале. Классификация сигналов. Квантование сигналов по уровню. Характеристики вход-выход квантователя. Задача нахождения минимума искажений и пути ее решения. Понятие о скалярном и векторном квантовании.

Литература: [1, 8, 9].

Методические указания

Изучение краткой истории развития радиоэлектронных средств, основных областей их применения, задач, стоящих перед курсом, и путей их решения. Формирование знаний о значении элементной базы в развитии радиоэлектронных средств. Изучение диапазонов частот, используемых в радиоэлектронных средствах, и умение объяснить назначение основных узлов обобщенной функциональной схемы радиоэлектронной системы передачи и приема информации.

Главная особенность современного научно-технического прогресса – постоянное расширение сферы использования достижений радиоэлектронных средств.

Продолжающееся освоение космического пространства и проникновение в тайны микромира влечет за собой рост значимости философского анализа проблем радиоэлектронных средств, утверждение диалектического подхода к решению проблем разработки радиоэлектронной аппаратуры настоящего и будущего. По обозначенным проблемам сегодня имеется обширный материал, который постоянно обновляется, однако на страницах учебных пособий по радиоэлектронным средствам в достаточном объеме он не освещается. Поэтому расширить свои знания в изучаемой области можно по периодическим изданиям, где рассматриваются философские вопросы естествознания.

При изучении дисциплины следует ознакомиться с основными первоначальными понятиями, используемыми в курсе схемотехники радиоэлектронных средств: понятиями об информации и сигнале, классификации сигналов, понятиями и характеристиками квантования сигналов. Изначально необходимо овладеть основными исходными положениями курса. Следует четко различать понятия скалярного и векторного квантования аналоговых сигналов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие краткие сведения из истории развития радиоэлектронных средств вы знаете?
2. Зачем нужны высокочастотные электромагнитные колебания и какие основные диапазоны волн используются в радиоэлектронных средствах?
3. Что составляет элементную базу радиоэлектронных средств и какие изменения произошли при ее развитии?
4. Как выглядит схема обобщенного радиоэлектронного канала связи.

Раздел 1 Основные показатели аналоговых и цифровых электронных устройств

Тема 1.1 Основные параметры и характеристики аналоговых и цифровых устройств

Особенности применения аналоговых электронных устройств. Входные и выходные характеристики усилительных устройств. Коэффициенты передачи по мощности, току и напряжению. Амплитудно-частотная, фазовая и переходная характеристики, связь между ними.

Аналоговые и цифроаналоговые преобразователи. Основные элементы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Устройства выборки и хранения (УВХ). Требования к функциональным элементам УВХ. Апертурное время. Джиттер. Линейная модель сигма-дельта модулятора. Дискретизация с перекрытием и формирование шума. Анализ сигма-дельта модулятора в частотной области. Функции передачи сигнала и шума в линейной модели сигма-дельта модулятора. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) с сигма-дельта модулятором первого порядка.

Литература: [1, с. 4–6; 2, с. 5–13; 4, с. 7–13].

Методические указания

Овладение понятиями комплексного коэффициента передачи линейной цепи, из которого вытекают понятия амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик указанной цепи.

Овладение понятием аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования сигналов. Современные аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи используют принцип сигма-дельта модуляции, поэтому необходимо сформировать знания в области и овладеть идеологией построения названных радиоэлектронных схем.

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные допущения, используемые при построении линейной модели сигма-дельта модулятора, вы знаете?
2. Что представляет собой дискретизация с перекрытием?
3. Что такое процесс формирования шума?

4. Что понимается под явлением джиттера и в чем он проявляется?
5. Какие функции передачи сигнала и шума в линейной модели сигма-дельта модулятора вы можете выделить?
6. Какая часть схемы сигма-дельта модулятора определяет его порядок?
7. Каково назначение устройства выборки и хранения в цифроаналоговом преобразователе?
8. Какие основные требования к устройствам выборки и хранения вы можете перечислить?

Тема 1.2 Искажения сигналов

Линейные и нелинейные искажения сигнала, нормирование искажений. Шумы и помехи в цепях аналоговых схем. Амплитудная характеристика и динамический диапазон устройства.

Литература: [1 с. 4–6; 2, с. 5–13; 4, с. 7–13].

Методические указания

При изучении основных понятий радиоэлектронных цепей следует знать, что комплекс рассматриваемых в радиоэлектронике физических явлений описывается тремя типами различающихся по свойствам и способам решения дифференциальных уравнений:

- линейные уравнения с постоянными коэффициентами;
- линейные уравнения с переменными коэффициентами;
- нелинейные уравнения.

В соответствии с этими тремя типами уравнений различают линейные, параметрические и нелинейные цепи.

Физически под линейной понимают цепь, параметры которой не изменяются во времени и не зависят от токов и напряжений, действующих в цепи; параметры параметрической цепи также не зависят от токов и напряжений, действующих в этой цепи, но они изменяются во времени; цепь, параметры которой зависят от токов и напряжений, действующих в ней, называется нелинейной.

Чисто линейных или чисто параметрических цепей не существует. Все цепи в принципе нелинейные. Поэтому к линейным или параметрическим цепям относят такие, в которых нелинейностью можно пренебречь, а под нелинейными цепями понимают такие, нелинейностью которых пренебречь нельзя.

Если линейные размеры линейной цепи соизмеримы с длиной волны действующего в ней сигнала, то такая цепь называется цепью с распределенными параметрами и описывается линейными дифференциальными уравнениями в частных производных.

Следует обратить внимание на решение задач анализа и синтеза радиоэлектронных цепей при проектировании различного рода устройств, каналов связи и т. п. Нахождение схемы и элементов цепи, удовлетворяющих заданным условиям, составляет задачу синтеза радиоэлектронной цепи. В отличие от задачи анализа, в которой искомая величина – реакция на приложенное воздейст-

вие, – получается однозначно, задача синтеза может иметь несколько решений (или совсем не иметь). Поэтому возникает вопрос о необходимости сопоставления полученных вариантов и выбора оптимального решения. Определенных критериев выбора наилучших решений не существует и разработчики радиоэлектронной аппаратуры часто руководствуются общими соображениями, такими как достижение результатов с наименьшим количеством элементов и т. п.

При распространении сигналов в различных устройствах и цепях всегда появляются искажения, которые можно разделить на две категории: линейные и нелинейные. Линейные искажения появляются вследствие неравномерностей амплитудно-частотных характеристик цепей. Такие искажения нормируются коэффициентами линейных искажений на нижнем конце M_n и верхнем конце M_v диапазона рабочих частот той или иной цепи, изменяющихся в пределах, как правило, от 0,9 до 1,1. Линейные искажения возникают также вследствие отклонения фазовой характеристики той или иной цепи от линейности. Такие искажения не учитываются при разработке устройств для обработки речевых сигналов, но обязательны к рассмотрению в устройствах обработки видеoinформации. Нелинейные искажения возникают вследствие наличия нелинейных элементов в цепи, через которую проходит сигнал, и нормируются коэффициентом нелинейных искажений, который называется также коэффициентом гармоник.

При анализе амплитудных характеристик устройств необходимо учитывать влияние шумов на амплитудную характеристику и соответственно на динамический диапазон всего устройства.

Вопросы для самопроверки

1. По какому признаку элементы радиоэлектронных цепей делятся на пассивные и активные?
2. Какие вы знаете примеры пассивных радиоэлектронных цепей?
3. Что такое «воздействие» и «реакция на воздействие»?
4. Если в данной цепи выполняется принцип суперпозиции, то является ли она линейной?
5. Могут ли в линейных системах в процессе преобразования сигнала появиться частоты, отсутствующие во входном сигнале?
6. Почему модели (эквивалентные схемы) дискретных или интегральных пассивных элементов радиоэлектронной цепи могут принимать разный вид в зависимости от частоты действующих в цепи сигналов?
7. Что понимается под искажениями сигналов и как они нормируются?
8. Чем отличаются искажения, возникающие в линейных цепях вследствие неравномерности амплитудно-частотной характеристики устройства и вследствие отклонения фазочастотной характеристики, от линейной зависимости?
9. Как определяется коэффициент нелинейных искажений?
10. Что такое «амплитудная характеристика устройства»?
11. Что такое «динамический диапазон устройства»?

Раздел 2 Основы теории обратной связи

Тема 2.1 Виды обратных связей

Основы использования обратной связи (ОС) для формирования заданных свойств схемы усилителя. Виды обратных связей, способы организации. Коэффициент передачи усилителя с обратной связью. Показатели, характеризующие ОС. Влияние ОС на параметры и характеристики устройства. Устойчивость систем с обратной связью, обеспечение устойчивости в реальной конструкции. Эмиттерный повторитель как схема с глубокой обратной связью. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой.

Методические указания

При проектировании усилительных устройств большое внимание уделяется учету влияния обратных связей. Поэтому материал, связанный с изучением обратных связей в четырехполюсниках, часто в пособиях и учебниках излагается в разделе, относящемся к усилителям электрических сигналов. Это не снижает общности подхода к изучению предмета обратных связей и приближает его к специальным вопросам практики. Поэтому можно считать целесообразным изучение влияния обратных связей на характеристики четырехполюсников на примере усилительных схем, работающих в линейном режиме.

При изучении названной темы особое внимание рекомендуется уделять вопросам устойчивости усилителей, содержащих цепи обратной связи. Чаще всего такие усилители являются многокаскадными и поэтому содержат большое число различных деталей, объединенных электрической схемой и конструктивным выполнением в единое устройство. Для компактности устройства его размеры и объем стараются сделать возможно меньшими. Небольшие расстояния между деталями вызывают появление между ними заметных емкостных и индуктивных связей. При неудачной компоновке свойства усилителя могут настолько измениться, что правильно рассчитанный усилитель не будет отвечать поставленным техническим требованиям. Строгая количественная оценка паразитных связей затруднена их большим числом, взаимным переплетением, а иногда и невозможностью локализации. Тем не менее в процессе изучения этой темы необходимо определить ряд мер, правил и рекомендаций, соблюдение которых позволяет успешно бороться с паразитными связями.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вы знаете основные факторы, определяющие передачу сигнала с выхода четырехполюсника на его вход.
2. На какие основные виды можно разделить схемы обратной связи в зависимости от способов соединения четырехполюсников?
3. Что такое положительная, отрицательная и комплексная связь? В каких случаях используется та или другая обратная связь?
4. Что такое «критерий устойчивости»?

5. В чем заключается сущность критерия Найквиста?
6. Как практически построить диаграмму, на которой можно проиллюстрировать применение критерия Найквиста?
7. Как влияют неточности изготовления элементов цепи обратной связи на ее характеристики?
8. Как влияет цепь обратной связи на входное и выходное сопротивления?
9. Какие вы знаете примеры четырехполюсников с замкнутыми цепями обратной связи.

Раздел 3 Базовые схемы аналоговых электронных устройств

Тема 3.1 Особенности схемотехники электронных устройств

Критерии выбора элементной базы при проектировании усилителей. Многокаскадные усилители. Режимы работы усилительных элементов. Работа усилительных каскадов в режиме малого сигнала. Энергетические показатели усилителей в различных режимах.

Схемотехника усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах: сигнальные схемы включения транзисторов, основные свойства и параметры; цепи питания и методы обеспечения стабильности режимов в эксплуатационных условиях.

Статические характеристики транзистора. Динамические характеристики транзисторного каскада. Сквозная (проходная) характеристика. Схемотехника питания цепей транзистора. Цепь смещения с фиксированным током. Цепь смещения с фиксированным напряжением. Методы стабилизации положения рабочей точки: коллекторная стабилизация, эмиттерная стабилизация, использование генераторов стабильного тока в цепях питания транзисторов. Базовые схемные конфигурации аналоговых интегральных микросхем.

Методические указания

При изучении материала данной темы следует сначала найти спектр тока, протекающего через нелинейный усилительный элемент, вольт-амперную характеристику которого можно аппроксимировать ломаной прямой, и убедиться в том, что работа нелинейного элемента с отсечкой тока сопряжена с большими нелинейными искажениями выходного сигнала, хотя КПД усилителя увеличивается с уменьшением угла отсечки.

Задача аппроксимации состоит из двух частей: выбора типа аппроксимирующей функции и определения ее коэффициентов. При анализе нелинейных цепей следует иметь в виду, что успешное его проведение зависит от того, насколько оптимальным оказался выбор типа аппроксимирующей функции применительно к используемому методу гармонического анализа.

Следует обратить внимание на то, что при угле отсечки, близком к 90° , КПД усилителя является достаточно высоким, амплитуды всех нечетных гармонических составляющих входного сигнала, за исключением первой, в спек-

тре выходного сигнала равны нулю. Вывод – в результате применения двухтактных схем, устраняющих проявление четных гармоник в нагрузке усилителя, можно сконструировать нелинейный усилитель, не вносящий нелинейных искажений и работающий с достаточно высоким КПД.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются графические методы решения нелинейных задач от аналитических?
2. Что понимается под углом отсечки?
3. Какие вы знаете примеры применения графических и аналитических методов к решению конкретных нелинейных задач.
4. Какой метод гармонического анализа является оптимальным при аппроксимации характеристик полиномом n -й степени?
5. Какой метод гармонического анализа является оптимальным при аппроксимации характеристик ломаной прямой?
6. В чем заключается принцип работы параметрического усилителя?
7. Благодаря каким преимуществам (по сравнению с другими усилителями) параметрические усилители получают все большее применение?
8. Какими энергетическими соотношениями характеризуется работа параметрического усилителя?
9. Почему в двухтактном трансформаторном усилителе мощности уменьшаются нелинейные искажения и отсутствует постоянное подмагничивание сердечника трансформатора?
10. Что понимается под углом отсечки?
11. В каких пределах может изменяться величина угла отсечки?
12. Какими способами можно подавать входной сигнал на оконечный двухтактный каскад усилителя мощности?
13. При каких углах отсечки получаются наивыгоднейшие режимы для удвоения, утроения частоты?
14. Почему коэффициент нелинейных искажений в резонансном усилителе мощности меньше, чем в апериодическом?
15. Как происходит компенсация четных гармонических составляющих входного сигнала в спектре выходного сигнала в двухтактной схеме усилителя мощности?
16. Как объяснить, что при одинаковом угле отсечки в режиме удвоения КПД ниже, чем в режиме усиления?
17. Почему не применяются высокие кратности умножения частоты?
18. Как влияет на показатели двухтактного усилителя мощности разброс параметров элементов схемы этого усилителя?

Раздел 4 Специальные виды усилителей

Тема 4.1 Широкополосные усилители

Эквивалентная схема апериодического транзисторного усилителя. АЧХ и ФЧХ апериодического транзисторного усилителя. Коррекция формы АЧХ усилителя: низкочастотная и высокочастотная коррекции. Широкополосные и импульсные усилители. Методы коррекции переходных характеристик. Усилители высокой чувствительности. Области применения.

Методические указания

Изучите основные теоретические положения, заложенные в основе построения эквивалентных схем усилительных каскадов. Несмотря на кажущуюся сложность реальных схем, можно строить эквивалентные схемы, отличающиеся известной простотой, но отражающие наиболее существенные особенности работы проектируемых устройств. Следует обратить внимание на необходимость коррекции формы амплитудно-частотных и переходных характеристик широкополосных и особенно импульсных усилителей.

Вопросы для самопроверки

1. На основании каких допущений строится эквивалентная схема транзисторного усилителя с резистивной нагрузкой?
2. Какие вы знаете известные методы коррекции АЧХ широкополосных усилителей в области низких и высоких частот?
3. Какие усилители называются широкополосными, а какие – импульсными?
4. Какие существуют методы коррекции переходных характеристик широкополосных усилителей?

Тема 4.2 Дифференциальные усилители

Схемотехника дифференциальных усилителей на биполярных и полевых транзисторах. Усилители постоянного тока. Входное сопротивление дифференциального каскада. Схема сдвига уровня постоянного напряжения. Усилитель постоянного тока. Дрейф нуля. Реализация усилителей постоянного тока на дифференциальных каскадах.

Методические указания

Операционные усилители имеют всегда два входа, так как они предназначались для выполнения математических операций в электронно-вычислительных машинах. Вместе с тем операционные усилители имеют еще ряд особенностей, связанных с формированием выходного сигнала. Эти особенности связаны с обеспечением сдвига уровня постоянного напряжения и поскольку операционный усилитель – это усилитель постоянного тока, то он со-

держит ряд схемотехнических решений, препятствующих дрейфу нуля. Рекомендуется рассмотреть несколько принципиальных электрических схем операционных усилителей, чтобы усвоить принципы построения схем таких усилителей.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под операционным усилителем?
2. Какие основные особенности построения схем операционных усилителей вы знаете?
3. Какое влияние оказывает отрицательная обратная связь на нелинейные искажения сигнала на выходе усилителя?
4. Какие примеры операционного усилителя в схемах, реализующих математические операции над сигналами, вы можете назвать?
5. Какие примеры использования операционных усилителей в активных RC-фильтрах вы можете привести?
6. Какое влияние оказывает отрицательная обратная связь на коэффициент усиления усилителя и ширину диапазона рабочих частот?
7. Чем объясняется тот факт, что фаза сигнала на выходе усилителя зависит от частоты усиливаемого сигнала?

Тема 4.3 Резонансные усилители

Схемотехника, основные параметры и характеристики резонансных усилителей. Методы обеспечения избирательности резонансного усилителя. Устойчивость резонансного усилителя. Нелинейные искажения сигнала в резонансном усилителе. Полосовые усилители.

Методические указания

Резонансные усилители представляют собой усилители, характеризующиеся высокой степенью избирательности. В качестве нагрузочных элементов у них служат высокоизбирательные колебательные системы. Важной проблемой, которую надо решать разработчикам этих устройств, является обеспечение высокой степени устойчивости усилителя не только в диапазоне его рабочих частот, но и за ее пределами. Важно учитывать также нелинейные искажения сигнала, происходящие вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик нелинейного усилительного элемента. Надо отметить, что в значительной мере эти искажения устраняются схемой благодаря ее высокой избирательности.

Вопросы для самопроверки

1. Какие факторы снижают избирательные качества резонансного усилителя?
2. Какие основные методы обеспечения высокой избирательности резонансного усилителя вы знаете?

3. Какие существуют основные факторы, снижающие устойчивость работы резонансного усилителя.

4. Вследствие чего в резонансном усилителе возникают нелинейные искажения?

5. Какая разница между резонансным и полосовым усилителем?

Раздел 5 Оконечные каскады

Тема 5.1 Виды окончных каскадов усиления

Особенности работы каскадов в режиме большого сигнала. Анализ работы каскада с помощью вольт-амперных характеристик его элементов. Коэффициенты А. И. Берга. Умножение частоты. Расчет КПД нелинейного усилителя. Виды выходных каскадов. Схемотехника и энергетические показатели одноктактных и двухтактных выходных каскадов. Оконечные каскады усиления мощности с повышенным коэффициентом полезного действия.

Методические указания

Ознакомьтесь с принципами использования работающих в нелинейном режиме усилителей для воспроизведения сигналов с хорошим качеством. Уясните разницу между одноктактным и двухтактным режимом усилителя. Постарайтесь понять, почему КПД линейного усилителя оказывается значительно ниже КПД усилителя, работающего в нелинейном режиме.

Вопросы для самопроверки

1. В чем особенности усилительного каскада, работающего в режиме большого сигнала?

2. Каковы наиболее оптимальные коэффициенты умножения частоты в нелинейном усилителе?

3. Какие основные виды схем выходных каскадов вы знаете?

4. Какие меры применяют для повышения КПД нелинейного усилителя?

5. Почему нелинейный усилитель можно использовать в качестве умножителя частоты?

Раздел 6 Операционные усилители и их применение

Тема 6.1 Операционные усилители

Структурные и принципиальные схемы операционных усилителей. Основные параметры и характеристики усилителей. Операционные усилители общего применения. Быстродействующие широкополосные операционные усилители. Мощные и микромощные операционные усилители.

Методические указания

Используя справочную литературу, ознакомьтесь с широкой номенклатурой операционных усилителей, выпускаемых ведущими мировыми производителями. Постарайтесь осознать непосредственную связь между основными параметрами структурной или принципиальной схемы операционного усилителя и его характеристиками. Постарайтесь понять, почему есть операционные усилители общего применения и операционные усилители специального применения, такие, как быстродействующие, мощные и микромощные прецизионные усилители.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких основных узлов состоят структурные схемы операционных усилителей?
2. Какие основные параметры характеризуют работу операционных усилителей?
3. Какими средствами удастся повысить быстродействие операционных усилителей?
4. Какие особенности построения структурных схем операционных усилителей специального назначения вы можете перечислить?

Тема 6.2 Функциональные устройства на операционных усилителях

Инвертирующие и неинвертирующие операционные усилители. Схемы суммирования–вычитания. Дифференциаторы и интеграторы сигналов. Логарифмический и антилогарифмический усилители. Устройства регулировки усиления, перемножения и деления сигналов. Компараторы на операционных усилителях.

Методические указания

Операционный усилитель является основой для выполнения целого ряда математических операций над сигналами, подаваемыми на его входы. Изучите условия, при которых реализация математических операций выполняется с приемлемой для практики точностью. Постарайтесь запомнить основные математические соотношения, с помощью которых реализуются выполняемые операционным усилителем операции над сигналами, поступающими на его входы.

Задания для самопроверки

1. Нарисуйте схемы, выполненные на операционном усилителе и реализующие выполнение операций суммирования и вычитания.
2. Нарисуйте схемы, выполненные на операционном усилителе и реализующие выполнение математических операций дифференцирования и интегрирования.

3. Нарисуйте схемы, выполненные на операционном усилителе и реализующие выполнение математических операций логарифмирования и антилогарифмирования.

4. Нарисуйте схемы, выполненные на операционном усилителе и реализующие выполнение математических операций перемножения и деления сигналов.

5. Нарисуйте схему компаратора на операционном усилителе.

6. Приведите примеры пороговых элементов на операционном усилителе и поясните принцип работы.

Раздел 7 Генераторы гармонических колебаний

Тема 7.1 Схемотехника *LC*-генераторов гармонических колебаний

Классификация генераторов. Автогенераторы с индуктивной связью. Физическая сущность возникновения автоколебаний. Баланс амплитуд и фаз в автогенераторе. Различные уровни изучения процессов в генераторе. Анализ генератора в терминах линейной теории. Квазилинейная теория автогенератора. Обобщенная схема автогенератора в квазилинейной теории. Основные схемы *LC*-автогенераторов и их эквивалентные схемы. Трехточечная схема генератора. Кварцевые схемы генераторов. *LC*-генераторы на приборах с отрицательным сопротивлением. Мягкий и жесткий режимы возбуждения и работы генератора. Генератор с автоматическим смещением. Методы графического определения амплитуды генерируемых колебаний: средней крутизны и колебательных характеристик. Зависимость тока в контуре генератора при различных режимах работы.

Методические указания

Изучите физические явления, происходящие при самовозбуждении схемы автогенератора, установлении стационарной амплитуды колебаний.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит физический смысл условий баланса фаз и баланса амплитуд в автогенераторе?

2. В каких фазовых соотношениях в транзисторном *LC*-генераторе находятся напряжение на базе, ток в контуре, коллекторный ток, напряжение на коллекторе?

3. Какими соотношениями определяются условия самовозбуждения схемы автогенератора?

4. Охарактеризуйте особенности «жесткого» и «мягкого» режимов самовозбуждения автогенератора.

5. Каким образом обеспечивается синусоидальная форма генерируемых *LC*-генератором колебаний?

Тема 7.2 Схемотехника RC -генераторов гармонических колебаний

RC -генераторы. Однокаскадная и двухкаскадная схемы RC -генераторов. Условия их возбуждения. RC -генераторы на операционных усилителях. Необходимость введения автоматической регулировки амплитуды в RC -генераторах.

Схемотехника генераторов на различных активных элементах. Стабилизация частоты RC -генераторов. Генераторы с внешним возбуждением.

Методические указания

Обратите внимание, что схемы RC -генераторов абсолютно беззащитны относительно возникающих при генерировании гармонических колебаний искажений вследствие того, что автогенератор является устройством сугубо нелинейным. В LC -генераторе, предназначенном для получения гармонических колебаний, возникающие нелинейные искажения отфильтровываются колебательной системой, имеющей, как правило, достаточно высокую избирательность. Поэтому рабочая точка в RC -генераторах выбирается всегда на середине линейного участка вольт-амперной характеристики нелинейного элемента, на котором собран этот генератор. Амплитуда генерируемых колебаний при этом всегда заходит в область ограничения, в результате чего генерируются колебания почти гармонической формы, но не совсем синусоидальные. Для поддержания положения рабочей точки в нужном месте принимают дополнительные меры: термостатирование схемы автогенератора, использование нелинейных элементов для стабилизации положения рабочей точки и др. Как и в схемах LC -генераторов, для получения незатухающих колебаний в схемах RC -генераторов должны выполняться условия, называемые балансом амплитуд и балансом фаз. Обратите внимание на роль элемента с инерционной нелинейностью в виде термосопротивления, позволяющего улучшить форму генерируемых RC -генератором колебаний.

Вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте схему однокаскадного транзисторного RC -генератора с цепочкой C -параллель или R -параллель.
2. Как изменяется частота колебаний в RC -генераторе при увеличении числа фазосдвигающих цепочек?
3. Почему кварцевый резонатор обеспечивает высокую стабильность частоты колебаний автогенератора?
4. Что понимается под «отрицательным сопротивлением»?
5. Почему для генерирования низкочастотных колебаний применяются в основном RC -генераторы, а не LC -генераторы?
6. Почему генератор с параллельной схемой питания не может работать без дросселя в цепи питания?
7. Приведите схемы, реализующие методы получения частотно-модулированных колебаний.

Раздел 8 Основы импульсной и цифровой схемотехники

Тема 8.1 Электронные ключи

Диодные ключи. Биполярный транзистор в ключевом режиме, переходные процессы в работе ключа. Ключи на полевых транзисторах, переходные процессы. Переключатели тока. Помехоустойчивость ключей.

Методические указания

При изучении темы рекомендуется изучить схему диодного электронного ключа с учетом его паразитных параметров, из-за которых снижается его быстродействие. Далее следует перейти к изучению ключевых схем, выполненных на биполярных транзисторах, работающих в ключевом режиме, т. е. когда рабочая точка перемещается из одного крайнего положения, когда транзистор, например, находится в открытом положении, в другое, когда транзистор оказывается в запертом состоянии, и ток через него не проходит. Уяснив принцип работы ключевой схемы, следует перейти к изучению ключевых устройств, работающих на полевом транзисторе. Далее необходимо изучить принцип работы переключателя тока и изучить меры, предпринимаемые для повышения помехоустойчивости ключей.

Задания и вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте схему диодного ключа.
2. Как выглядит схема транзисторного ключа?
3. Какими преимуществами обладают ключи, выполненные на транзисторах, по сравнению с диодными?
4. Какие обстоятельства снижают быстродействие ключевых схем?

Тема 8.2 Бистабильные схемы и импульсные генераторы

Триггер как бистабильная ячейка. Триггер Шмитта. Мультивибратор на транзисторах, ждущий мультивибратор. Генераторы линейно изменяющихся напряжения и тока.

Методические указания

При изучении теории и принципов построения формирователей импульсных сигналов следует уделить внимание вопросам, связанным с построением их на современной элементной базе. Обратите внимание на то, что в области аналоговой импульсной техники влияние микроэлектроники проявилось прежде всего в появлении и широком распространении схем различного назначения, главным и единственным компонентом которых служит интегральный операционный усилитель.

Задания и вопросы для самопроверки

1. Каким образом из гармонического колебания можно получить последовательность прямоугольных видеоимпульсов?
2. Приведите примеры электронных схем, формирующих последовательность прямоугольных видеоимпульсов из гармонического колебания.
3. Дайте определение компаратора и приведите примеры его схемной реализации на операционном усилителе.
4. Поясните физические процессы, происходящие в схеме мультивибратора во время переключения транзисторов из одного состояния в другое.
5. Какими особенностями схемного решения характеризуются мультивибраторы на специализированных интегральных микросхемах?
6. Какими параметрами схемы мультивибратора определяется длительность и период генерируемых колебаний?
7. Приведите примеры схем генераторов пилообразного напряжения.
8. Какими конструктивными и технологическими параметрами характеризуются микросхемы, предназначенные для применения в схемах генераторов импульсных сигналов?

Раздел 9 Основы теории проектирования и схемотехника цифровых устройств

Тема 9.1 Базовые логические элементы цифровых схем

Позиционные системы счисления, используемые в цифровых устройствах: двоичная, восьмеричная, шестнадцатеричная, двоично-десятичная. Логические функции и логические элементы. Основные правила алгебры логики. Параметры логических элементов интегральных схем. Транзисторно-транзисторная логика. Эмиттерно-связанная логика. Металл-окисел-полупроводник (МОП) и комплементарная металл-окисел-полупроводник (КМОП) логика.

Методические указания

Следует разобраться с различными позиционными системами, используемыми в вычислительной технике. Наибольшее внимание необходимо уделить двоичной системе, ознакомиться с основами булевой алгебры и понять механизм работы логических элементов интегральных схем, усвоить таблицы истинности наиболее часто используемых логических элементов.

Задания и вопросы для самопроверки

1. Напишите таблицы истинности для логических элементов, реализующих логические функции И и ИЛИ.
2. Чем отличается транзисторно-транзисторная логика от логики эмиттерно-связанной?
3. Сформулируйте основные положения МОП- и КМОП-логики.

Тема 9.2 Цифровые комбинационные устройства

Дешифраторы и шифраторы. Мультиплексоры и демультимплексоры. Сумматоры. Цифровые компараторы. Цифровые логические устройства с программируемыми характеристиками.

Методические указания

Научитесь строить принципиальные схемы шифраторов и дешифраторов, мультиплексоров и демультимплексоров, сумматоров. Усвойте принципы построения цифровых логических устройств с программируемыми характеристиками.

Задания и вопросы для самопроверки

1. Нарисуйте схему принципиальную электрическую логического элемента, реализующую функцию И, транзисторно-транзисторной логики.
2. Нарисуйте схему принципиальную электрическую логического элемента, реализующую функцию И, эмиттерно-связанной логики.
3. Постройте типовую схему шифратора и дешифратора.
4. Постройте типовую схему мультиплексора и демультимплексора.

Тема 9.3 Триггеры и цифровые функциональные устройства

Триггеры на логических элементах. Регистры, счетчики и запоминающие устройства.

Методические указания

Изучите основные схемы триггеров, собранных на логических устройствах, реализующих логические функции И или ИЛИ, изучите схемы принципиальные электрические *D*-триггеров, *JK*-триггеров и усвойте принципы построения на них регистров сдвига, параллельного регистра, счетчиков и запоминающих устройств.

Задания для самопроверки

1. Нарисуйте схему *RS*-триггера и объясните порядок работы этой схемы.
2. Нарисуйте схему последовательного регистра и поясните порядок его работы при записи в него информации.
3. Нарисуйте схему параллельного регистра и поясните порядок смены содержащейся в нем информации.

Раздел 10 Схемотехника аналого-цифровых электронных устройств

Тема 10.1 Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Коммутаторы аналоговых сигналов. Схемы диодных и транзисторных коммутаторов. Коммутаторы в интегральном исполнении. Компараторы. Устройства выборки и хранения. Импульсные модуляторы. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП).

Принципы построения АЦП. Классификация АЦП. Величина и знак ошибки квантования в АЦП. Принципы построения ЦАП. Передаточные характеристики ЦАП.

Методические указания

Ознакомьтесь с расчетом простейшей схемы устройства выборки и хранения, приведенном в данном учебно-методическом пособии. Рассмотрите классификацию аналого-цифровых преобразователей. Уделите внимание изучению АЦП с сигма-дельта модулятором, так как он является современным интегральным прибором, выпускаемым большим числом зарубежных фирм.

Задания и вопросы для самопроверки

1. В чем заключается принцип работы коммутатора сигналов?
2. Нарисуйте принципиальную электрическую схему диодного коммутатора.
3. Нарисуйте принципиальную электрическую схему транзисторного коммутатора.
4. Нарисуйте структурную схему АЦП.
5. Нарисуйте структурную схему ЦАП.

Раздел 11 Основы микропроцессорных систем

Тема 11.1 Структура и принцип действия микропроцессорных систем

Структура микроЭВМ. Принцип действия микропроцессора. Обзор микропроцессоров различного типа. Модульное построение микроЭВМ. Периферийные устройства. Однокристалльная микроЭВМ.

Методические указания

Изучите работу микропроцессора, хотя, конечно, это очень сложная схема, но для понимания принципа построения на его основе простейшей вычислительной машины достаточно ознакомиться с принципом его работы. Рассмотрите классификацию микропроцессоров по различным характеристикам. Изучите принцип построения однокристалльной ЭВМ.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой устройство, называемое микропроцессором?
2. В чем заключается назначение и принцип работы микропроцессора?
3. В чем состоит принцип построения однокристалльной ЭВМ?

Заключение

Перспективы развития аналоговой интегральной схемотехники.

2 КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

Контрольное задание составлено в 60 вариантах. Номер варианта выбирается студентом в соответствии с последними цифрами его учебного шифра.

При выполнении задания студент обязан соблюдать следующие правила.

1. Привести содержание контрольного задания и исходные данные для расчета в соответствии с номером варианта.

2. Представить пояснение перед расчетом каждой величины. Приводить при расчете сначала буквенное начертание формулы. Обязательно указывать против всех расчетных формул, кроме общеизвестных, список использованной литературы.

3. Свести результаты расчетов требуемых характеристик в таблицы.

4. Принципиальные электрические схемы, вольт-амперные характеристики электронных приборов, используемые при расчетах, временные диаграммы, графики рассчитанных зависимостей выполнить четко на миллиметровой бумаге карандашом и обязательно вклеить в работу.

Контрольное задание состоит из шести задач.

Задача 1. Расчет каскада линейного транзисторного усилителя с резистивной нагрузкой в соответствии с показателями, приведенными в таблице 1. Оценить коэффициент нелинейных искажений усилителя с помощью формул пяти ординат. Привести принципиальную электрическую схему усилителя со спецификацией его схемных элементов.

Таблица 1

Показатели	В а р и а н т ы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Мощность в нагрузке, Вт	2,0	3,0	4,0	2,5	3,5	4,5	1,5	0,5	0,8	0,6
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_n , Гц, f_v , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 7,0	50 8,0
Линейные искажения, Мн, дБ, Мв, дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Продолжение таблицы 1

Показатели	В а р и а н т ы									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Мощность в нагрузке, Вт	3,0	4,0	5,0	3,5	4,5	5,5	2,5	1,5	1,8	1,6
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_H , Гц, f_B , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 7,0	50 8,0
Линейные искажения, Мн, дБ, Мв, дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Показатели	В а р и а н т ы									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Мощность в нагрузке, Вт	2,5	3,5	4,5	2,5	3,5	1,5	4,5	,5	2,8	2,6
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_H , Гц, f_B , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 7,0	50 8,0
Линейные искажения, Мн, дБ, Мв, дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Продолжение таблицы 1

Показатели	В а р и а н т ы									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Мощность в нагрузке, Вт	1,0	2,0	3,0	1,5	2,5	3,5	0,5	5,5	5,8	5,6
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_H , Гц, f_B , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 ,0	50 8,0
Линейные искажения, Мн, дБ, Мв, дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Показатели	В а р и а н т ы									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Мощность в нагрузке, Вт	12,0	13,0	14,0	12,5	13,5	14,5	11,5	0,9	18	16
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_H , Гц, f_B , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 7,0	50 8,0
Линейные искажения, Мн, дБ, Мв, дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Продолжение таблицы 1

Показатели	В а р и а н т ы									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Мощность в нагрузке, Вт	20,0	30,0	40,0	25	35	45	15	25	28	26
Коэффициент гармоник, %	3,0	2,5	3,0	4,0	4,5	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5
Диапазон рабочих частот, f_n , Гц, f_b , кГц	100 5,0	50 6,0	20 7,0	50 8,0	100 9,0	80 10,0	40 7,0	60 9,0	20 7,0	50 8,0
Линейные искажения, M_n , дБ, M_b , дБ	0,25 1,2	0,30 1,3	0,45 1,4	0,50 1,3	0,60 1,2	0,25 1,4	0,35 1,5	0,45 1,3	0,55 1,4	0,6 1,0

Задача 2. Расчет спектра выходного сигнала нелинейного элемента, к которому приложена сумма постоянного и гармонического сигналов. К нелинейному элементу, вольт-амперная характеристика которого с напряжением отсечки U_H и крутизной S (рисунки 1 и 2) аппроксимирована ломаной прямой, приложено напряжение $u = U_0 + U_m \cos \omega t$, В. При заданных соответствующим вариантом исходных параметрах определить смещение U_0 и угол отсечки θ , при которых амплитуда n -й гармоники будет максимальной. Определить при этом смещении амплитуды гармонических составляющих тока $I_0, I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}, I_{m4}$ и рассчитать по ним коэффициент гармоник $k_{н.и}$ выходного сигнала (таблица 2). Для заданного сигнала и рассчитанного смещения U_0 построить графически эюры входного сигнала и тока, протекающего через нелинейный элемент, привязав их к вольт-амперной характеристике данного нелинейного элемента.

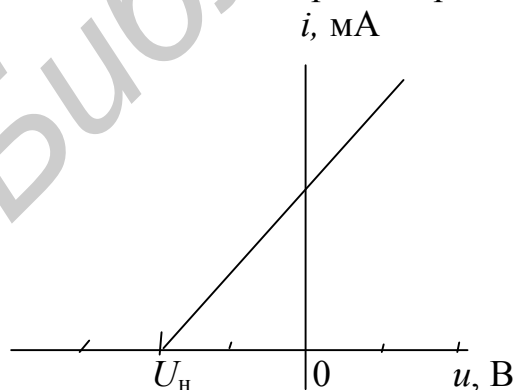


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика с отрицательным смещением

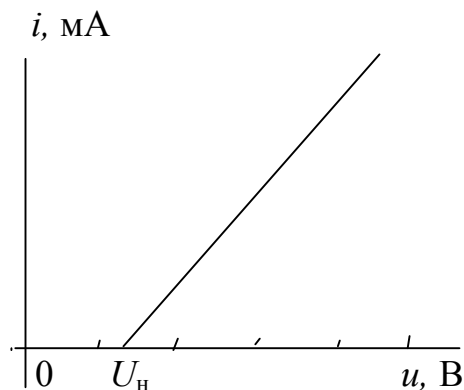


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика с положительным смещением

Таблица 2

Номер варианта	Номер рисунка	U_H, B	$S, mA/B$	U_m, B	n
1	1	-9	10	10	2
2	2	1,8	5	4	1
3	1	-5	8	6	3
4	2	0,6	10	3	2
5	1	-3	8	10	1
6	2	0,4	5	3	3
7	1	-7	3	12	2
8	2	0,7	18	4	1
9	1	-2,5	5	5	3
10	2	0,9	9	6	2
11	1	-11	7	10	2
12	2	0,8	5	4	1
13	1	-5	6	6	3
14	2	0,6	20	3	2
15	1	-3	5	10	1
16	2	0,4	4	3	3
17	1	-7	9	12	2
18	2	0,7	15	4	1
19	1	-2	5	5	3
20	2	0,9	10	6	2
21	1	-7	12	10	2
22	2	0,8	5	4	1
23	1	-5	6	6	3
24	2	0,6	13	3	2
25	1	-3	9	10	1
26	2	0,4	4	3	3
27	1	-7	4	12	2
28	2	0,7	10	4	1
29	1	-2	5	5	3
30	2	0,9	15	6	2
31	1	-10	11	10	2
32	2	0,8	5	4	1
33	1	-5	11	6	3
34	2	0,6	14	3	2
35	1	-3	9	10	1
36	2	0,4	5	3	3
37	1	-7	3	12	2
38	2	0,7	8	4	1
39	1	-2	5	5	3
40	2	0,9	5	6	2

Продолжение таблицы 2

Номер варианта	Номер рисунка	U_H , В	S , мА/В	U_m , В	n
41	1	-10	7	10	2
42	2	0,8	5	4	1
43	1	-5	20	6	3
44	2	0,6	10	3	2
45	1	-3	5	10	1
46	2	0,4	5	3	3
47	1	-6	3	12	2
48	2	0,7	10	4	1
49	1	-2	5	5	3
50	2	0,9	10	6	2
51	1	-8	15	10	2
52	2	0,8	5	4	1
53	1	-5	10	6	3
54	2	0,6	20	3	2
55	1	-3	10	10	1
56	2	0,4	5	3	3
57	1	-7	3	12	2
58	2	0,7	15	4	1
59	1	-2	5	5	3
60	2	0,9	10	6	2

Задача 3а. *Определение необходимой полосы пропускания контура при усилении амплитудно-модулированных колебаний.* На вход резонансного усилителя подается АМ-колебание вида $U_{AM}(t) = U_m(1 + m \cos 2\pi f_n t) \cos 2\pi F_M t$. При этом частота несущего колебания f_n совпадает с резонансной частотой контура f_k . Определить необходимую полосу пропускания контура, его добротность и сопротивление потерь в контуре, при которых АМ-колебание будет проходить через усилитель без искажений. Данные для расчета приведены в таблице 3. Рассчитать и построить спектр АМ-колебания на выходе усилителя.

Таблица 3

Номер варианта	U_m , В	f_k , кГц	F_M , кГц	m , %	k	L , мкГн	C , пФ
1	2	500	15	50	0,02	–	220
2	5	600	20	60	– 0,03	–	390
3	3	400	12	70	– 0,02	620	–
4	4	350	20	50	0,03	–	510
5	8	300	8	90	0,02	–	470
6	2	350	15	60	0,01	–	200
7	5	520	20	80	– 0,02	–	390
8	3	230	12	70	– 0,03	820	–
9	4	490	18	65	0,03	–	330
10	8	340	8	90	0,01	–	270
11	2	540	15	50	0,02	–	220
12	5	620	20	60	– 0,03	–	390
13	3	430	12	70	– 0,02	620	–
14	4	370	20	50	0,03	–	510
15	8	380	8	90	0,02	–	470
16	2	350	15	60	0,01	–	200
17	5	590	20	80	– 0,02	–	390
18	3	290	12	70	– 0,03	820	–
19	4	460	18	65	0,03	–	330
20	8	390	8	90	0,01	–	270
21	2	550	15	50	0,02	–	220
22	5	650	20	60	– 0,03	–	390
23	3	450	12	70	– 0,02	620	–
24	4	300	20	50	0,03	–	510
25	8	350	8	90	0,02	–	470
26	2	310	15	60	0,01	–	200
27	5	510	20	80	– 0,02	–	390
28	3	220	12	70	– 0,03	820	–
29	4	400	18	65	0,03	–	330
30	8	360	8	90	0,01	–	270

Как изменится спектр сигнала на выходе усилителя, если абсолютная расстройка $\Delta f = f_n - f_k = k f_k$? Построить (качественно) спектр выходного сигнала и его векторную диаграмму для указанной в задании расстройки.

Задача 3б. *Определение необходимой полосы пропускания контура при усилении частотно-модулированных колебаний.* На вход резонансного усилителя подается ЧМ-колебание вида $U_{\text{ЧМ}}(t) = U_m \cos(2\pi f_n t + \beta \sin 2\pi F_M t)$. По данным, приведенным в таблице 4, рассчитать колебательный контур, обеспе-

чивающий прохождение заданного сигнала без искажений, если заданы средняя частота f_n , девиация Δf и индекс модуляции β . При этом предполагается, что средняя частота ЧМ-колебания совпадает с резонансной частотой контура, т. е. $f_n = f_k$. Определить добротность, сопротивление потерь в контуре. Рассчитать и построить спектр и векторную диаграмму выходного сигнала.

Таблица 4

Номер варианта	U_m , В	f_n , МГц	F_M , кГц	β , рад	L , мкГн	C , пФ	Δf , кГц
31	2	5,0	8	—	—	390	65
32	4	2,0	—	2	220	—	85
33	6	2,0	9	—	470	—	95
34	5	3,0	12	—	—	300	100
35	8	4,0	—	3	—	200	80
36	1	2,5	7	—	—	390	60
37	3	3,5	—	2	200	—	80
38	2	2,6	10	—	330	—	90
39	4	4,2	11	—	—	300	50
40	6	3,3	—	3	—	200	70
41	2	2,5	8	—	—	390	65
42	4	2,0	—	2	220	—	85
43	6	1,0	9	—	470	—	95
44	5	3,0	12	—	—	300	100
45	8	4,0	—	3	—	200	80
46	1	2,5	7	—	—	390	60
47	3	2,9	—	2	200	—	80
48	2	2,6	10	—	330	—	90
49	4	2,2	11	—	—	300	50
50	6	5,3	—	3	—	200	70
51	2	1,5	8	—	—	390	65
52	4	3,0	—	2	220	—	85
53	6	4,0	9	—	470	—	95
54	5	3,0	12	—	—	300	100
55	8	4,0	—	3	—	200	80
56	1	3,5	7	—	—	390	60
57	3	4,5	—	2	200	—	80
58	2	5,6	10	—	330	—	90
59	4	4,2	11	—	—	300	50
60	6	5,3	—	3	—	200	70

Как изменится спектр выходного сигнала, если $f_n \neq f_k$ и абсолютная расстройка $\Delta = f_n - f_k$? Построить (качественно) спектр и векторную диаграмму для указанной расстройки. Значения функций Бесселя приведены в таблице 5.

Таблица 5

β , рад	$J_n(\beta)$	$J_0(\beta)$	$J_1(\beta)$	$J_2(\beta)$	$J_3(\beta)$	$J_4(\beta)$
1		0,765	0,440	0,115	–	–
2		0,224	0,576	0,353	0,128	–
3		–0,260	0,339	0,486	0,309	0,132

Задача 4. Расчет автогенератора с контуром в цепи коллектора и с индуктивной связью, который генерирует колебания с частотой $f_0 = 1$ МГц. Добротность контура $Q = 50$, взаимная индуктивность $M = 5$ мкГн. Характеристика транзистора аппроксимируется полиномом третьей степени $i_k = N/30 + (1 + N/30)u_c + 0,4u_c^2 - 0,2u_c^3$, мА (N – номер варианта). Выбрать величину смещения на базе транзистора для мягкого и жесткого режимов работы автогенератора, построить кривые средней крутизны и колебательные характеристики для этих режимов. Оценить амплитуды стационарных колебаний для мягкого и жесткого режимов работы автогенератора.

Задача 5. Расчет элементов схемы симметричного транзисторного мультивибратора. Начертить спроектированную на транзисторах схему симметричного мультивибратора и произвести расчет всех элементов схемы. Определить амплитуду и время нарастания выходного напряжения, построить в масштабе временные диаграммы, иллюстрирующие работу рассчитанного устройства, если напряжение источника питания в каждом варианте $E_k = (10 + N)/2$, В, период следования импульсов T выбрать равным $T = 20 + N$, мкс, (N – номер варианта).

Задача 6. Расчет параметров устройства выборки и хранения, используемого в схемах аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Привести структурную схему устройства выборки и хранения (УВХ), на которой изобразить сопротивление резистора $R = 30$ Ом, включающее величины внутренних сопротивлений источника дискретного сигнала $s(kT)$ и электронных ключей ЭК1 и ЭК2, управляющих работой УВХ. Время срабатывания ЭК1 при включении и выключении не учитывается. При замыкании ключа ЭК2 время обнуления напряжения $u_C(t)$ на емкости C УВХ также не учитывается.

Отсчетный импульс $s(kT)$ запоминается в интегрирующей RC -цепи на время $T_{ср}$, необходимое для срабатывания АЦП. Это время должно быть менее длительности периода сигнала дискретизации, равной $T = N$, мкс (N – номер варианта).

Рассчитать величину емкости, входящей в запоминающее устройство, обеспечивающее требуемую точность измерения сигнала $s(kT)$ за выбранное время $\tau_0 \ll T$ (ошибка не более 1 %) и удержание измеренного напряжения в течение времени $T_{ср} \approx 0,8 \cdot T$, мкс на уровне не ниже 90 % от первоначального значения.

Оценить величину суммарного сопротивления R_{Σ} , обеспечивающего удержание измеренного напряжения.

Проиллюстрировать временными диаграммами процесс восстановления и хранения сигнала $s_{\text{ВЫХ}}(t)$ по его выборкам $s(kT)$.

3 ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ПАКЕТЕ MICROCAP-8

Сегодня для изучения или успешной разработки радиоэлектронного оборудования все чаще используются различные прикладные программы, позволяющие значительно упростить работу инженера и улучшить восприятие информации студентами.

Программа MicroCap имеет исчерпывающую встроенную помощь и возможность задания функциональных зависимостей параметров схемы (как функций времени, токов ветвей и узловых потенциалов), причем эти возможности даже несколько шире, чем в последних версиях OrCAD – в них можно сделать параметры пассивных компонентов зависящими только от токов или напряжений других ветвей схемы, в этих целях не нужно больше применять управляемые источники токов или напряжений. Приведем перечень основных характеристик MicroCap:

- многостраничный графический редактор принципиальных схем, поддерживающий иерархические структуры;

- поведенческое моделирование аналоговых и цифровых компонентов, возможность описания цифровых компонентов с помощью логических выражений, в сочетании с библиотекой графических символов типовых операций (суммирование, вычитание, умножение, интегрирование, применение преобразования Лапласа и т. п.). Это позволяет моделировать динамические системы, заданные не только принципиальными, но и функциональными схемами;

- большая библиотека компонентов, включающая наиболее популярные цифровые интегральные схемы дискретной логики и PLD и аналоговые компоненты типа диодов, биполярных, полевых и МОП-транзисторов, магнитных сердечников, линий передачи с потерями, кварцевых резонаторов, датчиков Холла и т. п.;

- макромодели компонентов могут быть представлены в виде принципиальных электрических схем или в текстовом виде;

- графики результатов выводятся в процессе моделирования или после его окончания по выбору пользователя, имеются сервисные возможности обработки графиков;

- многовариантный анализ при вариации параметров и статистический анализ по методу Монте-Карло;

- имеется специальная программа MODEL для расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов по справочным или экспериментальным данным;

- при наличии ошибок информация о них мгновенно появляется на экране; имеются встроенные средства помощи;
- имеется электронная документация и контекстно-ориентированные средства помощи.

MicroCap-5 и его более старшие версии позволяют моделировать аналоговые, цифровые устройства и, более того, смешанные аналого-цифровые устройства. Однако при этом нужно учитывать, что программа MicroCap-7 поддерживает формат PSpice старых версий пакета Design Center/OrCAD. В последних версиях ряд ключевых слов текстовых описаний PSpice претерпел незначительные изменения, и появились новые возможности. Поэтому перед загрузкой в современные версии PSpice текстовых описаний схем, полученных с помощью программы, может потребоваться их коррекция.

MicroCap выпускается для платформ IBM и Macintosh. Версии для IBM PC требуют:

- процессор не хуже Pentium II;
- ОЗУ объемом не менее 64 Мб;
- Microsoft или совместимую с ней двухкнопочную мышь;
- операционную систему Windows 95/98/ME или Windows 2000/NT4/XP/7.

Программа MicroCap очень удобна для первоначального освоения схемотехнического моделирования электронных схем. Наибольшее распространение она может получить при обучении студентов. Но однозначно выбрать одну единственную программу для применения в различных условиях невозможно. Поэтому приведем краткую характеристику других аналогичных программ, располагая их в алфавитном порядке.

3.1 Создание принципиальной схемы

3.1.1 Подготовительные операции

Новая схема создается по команде **File (Файл) >> New (Новый)**. После этого появляется окно выбора типа нового файла, представленное на рисунке 3.

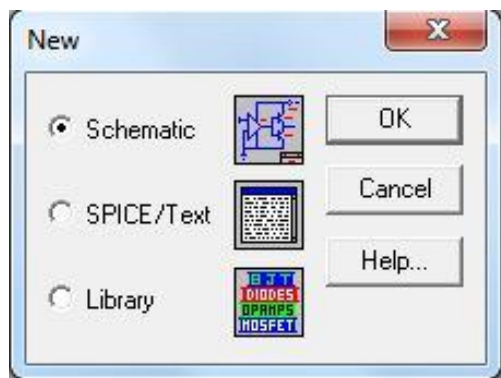



Рисунок 3 – Создание новой схемы, текстового файла или библиотеки моделей

При этом возможно графическое изображение схемы (режим *Schematic (Схема)*), текстовое описание (*SPICE/Text (Текст)*) или создание бинарного файла библиотеки (*Library (Библиотека)*). В связи с тем, что основную привлекательность программы MicroCap придает графический ввод схем, не будем касаться текстового ввода в формате *SPICE*.

Созданные ранее схемы загружаются по команде *File (Файл) >> Open (Открыть)*.

В результате выполнения команды *File (Файл) > New (Новый)* открывается пустой экран, на котором создается новая схема. Первоначально рекомендуется нажатием на пиктограмму  (команда *View/Grid (Отображение/Сетка)* меню *Options (Опции)*) нанести на экран координатную сетку для упрощения построения схемы. Шаг сетки установлен фиксированным и равным 0,1 дюйма (в программах MicroCap принята английская система единиц, изменить ее нельзя).

3.1.2 Добавление компонентов в схему

Перед добавлением символа элемента на схему его нужно выбрать в меню *Component (Компоненты)*. Наиболее часто встречающиеся компоненты имеет смысл разместить на специальных панелях (команда *Options (Опции) >> Component Palettes (Панели компонентов)*) для ускорения их поиска. Также можно вызвать их клавишами: 1. *Analog-Ctrl + 1*; 2. *Analog Models-Ctrl + 2*; 3. *Digital-Ctrl + 3*; 4. *Digital ICs-Ctrl + 4*. Выбранный компонент размещается на схеме щелчком мыши. Компонент поворачивается на 90° нажатием правой кнопки (до отпускания левой кнопки).

3.1.3 Ввод и редактирование атрибутов компонента

Диалоговые окна атрибутов открываются после ввода на схему компонентов из библиотек *Analog Primitives* и *Digital Primitives* (компоненты из библиотек *Analog Library* и *Digital Library* занесены в них с набором необходимых атрибутов, которые можно редактировать, открывая окна атрибутов двойным щелчком курсора по символу компонента).

Параметры элементов (общие):

PART – наименование элемента на схеме;

VALUE – номинальное значение (R,C,L);

FREQ – дополнительное частотно-зависимое выражение для использования в цепях переменного тока;

MODEL – наименование модели (R,C,L). В окне, расположенном справа от окна атрибутов, приводится список моделей, находящихся в доступных библиотеках, где выбирают подходящую модель;

PACKAGE – число однотипных секций в интегрированном объекте;

SLIDER_MIN – минимальное значение шага при исследовании по динамике постоянного тока;

SLIDER_MAX – максимальное значение шага при исследовании по динамике постоянного тока (2 параметра для R);

COST – стоимость блока для вычисления списка материалов полной стоимости схемы;

POWER – потребление мощности для вычисления списка материалов с полностью используемой мощностью схемы.

Примеры некоторых элементов, моделируемых в системе MicroCap с переводом:

- параметры резистора (Resistor) (рисунок 4):

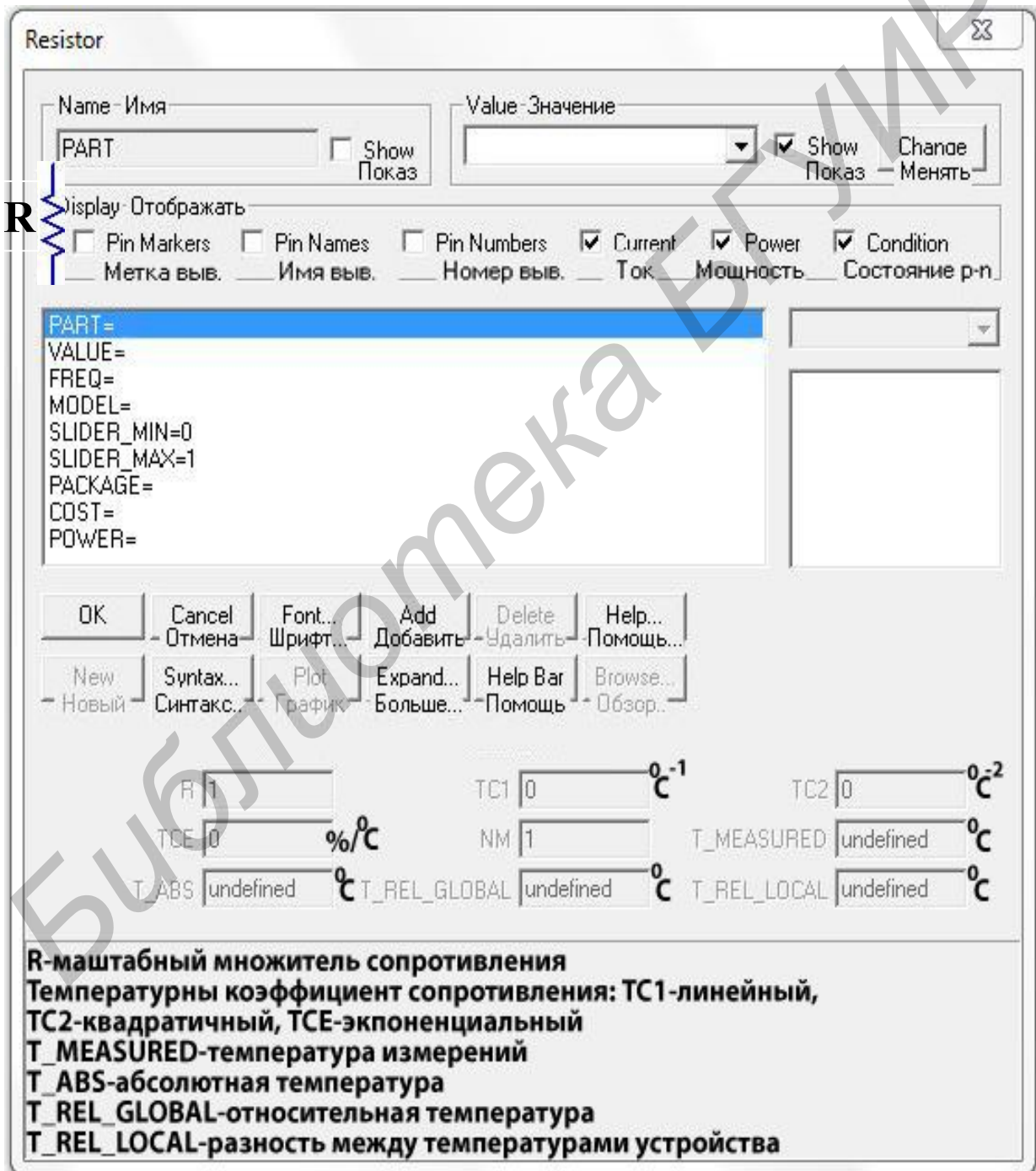


Рисунок 4 – Параметры резистора

- параметры конденсатора (Capacitor) (рисунок 5):

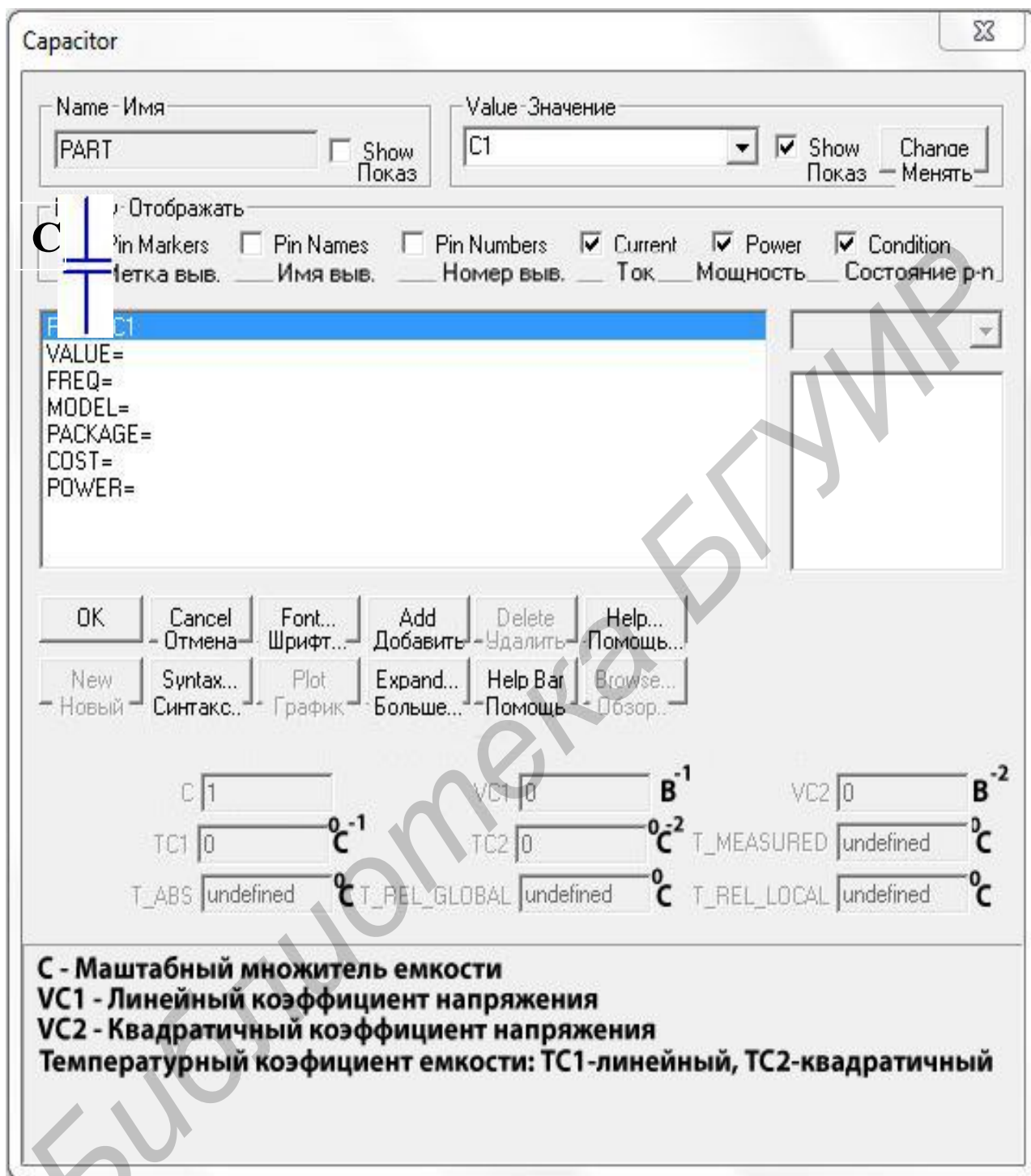


Рисунок 5 – Параметры конденсатора

- параметры индуктивности (Capacitor) (рисунок 6):

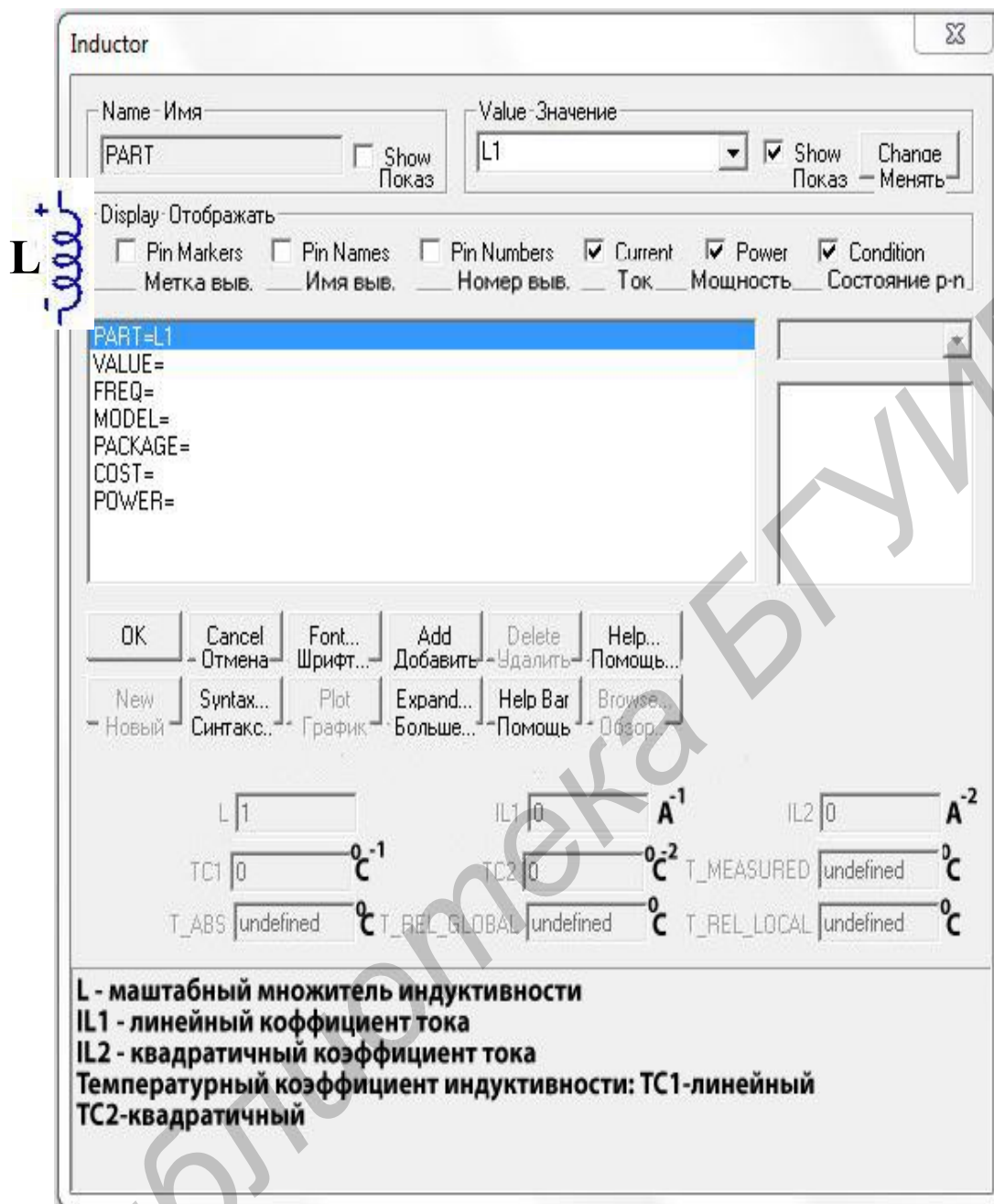


Рисунок 6 – Параметры индуктивности

- параметры источника постоянного напряжения (Battery) (рисунок 7):

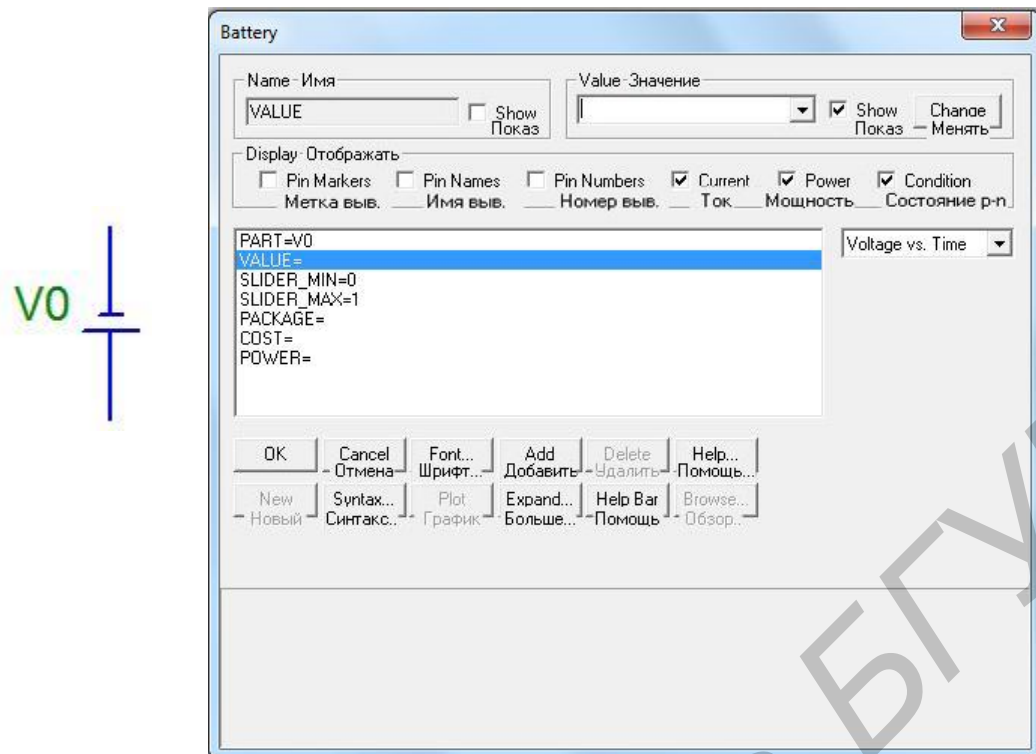


Рисунок 7 – Параметры источника постоянного напряжения

- параметры источника синусоидального напряжения (Sine Source) (рисунок 8):

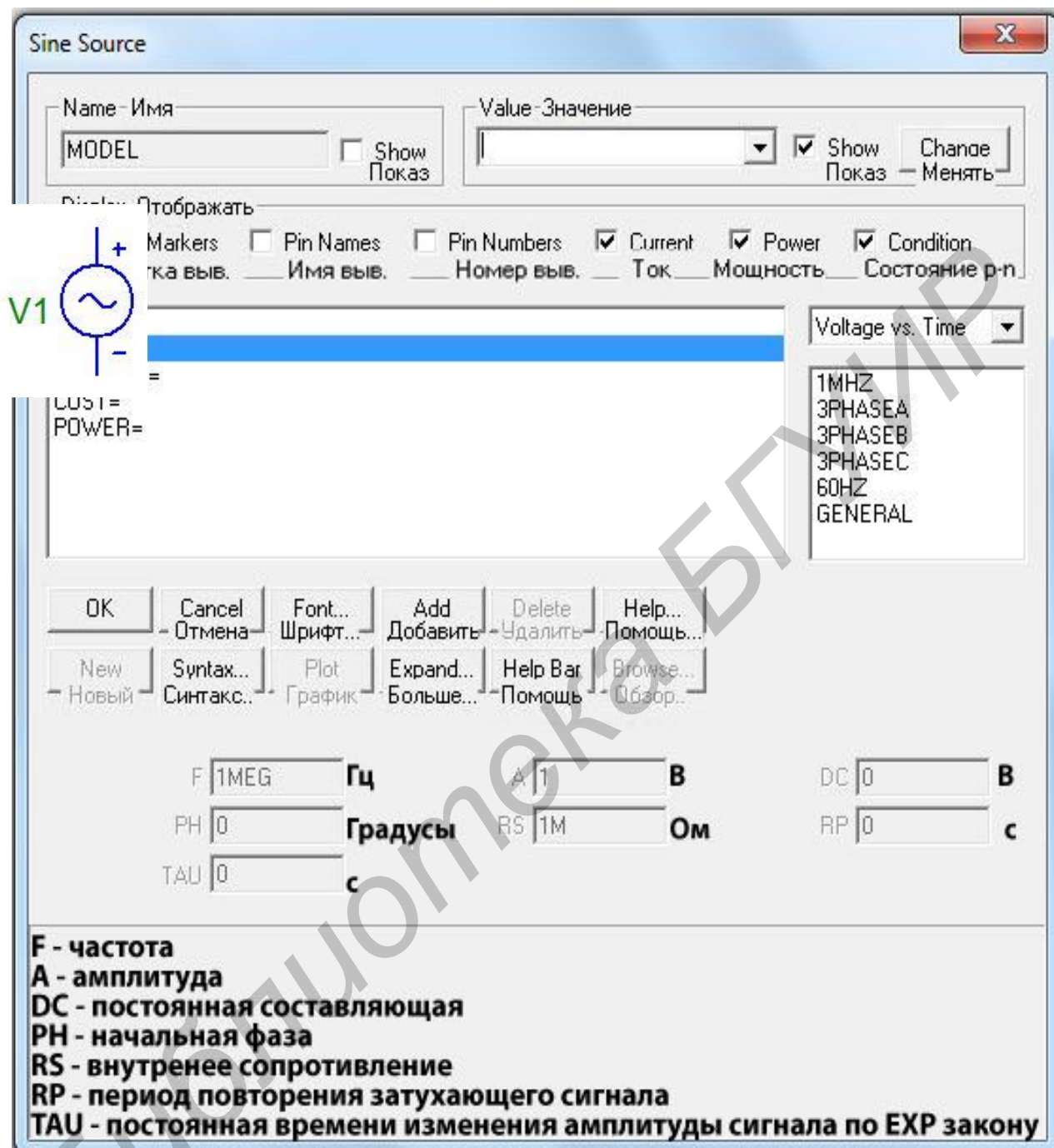


Рисунок 8 – Параметры источника синусоидального напряжения

- параметры источника импульсного напряжения (Pulse Source) (рисунок 9):

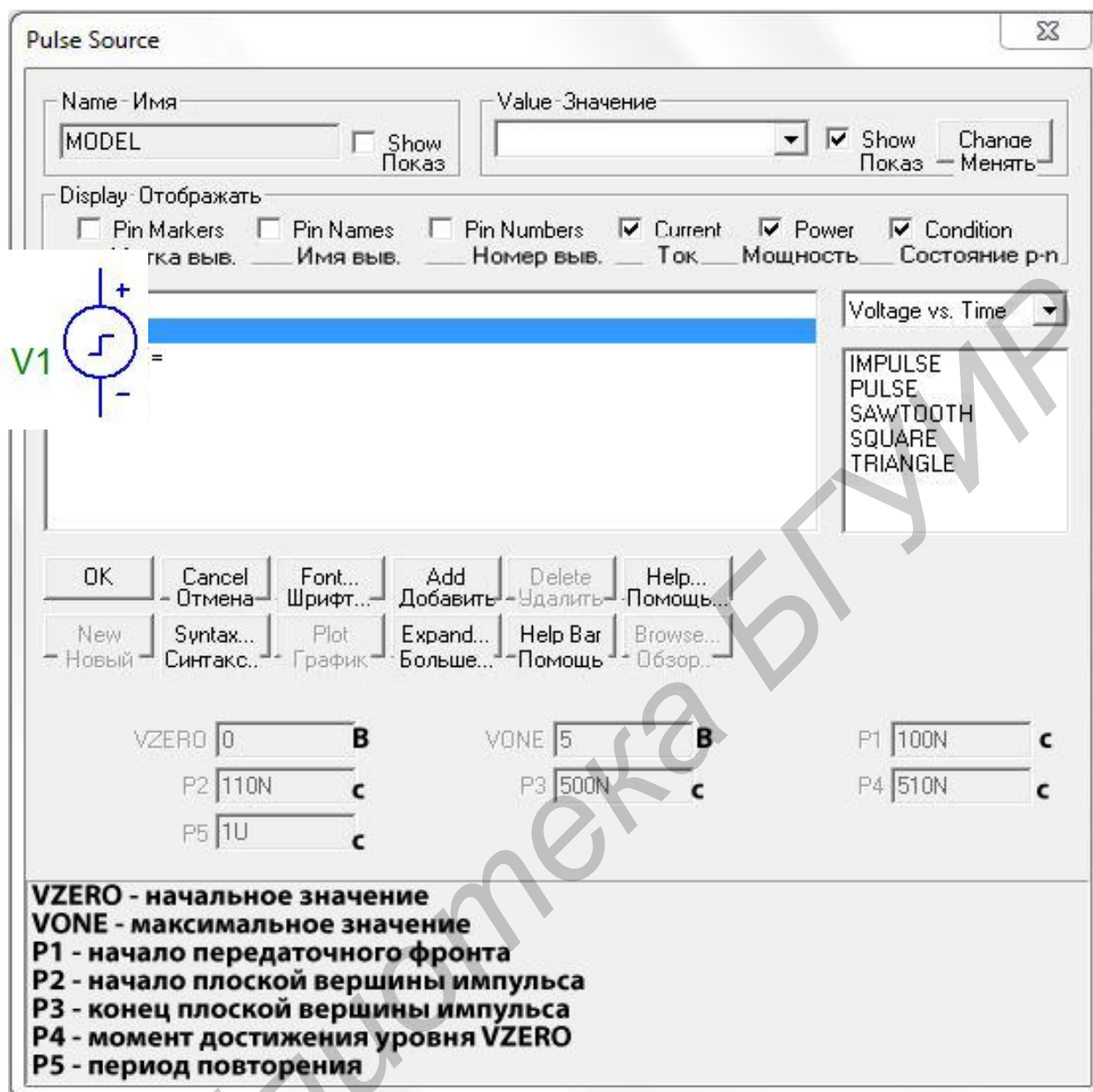






Рисунок 9 – Параметры источника импульсного напряжения

3.1.4 Ввод и редактирование электрических цепей

Режим ввода проводников включается щелчком мыши по пиктограмме  или выбором команды *Options >> Mode/Wire*, или нажатием комбинации клавиш **Ctrl+W**. Начало проводника отмечается щелчком мыши на выводе компонента. Передвигая курсор, не отпуская левую клавишу мыши, наносят проводник на чертеж. Если курсор движется по горизонтали или вертикали, прокладывается прямолинейный проводник. Если же он движется по диагонали, образуется один изгиб под углом 90°. Отпускание клавиши фиксирует окончание линии. Ввод проводников под произвольным углом выполняется при выборе команды *Options>Mode/WireD* или при нажатии на пиктограмму .

3.1.5 Ввод и редактирование текстовых надписей

На схему можно наносить текстовые надписи двух типов: атрибуты отдельных компонентов, имена цепей, описания моделей компонентов и любые произвольные текстовые комментарии, называемые в оригинальной документации *grid text*. Нанесение текстовых надписей второго типа производится в режиме **Options >> Mode/Text**, активизируемым также нажатием комбинации клавиш **Ctrl+T** или щелчком мыши по пиктограмме . Курсор помещается в точку схемы, где должен начинаться текст, и нажимается левая клавиша мыши. Текст заносится в открывающееся окно, завершение его ввода производится клавишей **[Enter]**, для перевода курсора на новую строку используется комбинация клавиш **Ctrl+[Enter]**. При вводе имен цепей необходимо курсор подвести к любой точке выбранной цепи. На имена цепей можно ссылаться при выводе результатов моделирования наравне с номерами узлов. Высвечивание текстовых надписей выполняется нажатием на пиктограмму  (меню **Options >> View/Grid Text**).

3.2 Выполнение моделирования

После того как нарисована принципиальная схема или создано ее текстовое описание, переходят к расчету характеристик, выбирая в меню **Analysis (Анализ)** один из видов анализа:

- **Transient Analysis (Переходные процессы), Alt+1** – расчет переходных процессов;
- **AC Analysis (Частотные характеристики), Alt+2** – расчет частотных характеристик;
- **DC Analysis (Передаточные харак. по постоянному току), Alt+3** – расчет передаточных функций по постоянному току.

3.2.1 Анализ переходных процессов (Transient Analysis)

После перехода в режим анализа переходных процессов программа MicroCap проверяет правильность составления схемы.

При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному расчету переходных процессов и открывает окно задания параметров моделирования **Transient Analysis Limits**.

3.2.2 Задание параметров моделирования Transient Analysis Limits

В окне задания параметров расчета переходных процессов, показанном на рисунке 10 и открывающимся нажатием клавиши F9, имеются следующие разделы.

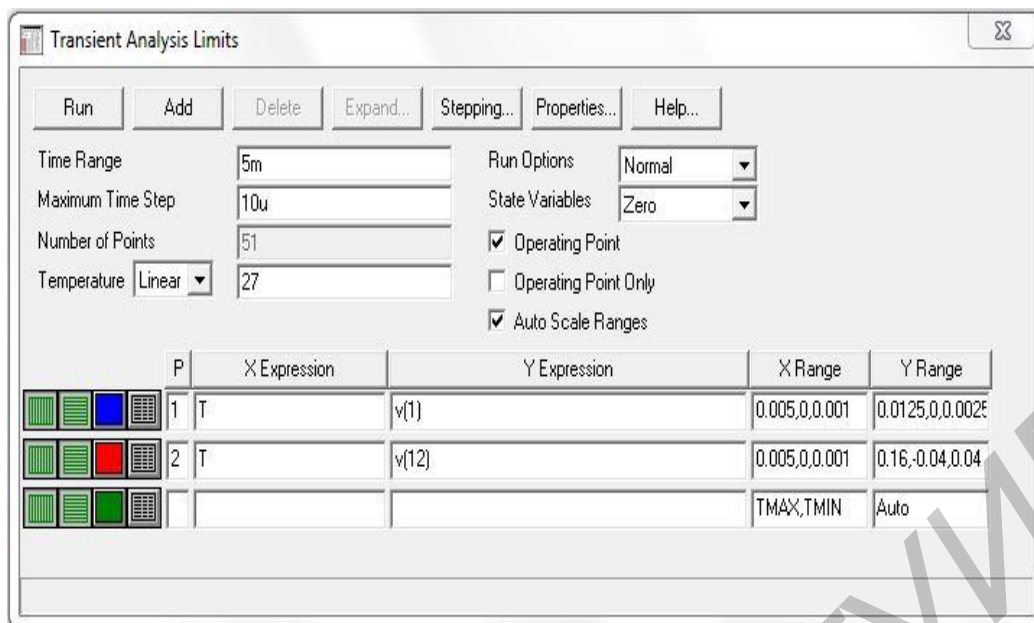





Рисунок 10 – Задание параметров расчета переходных процессов

Команды:

Run – начало моделирования. Щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие F2 также начинает моделирование. Моделирование может быть остановлено в любой момент нажатием на соответствующую пиктограмму  или клавишу **Esc**. Последовательные нажатия на пиктограмму  (пауза) прерывают и затем продолжают моделирование;

Add – добавление еще одной строки спецификации вывода результатов после строки, отмеченной курсором. На этой строке устанавливается способ отображения результатов и аналитические выражения для построения графиков;

Delete – удаление строки спецификации вывода результатов, отмеченной курсором;

Expand – открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например *Y Expression*;

Stepping – открытие диалогового окна задания вариации параметров;

Properties – открытие диалогового окна задания параметров;

Help – вызов раздела Transient Analysis системы помощи.

3.2.3 Числовые параметры

Time Range – спецификация конечного и начального времени расчета переходных процессов по формату $T_{max}[, T_{min}]$; по умолчанию назначается $T_{min}=0$ (отрицательные значения моментов времени недопустимы). Например, спецификация «1.2ms,0.4ms» задает интервал моделирования от 0,4 до 1,2 мс;

Maximum Time Step – максимальный шаг интегрирования. Расчет переходных процессов ведется с переменным шагом, выбираемым автоматически,

величина которого определяется допустимой относительной ошибкой RELTOL. Максимальная величина шага интегрирования равна заданному значению. Если этот шаг не задан (или задан равным нулю), то максимальный шаг интегрирования полагается равным $(T_{max}-T_{min})/50$;

Number of Points – количество точек, выводимых в таблицы, т. е. количество строк в таблице вывода результатов по умолчанию принимается равным 51, минимальное значение 6. Если заданные моменты времени не совпадают со значениями, при которых проводился численный расчет, то производится интерполяция. Интервал вывода данных равен:

$$(T_{max}-T_{min})/(<Number\ of\ Points> - 1).$$

Temperature – диапазон изменения температуры в градусах Цельсия; при выборе параметра **Linear** имеет формат *High[,Low[,Step]]*; если параметр Step (шаг) опущен, то выполняется анализ при двух значениях температуры Low (минимальной) и High (максимальной), если опущены оба параметра Low и Step, то расчет проводится при единственной температуре, равной High; при выборе параметра **List** указывается список температур, разделяемых запятыми. При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевые температурные коэффициенты ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов. Значение установленной здесь температуры может использоваться в различных выражениях, она обозначается как переменная TEMP.

3.2.4 Вывод результатов моделирования

Ниже раздела «Числовые параметры» и слева от раздела «Выражения» расположена группа пиктограмм. Нажатие каждой пиктограммы определяет характер вывода данных, задаваемых в той же строке. Имеются следующие возможности:

X Log/Linear Scale – переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси X. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным;

Y Log/Linear Scale – переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси Y. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным;

Color – вызов меню для выбора одного из 16 цветов для окрашивания графиков. Кнопка окрашивается в выбранный цвет;

Numeric Output – при нажатии этой кнопки в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе **Y Expression**. Запись производится в файл «<имя схемы>,TNO». Таблица просматривается в окне **Numeric Output** (открывается нажатием клавиши F5). Количество отсчетов функции (число строк в таблице) задается параметром **Number of Points** в разделе «Числовые параметры»;

Plot Group – в графе **P** числом от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, поме-

ченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится.

Выражения:

X Expression – имя переменной, откладываемой по оси X . Обычно при анализе переходных процессов по этой оси откладывается время (переменная T), однако это не всегда так. Так при расчете спектра сигнала с помощью преобразования Фурье (FFT) по оси X откладывается частота, а при расчете петли гистерезиса ферромагнетика – напряженность магнитного поля, например $H(K1)$;

Y Expression – математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y . Это может быть простая переменная типа напряжения в узле $V(5)$, падения напряжения на двухполюсном компоненте $V(L1)$, тока ветви $I(2,3)$, $I(1,1)$ или математическое выражение, например, $V(VCC) \cdot I(VCC)$. После щелчка правой кнопки мыши при расположении курсора в любой графе Y *Expression* открывается всплывающее меню, позволяющее выбрать из предлагаемых списков переменные и константы, размещаемые в этих графах;

X Range – максимальное и минимальное значение переменной X на графике по формату *High[,Low]*. Если минимальное значение Low равно нулю, его можно не указывать. Для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается *Auto*. В этом случае сначала выполняется моделирование, в процессе которого графики строятся в стандартном масштабе и затем автоматически перестраиваются;

Y Range – максимальное и минимальное значение переменной Y на графике; если минимальное значение равно нулю, его можно не указывать. Для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается *Auto*.

Опции:

Run Options – управление выдачей результатов расчетов;

Normal – результаты расчетов не сохраняются;

Save – сохранение результатов расчетов в бинарном файле <имя схемы>TSA;

Retrieve – считывание последних результатов расчета из файла <имя схемы>TSA, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц переходных процессов, как после обычного расчета;

State Variables – установка начальных условий: *Zero* – установка нулевых начальных условий для потенциалов всех аналоговых узлов и токов через индуктивности и неопределенных логических состояний «X» для цифровых узлов;

Read – чтение начальных условий из бинарного файла <имя схемы>TOP, созданного с помощью State Variables Editor, перед каждым вариантом расчета при изменении температуры или другого параметра;

Leave – установка в качестве начальных условий значений, полученных при окончании расчета предыдущего варианта. При расчете первого варианта

они полагаются нулевыми. Если в предыдущем варианте рассчитывался только режим по постоянному току, то в качестве начальных значений будут приняты параметры этого режима;

Operation Point – выполнение расчета режима по постоянному току перед началом каждого расчета переходных процессов. Данные этого режима заменяют значения всех начальных условий, если они были установлены;

Operation Point Only – расчет только режима по постоянному току (расчет переходных процессов не производится);

Auto Scale Ranges – присвоение признака автоматического масштабирования «Auto» по осям X , Y для каждого нового варианта расчетов. Если эта опция выключена, то принимаются во внимание масштабы, указанные в графах X Range, Y Range.

3.2.5 Меню режимов расчета переходных процессов **Transient**

После перехода в режим расчета переходных процессов меняется состав меню команд. Появляется новый режим **Transient**, имеющий следующие команды:

Run (F2) – выполнение моделирования;

Limits (F9) – задание пределов моделирования и построения графиков;

Stepping (F11) – вариация параметров;

Optimize (Ctrl+F11) – параметрическая оптимизация;

Analysis Window (F4) – открытие в графическом окне результатов моделирования;

Watch (Ctrl+W) – одновременный просмотр схемы, результатов моделирования и текстовых выражений в трех окнах;

Breackpoint (Alt+F9) – остановка моделирования в заданной точке;

3D Windows (трехмерная графика):

Add 3D Window – добавление окна трехмерной графики;

Delete 3D Window – удаление окна трехмерной графики;

Performance Windows (параметрическая зависимость):

Add Performance Window – добавление окна параметрической зависимости;

Delete Performance Window – удаление окна параметрической зависимости;

Thumb Nail Plot – размещение графика текущего окна малого размера в верхнем правом углу экрана;

Numeric Output (F5) – вывод на экран численных результатов в табличной форме;

State Variables Editor (F12) – вызов редактора значений переменных состояния;

DSP Parameters – открытие диалогового окна DSP (Digital Signal Processing – цифровая обработка сигналов), в котором задаются границы интервала времени для расчета спектральных плотностей (Upper Time Limit, Low-

er Time Limit) и количество отсчетов Number of Points (должно быть в точности равно степени числа 2 в интервале от 64 до 8192). Заданные значения принимаются во внимание, если в графе Status нажать кнопку On. Эти данные необходимы для того, чтобы при расчете спектров периодических процессов выделить на участке установившегося режима интервал времени, равный периоду первой гармоники;

Reduce Data Points – открытие диалогового окна сокращения объема информации, выводимой на графиках и сохраненной в файлах;

Exit Analysis (F3) – завершение режима анализа и возвращение в окно схем. Окно задания интервала времени для спектрального анализа.

3.3 Расчет частотных характеристик (AC Analysis)

В режиме AC сначала рассчитывается режим схемы по постоянному току, затем линейризуются все нелинейные компоненты (пассивные компоненты с нелинейными параметрами, диоды, транзисторы, нелинейные управляемые источники) и выполняется расчет комплексных амплитуд узловых потенциалов и токов ветвей. При линейризации цифровые компоненты заменяются их входными и выходными комплексными сопротивлениями, передача сигналов через них не рассматривается. Ко входу схемы должен быть подключен источник синусоидального *SIN* или импульсного сигнала *PULSE*, или сигнала *USER*, форма которого задается пользователем. При расчете частотных характеристик комплексная амплитуда этого сигнала автоматически полагается равной 1 В. Начальная фаза нулевая (независимо от того, как заданы значения параметров модели сигнала), а частота меняется в пределах, задаваемых в меню *AC Analysis Limits*. Возможно также подключение независимых источников напряжения U или тока I в формате *SPICE*, для которых задаются значения амплитуды и фазы. Если имеется один источник сигнала, то выходные напряжения будут совпадать с частотными характеристиками устройства. Если же источников сигнала несколько, то отклики от каждого сигнала будут складываться как комплексные величины. После перехода в режим анализа частотных характеристик программа MicroCap проверяет правильность составления схемы. При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному решению системы линейных алгебраических уравнений и открывает окно задания параметров моделирования.

3.3.1 Задание параметров моделирования AC Analysis Limits

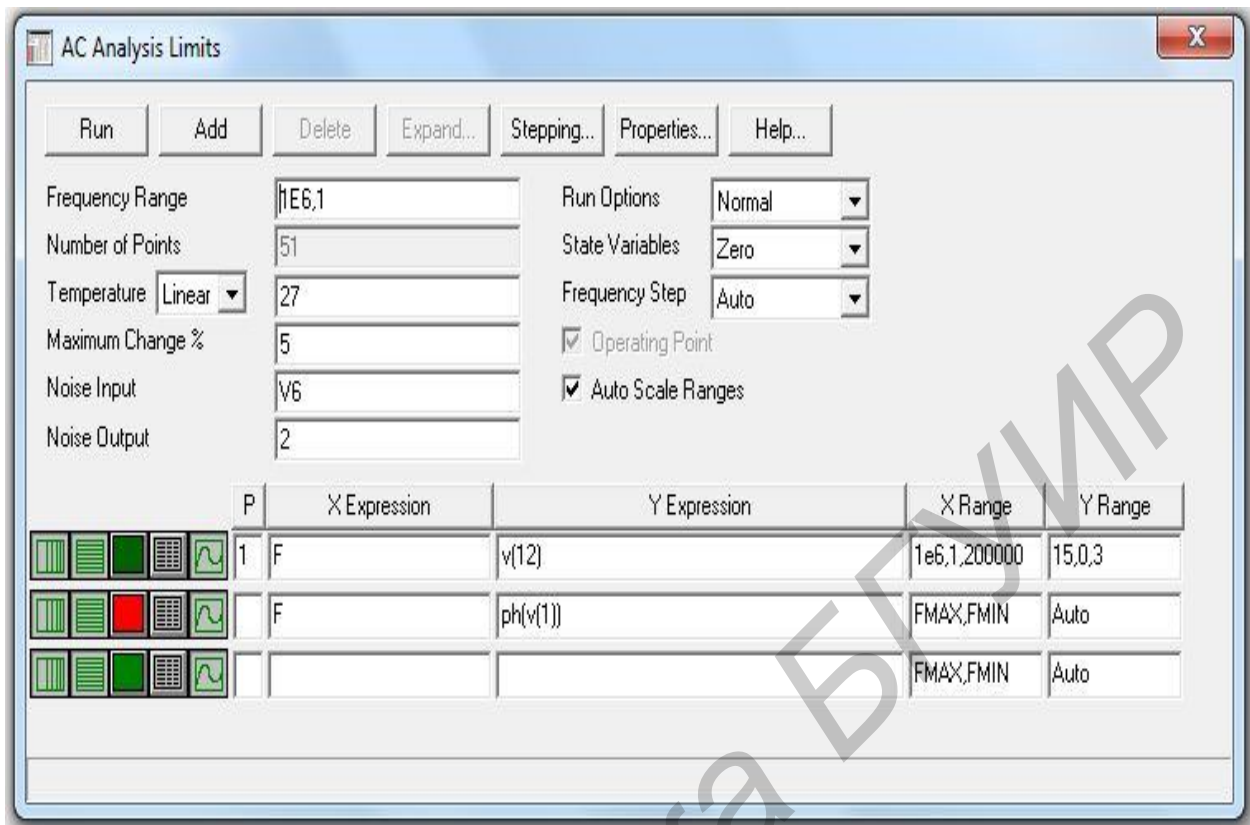





Рисунок 11 – Задание параметров расчета частотных характеристик

В окне задания параметров расчета переходных процессов, показанного на рисунке 11, имеются следующие разделы.

Команды:

Run – начало моделирования. Щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие клавиши F2 также начинает моделирование. Моделирование может быть остановлено в любой момент нажатием на соответствующую пиктограмму  или клавишу **Esc**. Последовательные нажатия на пиктограмму  (пауза) прерывают и затем продолжают моделирование;

Add – добавление еще одной строки спецификации вывода результатов после строки, отмеченной курсором. На этой строке устанавливается способ отображения результатов и аналитические выражения для построения графиков;

Delete – удаление строки спецификации вывода результатов, отмеченной курсором;

Expand – открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например *Y Expression*;

Stepping – открытие диалогового окна задания вариации параметров;

Properties – открытие диалогового окна задания параметров;

Help – вызов раздела AC Analysis системы помощи.

3.3.2 Числовые параметры

Frequency Range – спецификация конечной и начальной частоты по формату F_{max} , F_{min} . Отрицательные значения частоты не допускаются. Если значение F_{min} не указано, то расчет производиться не будет;

Number of Points – количество точек по частоте (N_f), в которых производится расчет частотных характеристик. Минимальное значение равно 5. В разделе *Опции* 3 режима: *Auto*, *Linear*, *Log*. В режиме *Auto* параметр **Number of Points** во внимание не принимается и количество точек определяется величиной **Maximum Change**. Если принят линейный шаг (*Linear*), то шаг приращения частоты равен

$$F_{k+1} - F_k = (F_{max} - F_{min}) / (N_f - 1).$$

Maximum Change, % – максимально допустимое приращение графика первой функции на интервале шага по частоте (в процентах от полной шкалы). Принимается во внимание только при выборе опции *Auto*. Если график функции изменяется быстрее, то шаг приращения частоты автоматически уменьшается;

Noise Input – имя источника сигнала, подключенного к входным зажимам цепи. При указании переменной INOISE в графе *Y Expression* выводится график квадратного корня спектральной плотности напряжения или тока внутренних шумов цепи, пересчитанной к этим зажимам;

Noise Output – номера узлов выходных зажимов цепи, в которых вычисляется спектральная плотность напряжения выходного шума цепи. Формат: узел1[, узел2].

3.3.3 Вывод результатов моделирования

Ниже раздела «Числовые параметры» и слева от раздела «Выражения» расположена группа пиктограмм. Нажатие каждой пиктограммы определяет характер вывода данных, задаваемых в той же строке. Имеются следующие возможности:

X Log/Linear Scale – переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси X. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным;

Y Log/Linear Scale – переключение между логарифмической и линейной шкалой по оси Y. При выборе логарифмической шкалы диапазон изменения переменной должен быть положительным;

Color – вызов меню для выбора одного из 16 цветов для окрашивания графиков. Кнопка окрашивается в выбранный цвет;

Numeric Output – при нажатии этой кнопки в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов функции, заданной в графе *Y Expression*. Запись производится в файл «<имя схемы>. ANO». Таблица просматривается в окне *Numeric Output* (открывается нажатием клавиши F5). Количество отсчетов

функции (число строк в таблице) задается параметром Number of Points в разделе Числовые параметры;

Rectungular – вывод графиков в прямоугольной (декартовой) системе координат;

Polar – вывод графиков в полярной системе координат;

Smith chart plot – вывод графиков на фуговой диаграмме (диаграмме Смита);

Plot Group – в графе P числами от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, помеченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится.

Выражения

X Expression – имя переменной, откладываемой по оси X. Обычно при анализе переходных процессов по этой оси откладывается частота (переменная F). Однако это необязательно. Так при расчете импульсной характеристики с помощью преобразования Фурье по этой оси откладывается время (переменная T). А при построении годографа для анализа устойчивости по методу Найквиста – действительная часть комплексного напряжения;

Y Expression – математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y. Это может быть простая переменная типа напряжения в узле V(5), падения напряжения на двухполюсном компоненте V(L1) или тока ветви I(L1). Произведения комплексных величин, например V(VCC)·!(VCC) и другие выражения. Для расчета уровня внутреннего шума в графе Y Expression помещают имена переменных ONOISE, INOISE; при этом графики других переменных нельзя одновременно вывести на экран;

X Range – максимальное и минимальное значение переменной X на графике по формату High[,Low]. Если минимальное значение Low равно нулю, его можно не указывать. Для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается Auto. В этом случае сначала выполняется моделирование, в процессе которого графики строятся в стандартном масштабе и затем автоматически перестраиваются;

Y Range – максимальное и минимальное значение переменной Y на графике; если минимальное значение равно нулю, его можно не указывать. Для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается Auto.

Опции:

Run Options – управление выдачей результатов расчетов;

Normal – результаты расчетов не сохраняются;

Save – сохранение результатов расчетов в бинарном дисковом файле <имя схемы/>.ASA;

QRetrieve – считывание последних результатов расчета из дискового файл <имя схемы/>.ASA, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц, как после обычного расчета;

State Vanabies (Zero. Read. Leave) – установка начальных условий;

Frequency Step – шаг изменения частоты;

Auto – автоматический выбор шага по частоте на основе контроля максимального приращения функции первого графика;

Linear – расчет с постоянным линейным шагом по частоте;

Log – расчет с постоянным шагом на логарифмической шкале частоты;

Operation Point – предварительное выполнение расчета режима по постоянному току;

Auto Scale Ranges – присвоение признака автоматического масштабирования «Auto» по осям X , Y для каждого нового варианта расчетов. Если эта опция выключена, то принимаются во внимание масштабы, указанные в графах X Range, Y Range.

3.3.4 Меню режимов расчета частотных характеристик АС

После перехода в режим расчета частотных характеристик меняется состав меню. Появляется новый режим АС, имеющий следующие команды:

Run (F2) – выполнение моделирования;

Limits (F9) – задание пределов моделирования и построения графиков;

Stepping (Fit) – вариация параметров;

Optimize (Ctrl+F11) – параметрическая оптимизация;

Analysis Window (F4) – открытие графического окна результатов моделирования;

Watch (Ctrl+W) – одновременный просмотр схемы, результатов моделирования и текстовых выражений в трех окнах;

Breckpoint (Alt+F9) – остановка моделирований в заданной точке;

3D Windows (трехмерная графика);

Add 3D Window – добавление окна трехмерной графики;

Delete 3D Window – удаление окна трехмерной графики;

Performance Windows – (параметрическая зависимость);

Add Performance Window – добавление окна параметрической зависимости;

Delete Performance Window – удаление окна параметрической зависимости;

Thumb Nail Plot – размещение графика текущего окна малого размера в верхнем правом углу экрана;

Numeric Output (F5) – вывод на экран численных результатов в табличной форме;

State Variables Editor (F12) – вызов редактора значений переменных состояния;

DSP – открытие диалогового окна DSP (Digital Signal Processing – цифровая обработка сигналов), в котором задаются границы интервала частот для расчета преобразования Фурье (Upper Frequency, Lower Frequency) и количество отсчетов Number of Points (должно быть в точности равно степени числа 2 в

интервале от 64 до 8192). Заданные значения принимаются во внимание, если в графе Status нажать кнопку On. При расчете импульсных характеристик путем преобразования Фурье комплексных коэффициентов передачи эта возможность практически не используется;

Reduce Data Points – открытие диалогового окна сокращения объема информации, выводимой на графиках и сохраненной в файлах;

Exit Analysis (F3) – завершение режима анализа и возвращение в окно схем.

Лабораторная работа №1

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы – изучить и освоить при помощи программы MicroCap методы измерения основных показателей АЭУ.

Выполнение работы

- 1 Включите компьютер и загрузите пакет MicroCap.
- 2 Создайте или возьмите из библиотеки схему лабораторного макета в виде, представленном на рисунке 12.

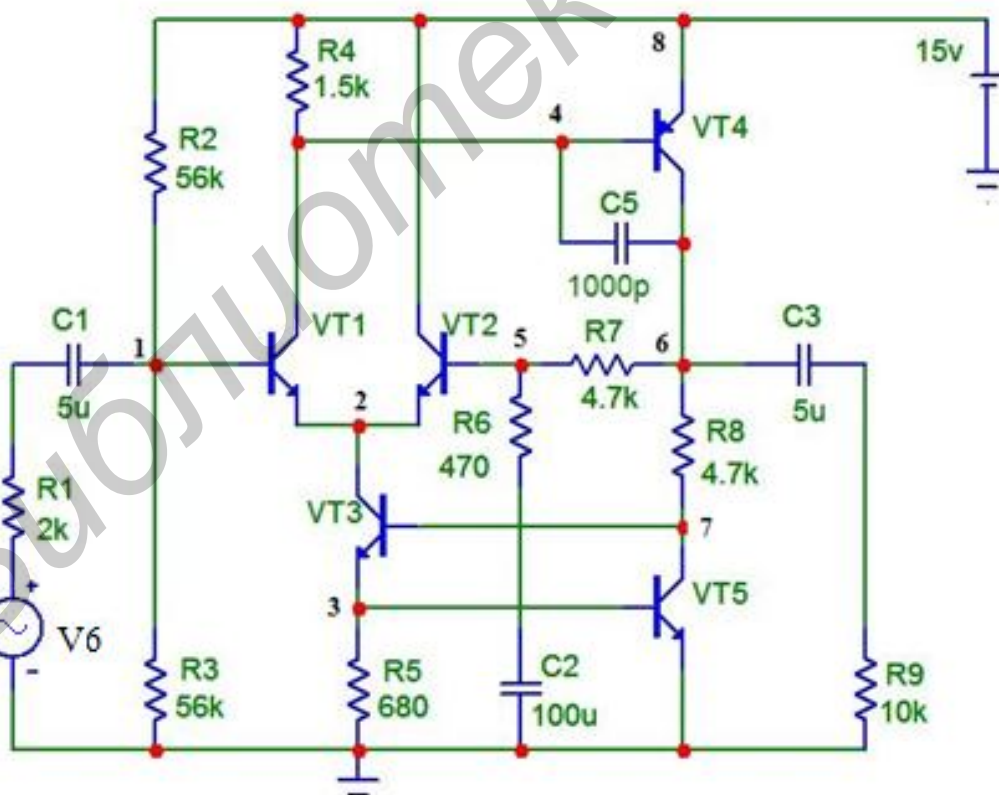





Рисунок 12 – Схема лабораторного макета

3 По команде *Analysis (Анализ)>Dynamic DC (Расчет по постоянному току...)* или нажатием *Alt+4* производится расчет режима по постоянному току и его отображение на чертеже схемы.

4 С помощью пиктограммы  измерьте постоянные напряжения в контрольных точках.

5 С помощью пиктограмм  и  измерьте фактические токи и мощность транзисторов.

6 При помощи команды *Analysis(Анализ)> Transient (Переходные процессы)* или нажатием *Alt+1* перейдем в режим для снятия АХ при частоте $f = 1\text{кГц}$ (частота задается в источнике синусоидального напряжения) для двух значений сопротивления нагрузки $R9 = 10\text{кОм}$ и $R10 = 2\text{кОм}$ (меняя номинал $R9$ с 10k на 2k).

На экране отобразится перечень пределов анализа передаточной характеристики по постоянному току (рисунок 13).

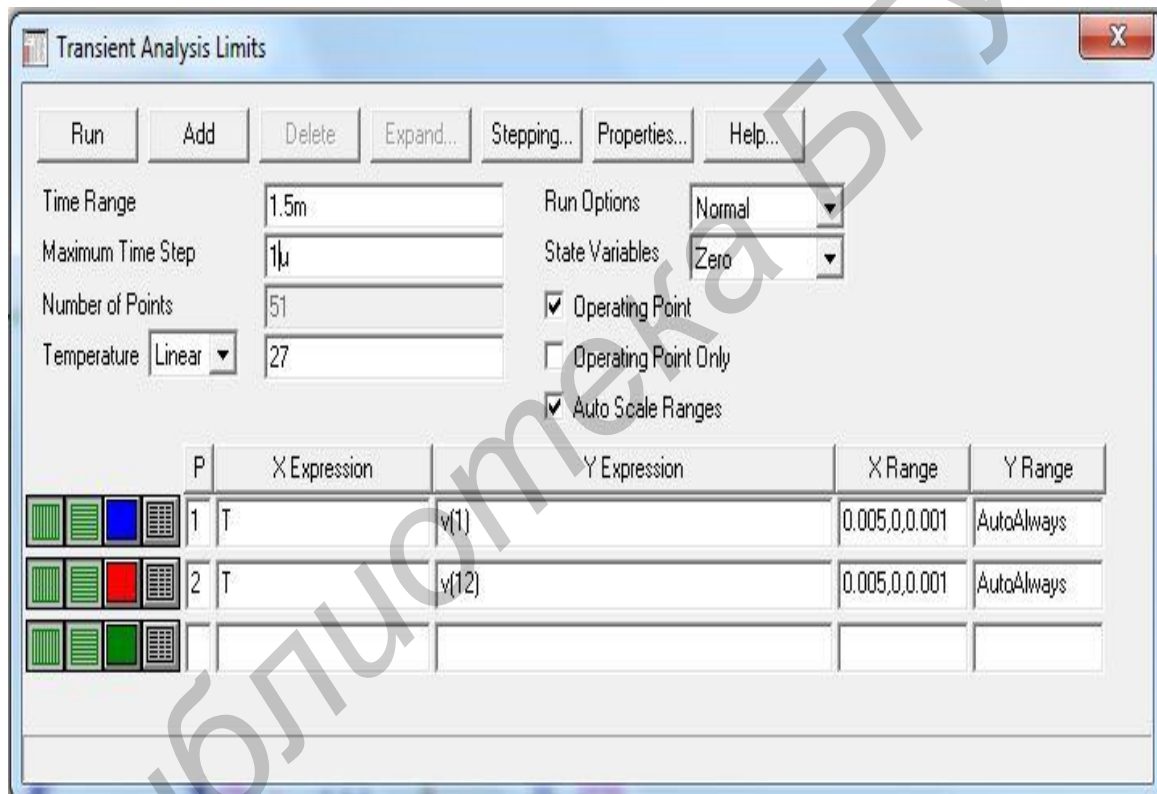


Рисунок 13 – Задание параметров расчета переходных процессов

Следуя полученным теоретическим сведениям, подберите параметры элементов схемы и пределов исследования ее так, как показано на рисунке 14, чтобы получить показанную ниже амплитудную характеристику (рисунок 15). Выбираем диапазон до тех пор, пока характеристика не будет усечена.

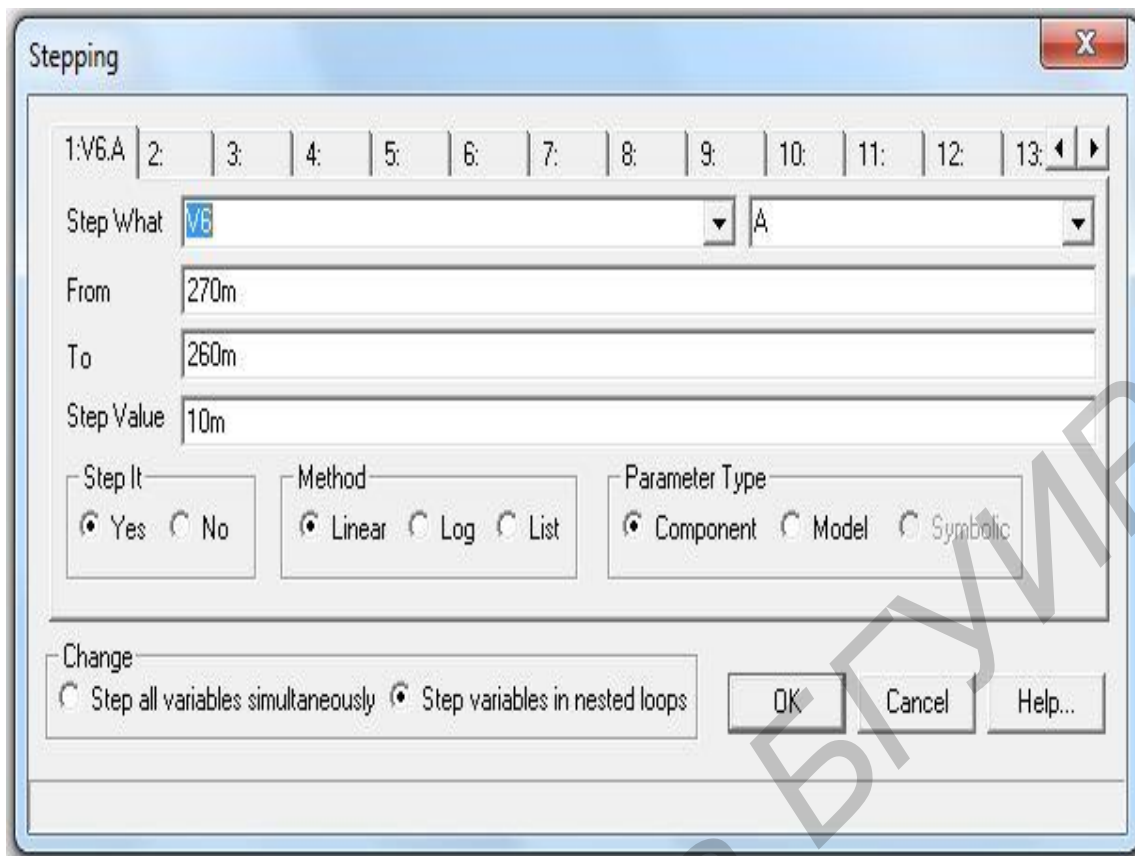



Рисунок 14 – Stepping (По шагам)

Снять полученные данные ($U_{вых\ min}$, $U_{вых\ max}$, $U_{вх\ min}$, $U_{вх\ max}$) на границах перехода прямолинейного участка на полученной амплитудной характеристике (см. рисунок 15).

Повторить для $R_{10} = 2\text{ кОм}$ (меняя номинал R_9 с $10k$ на $2k$).

7 При помощи команды *Analysis (Анализ) > AC (Частотные характеристики)* или нажатием *Alt+2* снять АЧХ усилителя при $R_9 = 10\text{ кОм}$ и $R_{10} = 2\text{ кОм}$ (меняя номинал R_9 с $10k$ на $2k$). В ячейке **Noise Input (Входной источник)** выбрать *V6* (источник синусоидального напряжения). Результат имеет вид, показанный на рисунке 16. После чего нажимаем *Stepping (По шагам)*, указываем *Step What (Какой шаг)*, выбираем *R9* и задаем параметры *From = 2k*, *To(K) = 10k*, *Step Value (Шаг) = 8k* (рисунок 17).

Нажимаем ОК и пиктограмму , после чего строится АЧХ нашей схемы (рисунок 18).

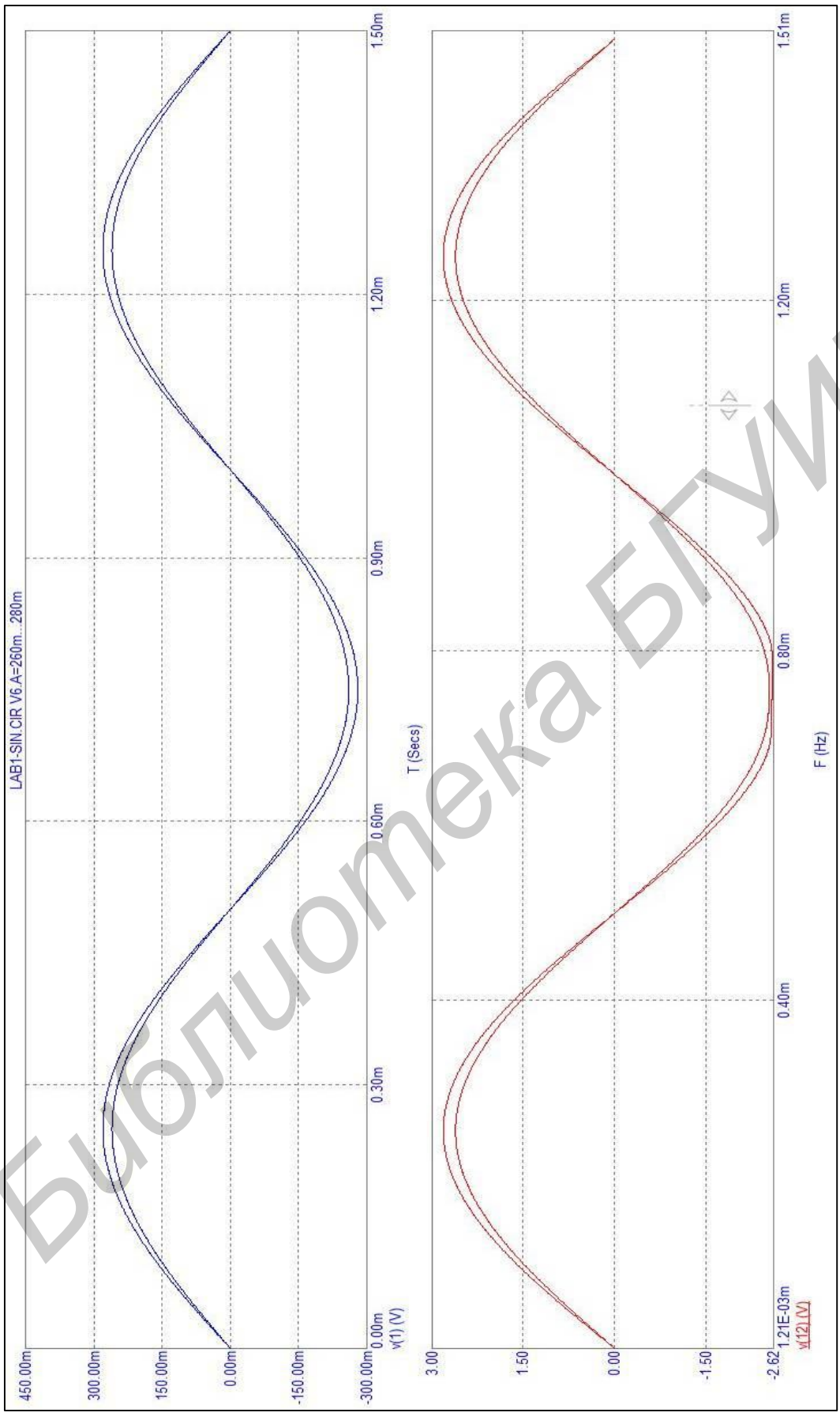


Рисунок 15 – Амплитудная характеристика

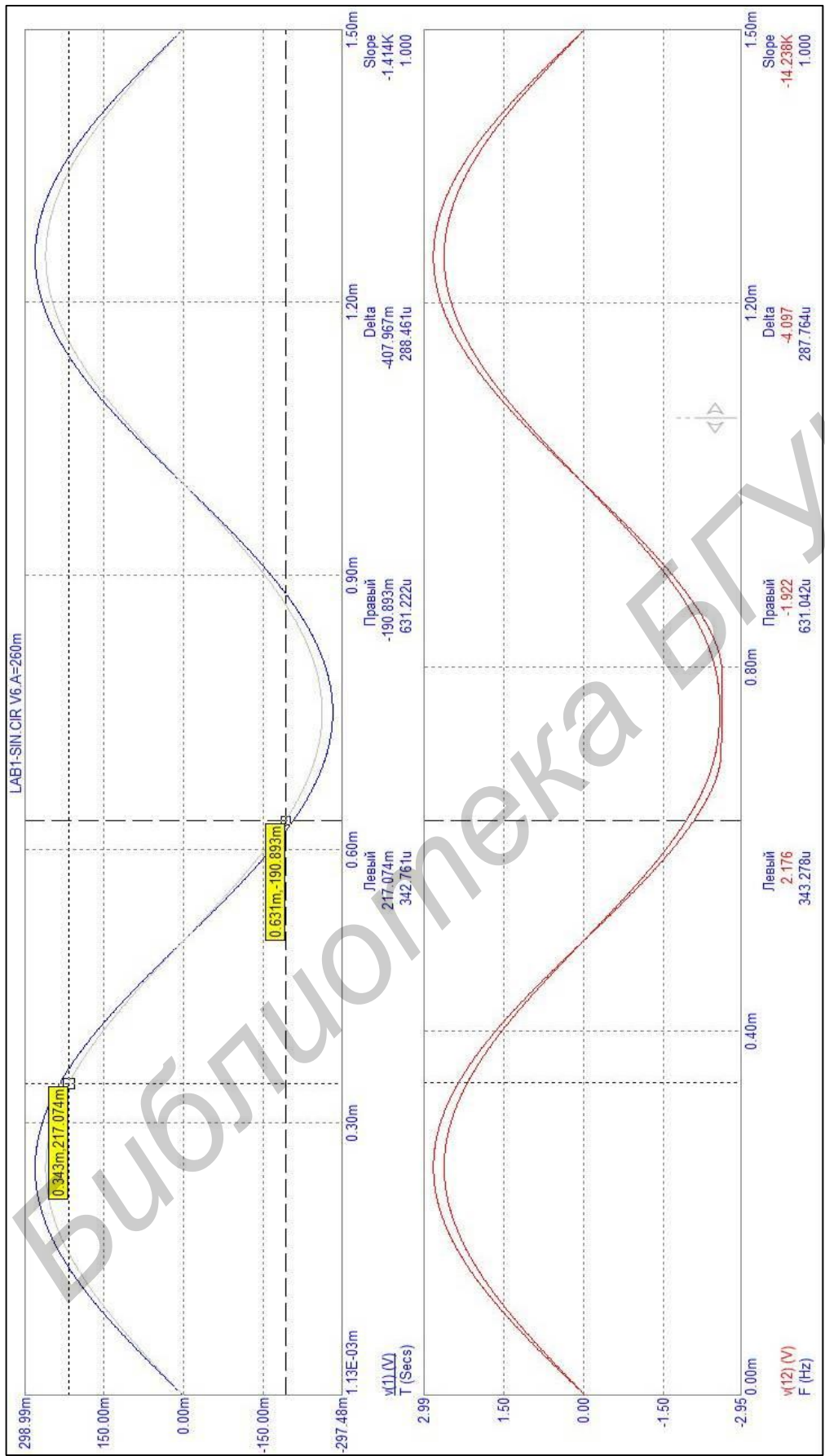


Рисунок 16 – Снятие характеристик

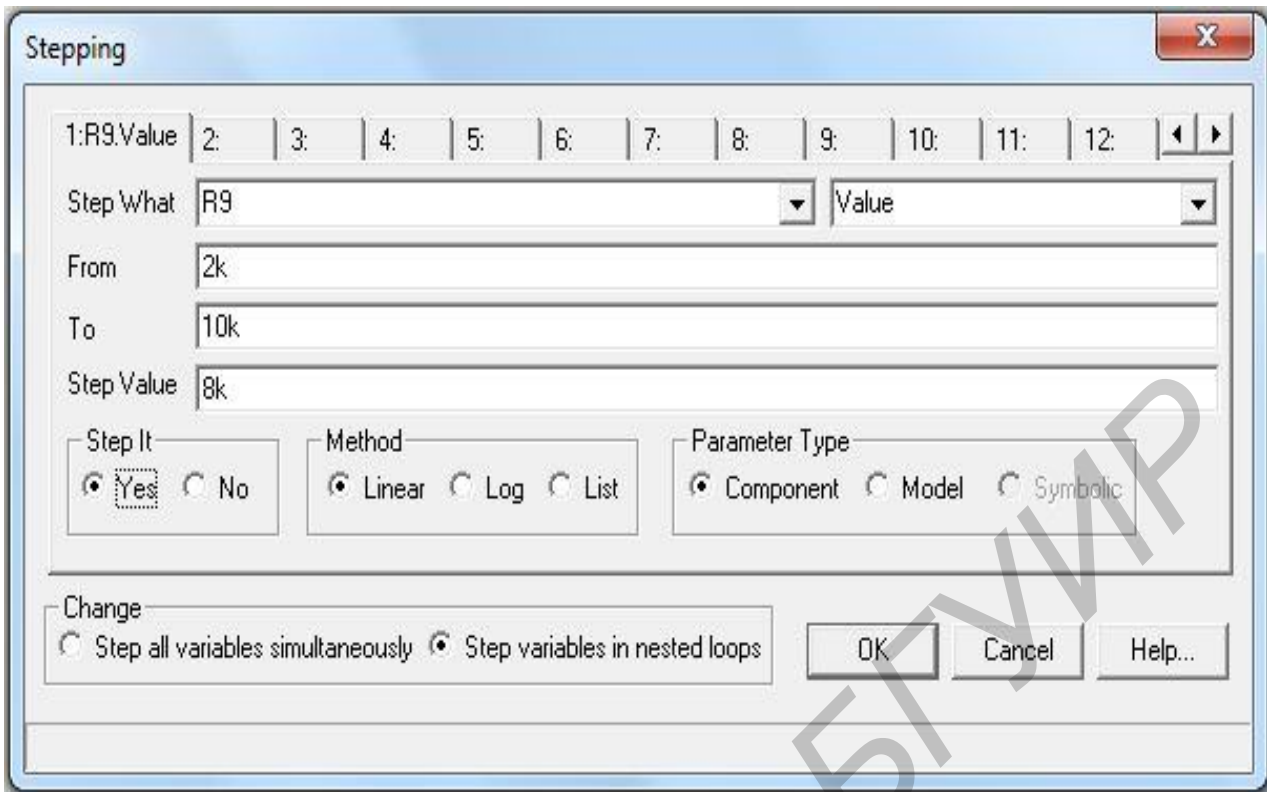


Рисунок 17 – Stepping (По шагам)

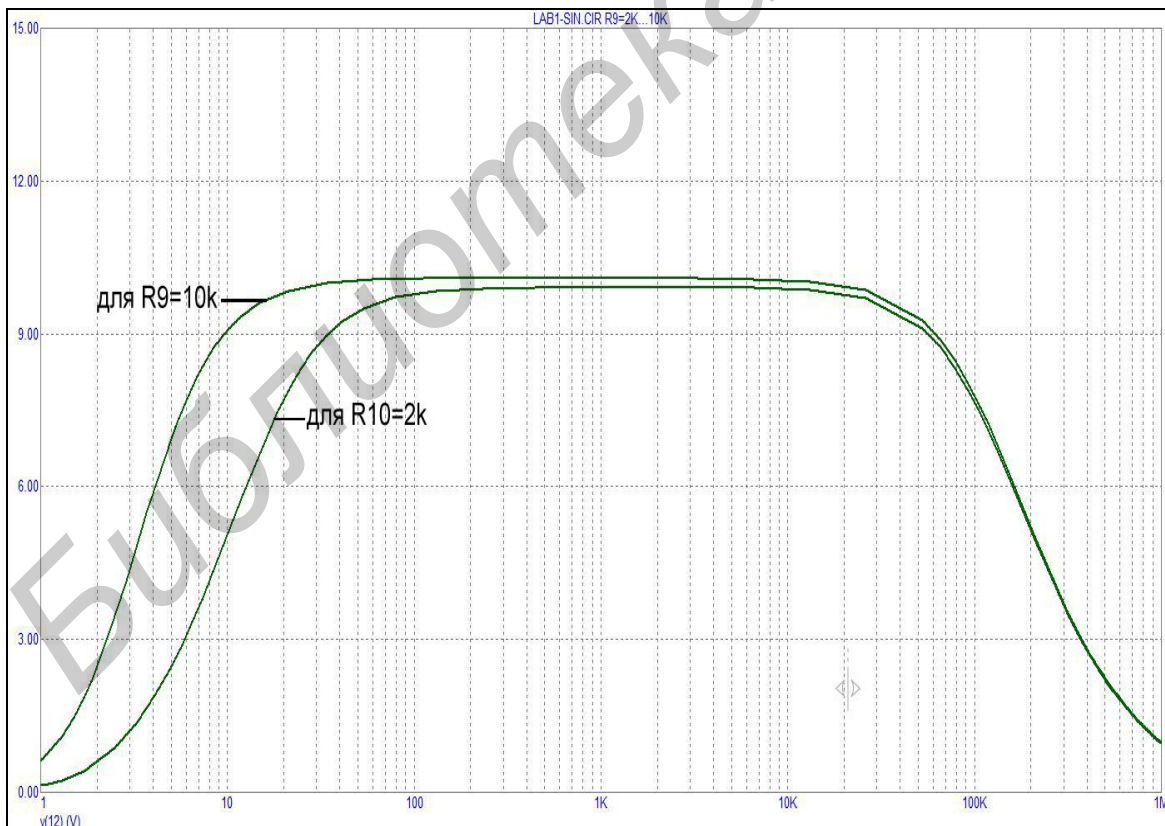





Рисунок 18 – Амплитудно-частотная характеристика

После чего снимаем характеристики. Для смены характеристик будем использовать пиктограммы . Вначале найдем пик коэффициента усиления K с помощью пиктограммы . Появится результат [частота/коэф. усил.].

Далее находим нижнюю (f_n) и верхнюю (f_v) границу частотного диапазона. При нажатии на пиктограмму  появится окно (рисунок 19), где в поле *Value (Значение)* вводим выражение [полученный пик $K \times 0.707$] (из выражения $K_0/\sqrt{2}$).

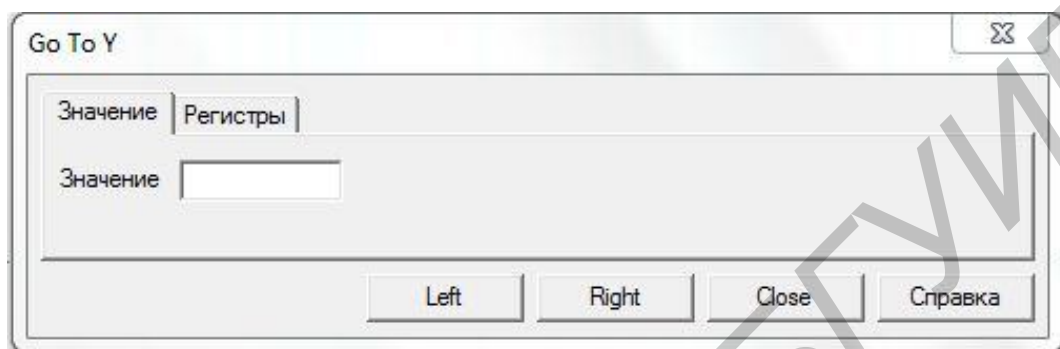


Рисунок 19 – Окно перехода к значению

После чего нажимаем кнопки *Left*, *Right*, точки снятия данных станут в нужное нам положение (если правая точка стала на место левой, то ее переместите курсором мыши противоположно левой точке). После чего можем снять (f_n) и (f_v) (рисунок 20).

Нажав на , повторим для $R_{10} = 2$ кОм.

8 Получив данные из пункта 6, найдем $R_{вх}$ и $R_{вых}$ по формулам (1), (2):

$$R_{вх} = U_{вх} \cdot R / (E - U_{вх}), \quad (1)$$

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{вых} = U_{вых1} - U_{вых2}$, $\Delta I_{вых} = I_{вых1} - I_{вых2}$, $I_{вых1} = U_{вых1} / R_{н1}$, $I_{вых2} = U_{вых2} / R_{н2}$, ($R_{н1}$, $R_{н2}$ – сопротивления R_9 и R_{10}).

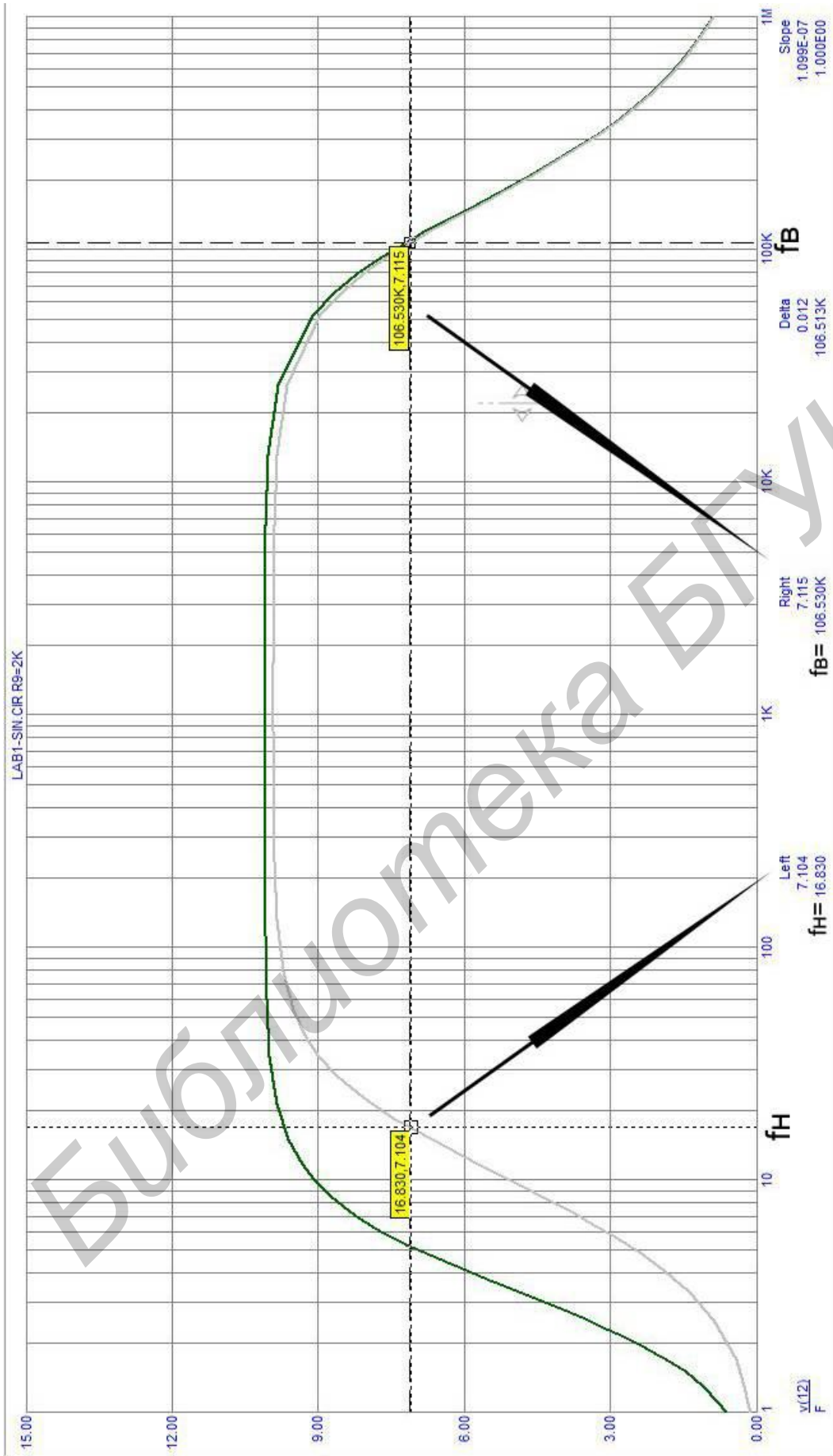


Рисунок 20 – Снятие нижней (f_H) и верхней (f_B) границы частотного диапазона

9 Заменить источник синусоидального напряжения на источник прямоугольных импульсов.

Ставим параметры, приведенные на рисунке 21.

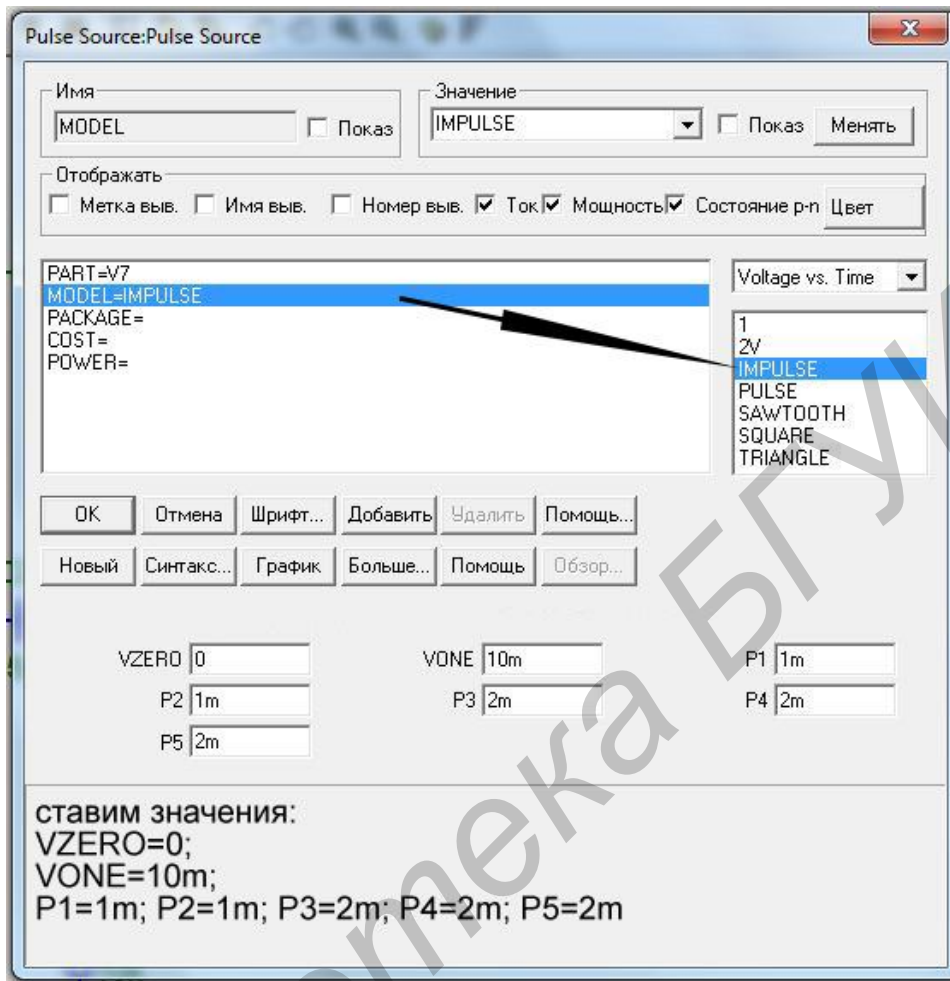


Рисунок 21 – Параметры источника прямоугольных импульсов

После чего получим схему, изображенную на рисунке 22.

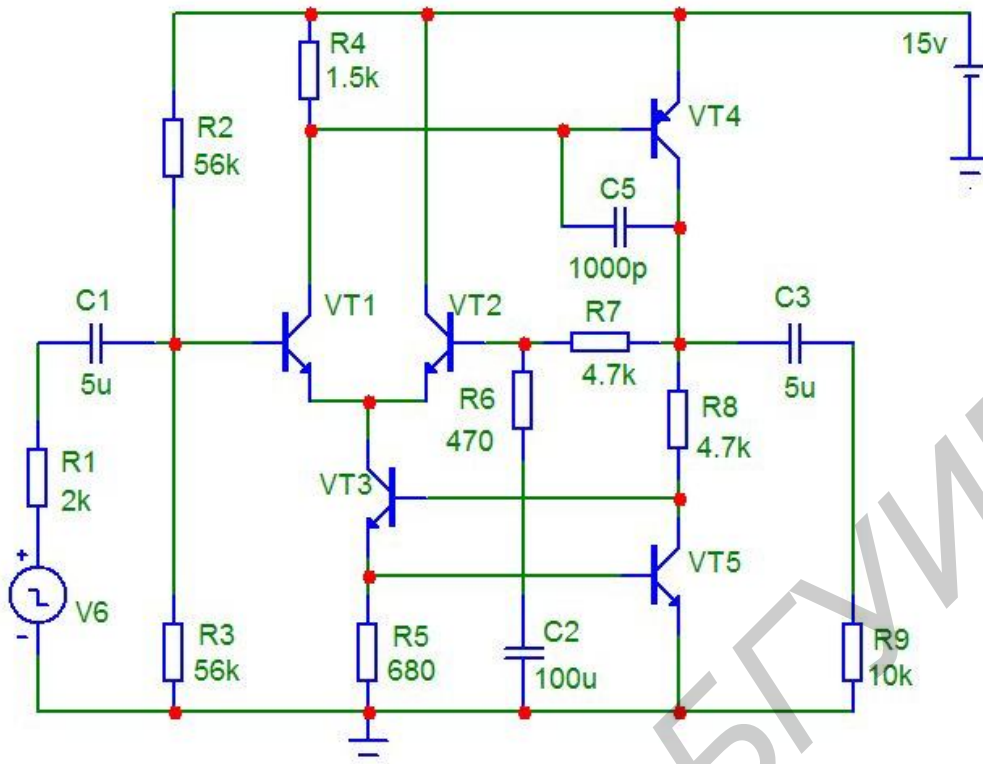


Рисунок 22 – Схема лабораторного макета с источником прямоугольных импульсов

10 При помощи команды *Analysis (Анализ) > Transient (Переходные процессы)* или нажатием *Alt+I* перейдем в режим для снятия переходных характеристик при длительности $t_u = 1$ мс.

Нажав *Stepping (По шагам)*, где *Step What (Какой шаг)*, выбираем *R9* и задаем параметры *From = 2k*, *To (К)=10k*, *Step Value (Шаг) = 8k* (рисунок 23).

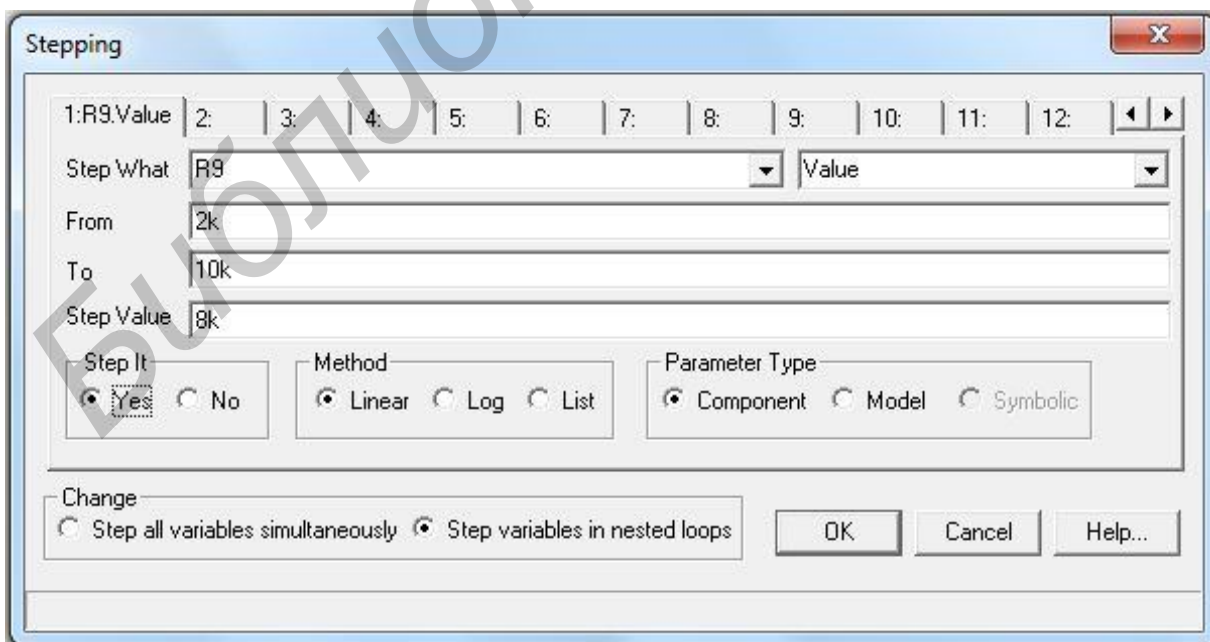



Рисунок 23 – Stepping (По шагам)

Нажимаем ОК и пиктограмму , после чего строится переходная характеристика нашей схемы (рисунок 24).

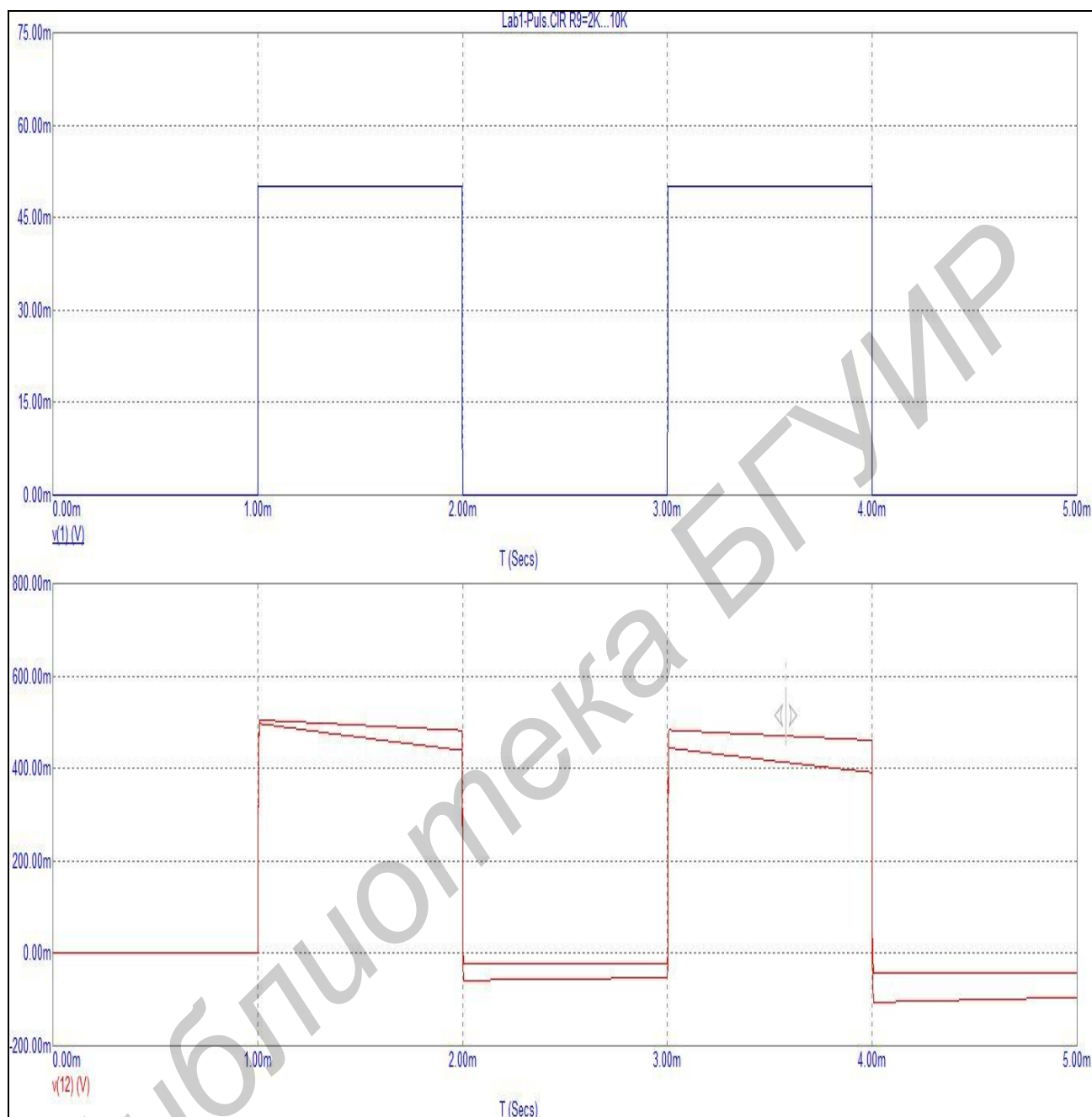



Рисунок 24 – Переходная характеристика

Нажав правую кнопку мыши, выделяем область, которую надо исследовать. После чего она увеличивается для простоты измерений. С помощью пиктограммы  можем с легкостью измерить расхождение графиков, как приведено на рисунке 25, проведя курсором (сверху вниз) по области измерения.

11 Сняв данные, рассчитать относительный спад вершины по формуле (3):

$$\Delta\% = 2\pi f_H t_{\text{И}} 100 \%. \quad (3)$$

12 Сформулируйте вывод и оформите отчет по лабораторной работе.

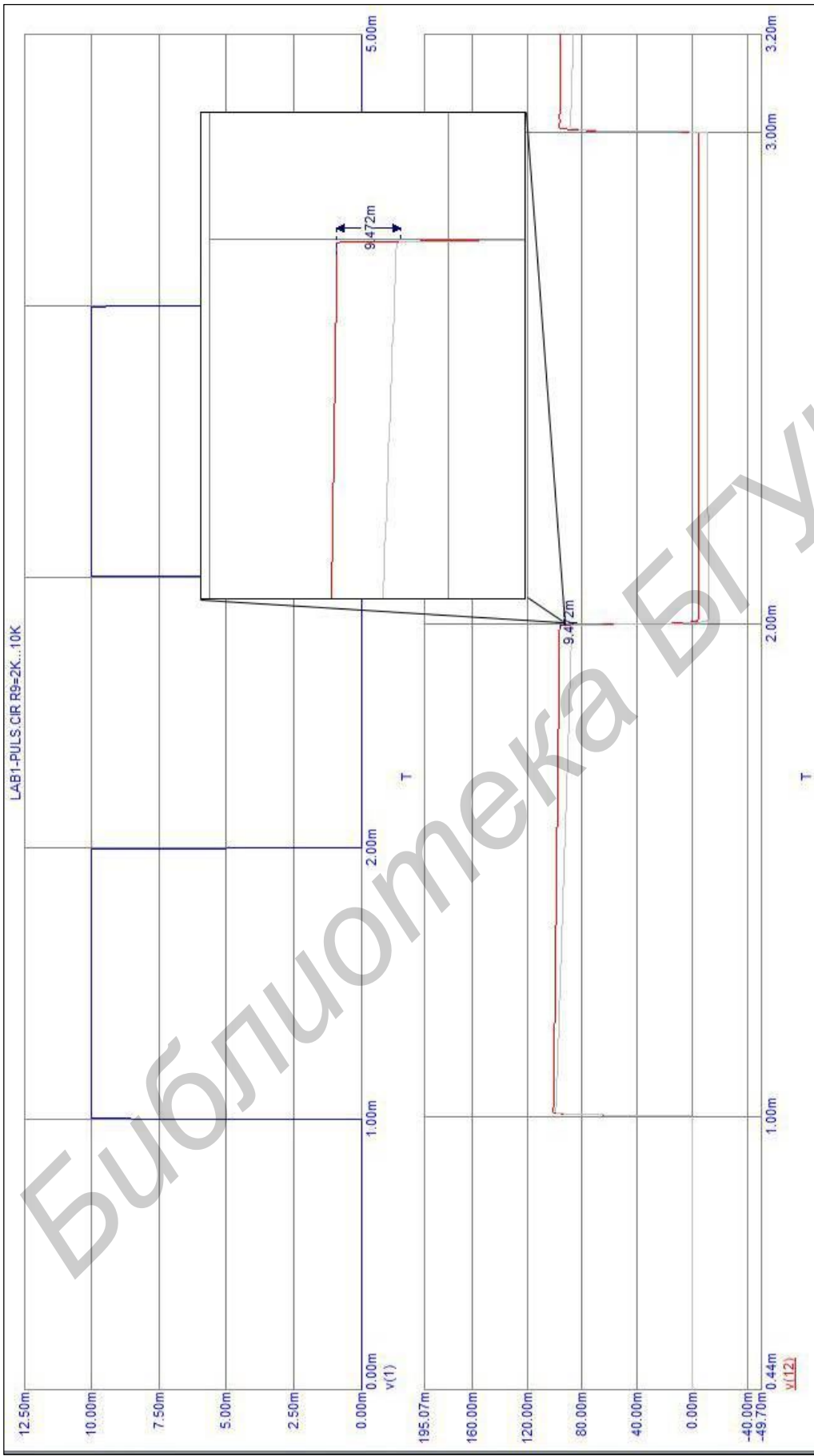


Рисунок 25 – Снятие данных на графике переходных характеристик

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы – изучить и исследовать при помощи программы MicroCap резисторный каскад на биполярном транзисторе.

Выполнение работы

- 1 Включите компьютер и загрузите пакет MicroCap.
- 2 Создайте или возьмите из библиотеки схему лабораторного макета в виде, представленном на рисунке 26.

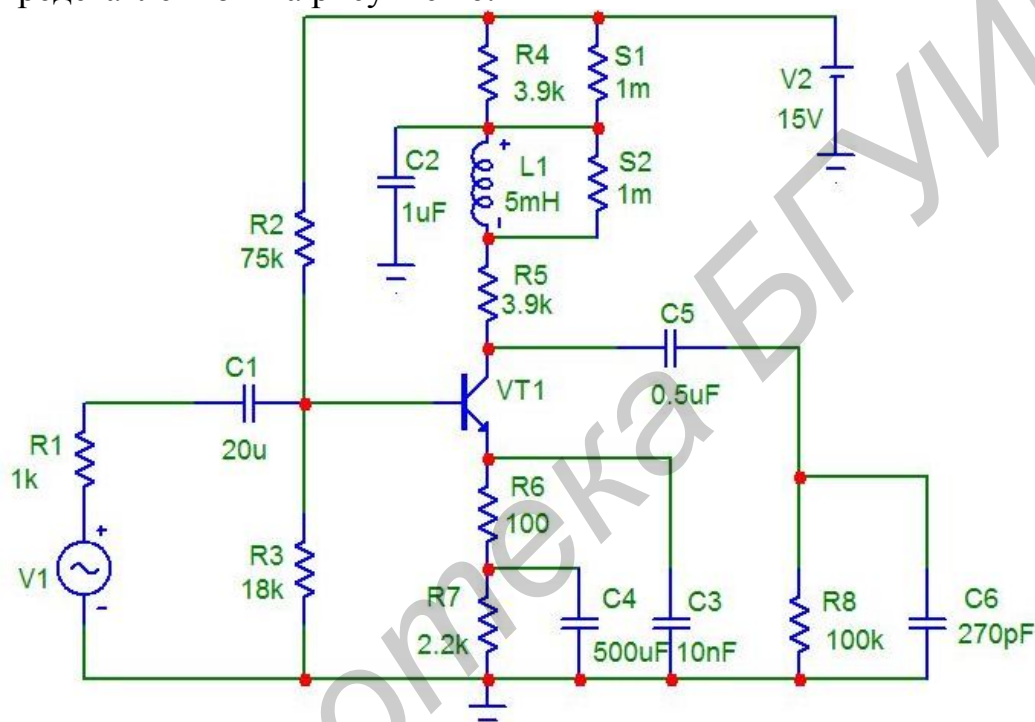



Рисунок 26 – Схема лабораторного макета

По команде *Analysis (Анализ) > Dynamic DC (Расчет по постоянному току...)* или *нажатием Alt+4* производится расчет режима по постоянному току и его отображение на чертеже схемы.

3 С помощью пиктограммы  измерьте постоянные напряжения в контрольных точках.

4 С помощью пиктограмм  и  измерьте фактические токи и мощность транзисторов.

5 При помощи команды *Analysis (Анализ) > Transient (Переходные процессы)* или *нажатием Alt+1* перейдем в режим для снятия АХ при частоте $f = 1$ кГц (частота задается в источнике синусоидального напряжения) каскада с ООС и без ООС (убрав C3 из схемы).

На экране отобразится перечень пределов анализа передаточной характеристики по постоянному току (рисунок 27).

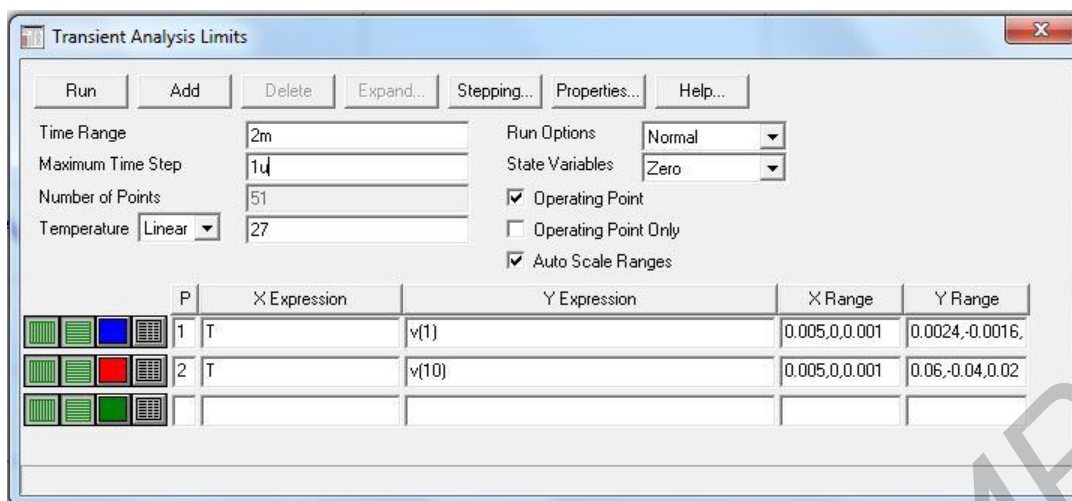


Рисунок 27 – Задание параметров расчета переходных процессов

Следуя полученным теоретическим сведениям, подберите параметры элементов схемы и пределов исследования так, как показано на рисунке 28, чтобы получить амплитудную характеристику, изображенную на рисунке 29. Выбираем диапазон до тех пор, пока характеристика не будет усечена.

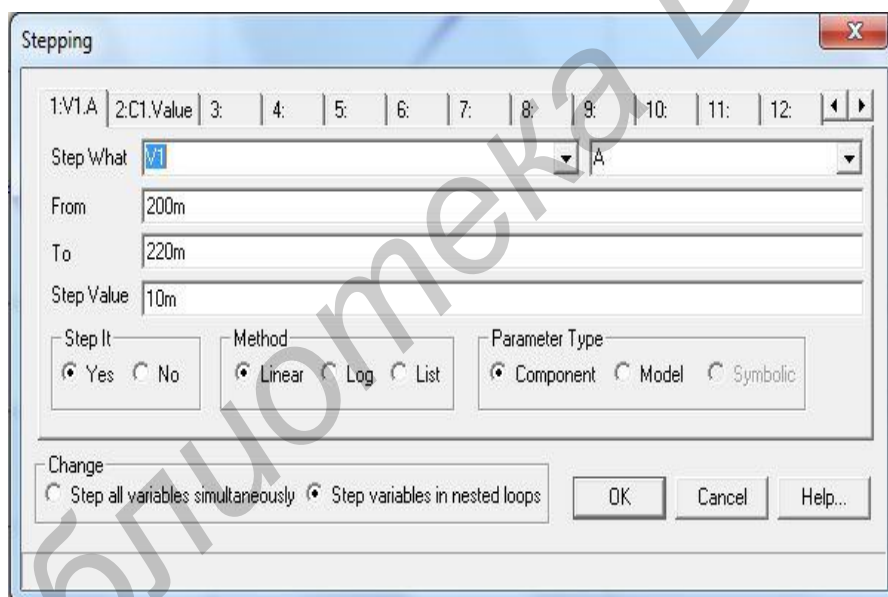


Рисунок 28 – Stepping (По шагам)

Снимите полученные данные ($U_{вых\ min}$, $U_{вых\ max}$, $I_{вх\ min}$, $I_{вх\ max}$) на границах перехода прямолинейного участка на полученной амплитудной характеристике (рисунок 30).

Повторите без ООС, убрав С3 из схемы.

6 Получив данные из пункта 6, найдем $R_{вх}$ и $R_{вых}$ по формулам (4), (5) с ООС и без ООС:

$$R_{вх} = U_{вх} \cdot R / (E - U_{вх}), \quad (4)$$

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}, \quad (5)$$

где $\Delta U_{вых} = U_{вых1} - U_{вых2}$, $\Delta I_{вых} = I_{вых1} - I_{вых2}$, $I_{вых1} = U_{вых1} / R_{н1}$, $I_{вых2} = U_{вых2} / R_{н2}$, ($R_{н1}$, $R_{н2}$ – сопротивления R_9 и R_{10}).

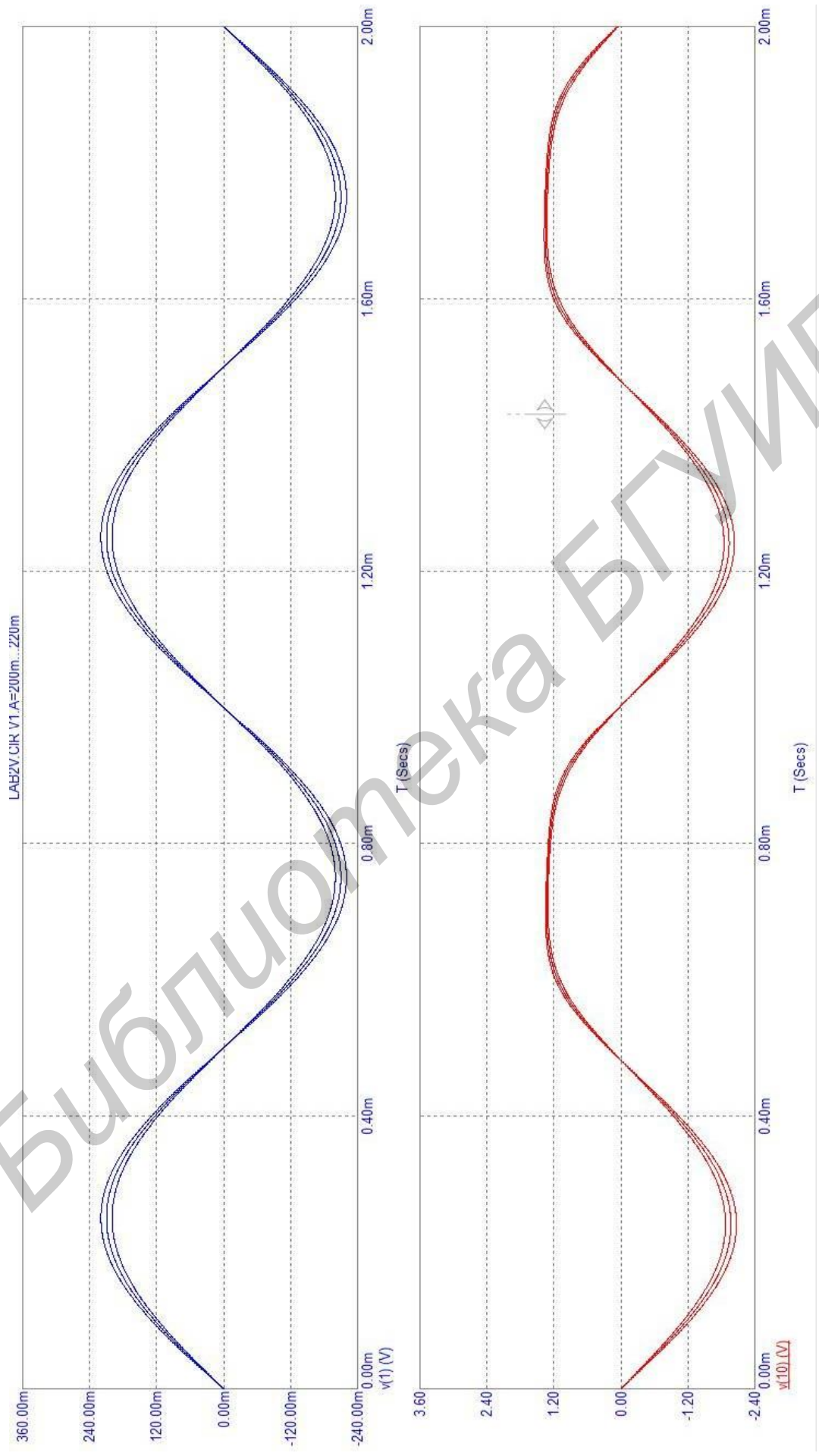


Рисунок 29 – Амплитудная характеристика

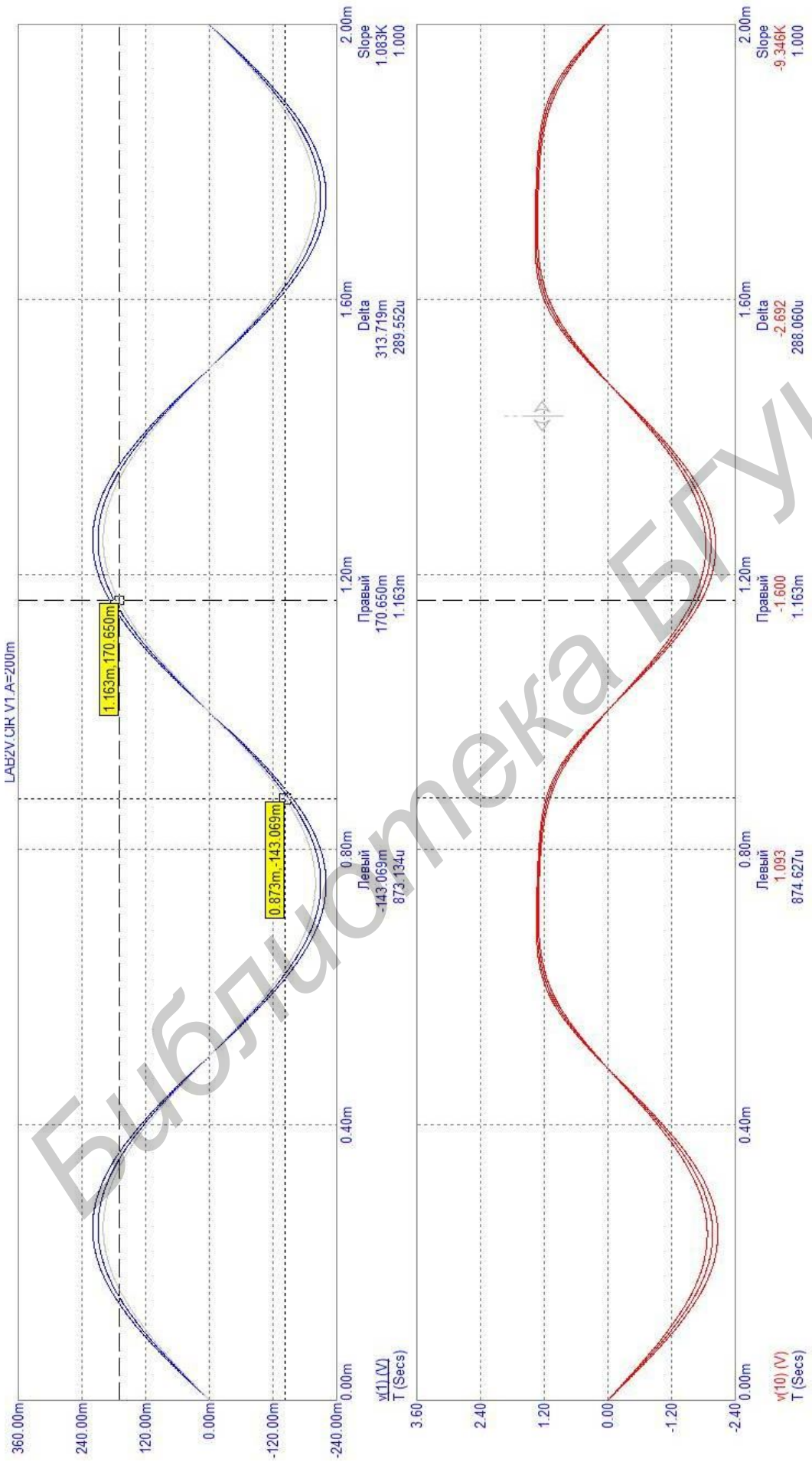


Рисунок 30 – Снятие характеристик

7 При помощи команды *Analysis(Анализ)> АС (Частотные характеристики)* или нажатием *Alt+2* снять АЧХ каскада без ООС при $R_n = R_8 = 2 \text{ кОм}$, оценить влияние величины разделительной емкости ($C_5 = 0,5 \mu$ или $C_5 = 1 \mu$) и емкости нагрузки $C_n = C_6$. В ячейке **Noise Input (Входной источник)** выбрать *V1* (источник синусоидального напряжения). После чего нажимаем *Stepping (По шагам)*, указываем *Step What (Какой шаг)* выбираем *R8* и задаем параметры *From = 2k*, *To(K) = 100k*, *Step Value (Шаг) = 98k* (рисунок 31).

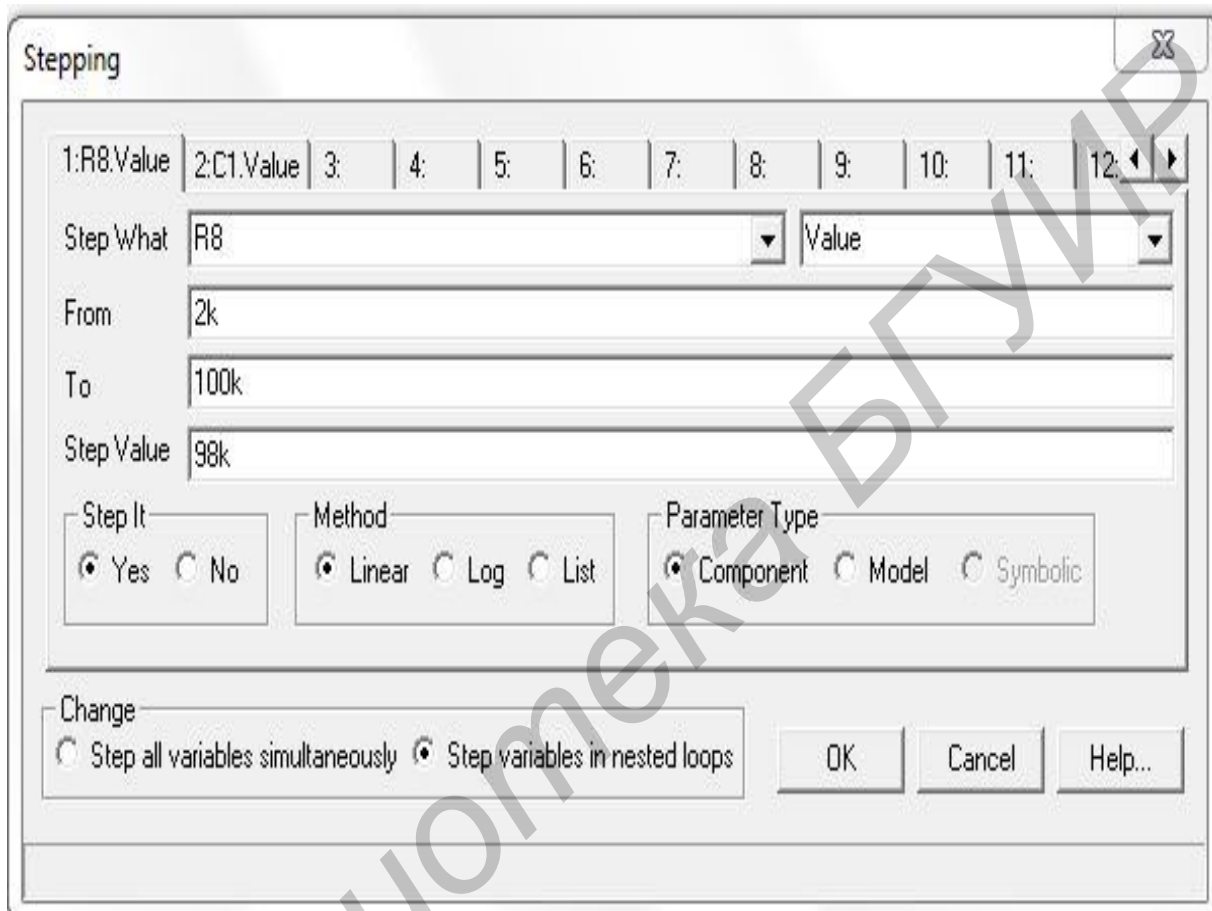


Рисунок 31 – Stepping (По шагам)

Нажимаем *OK* и пиктограмму , после чего строится АЧХ нашей схемы (рисунок 32).

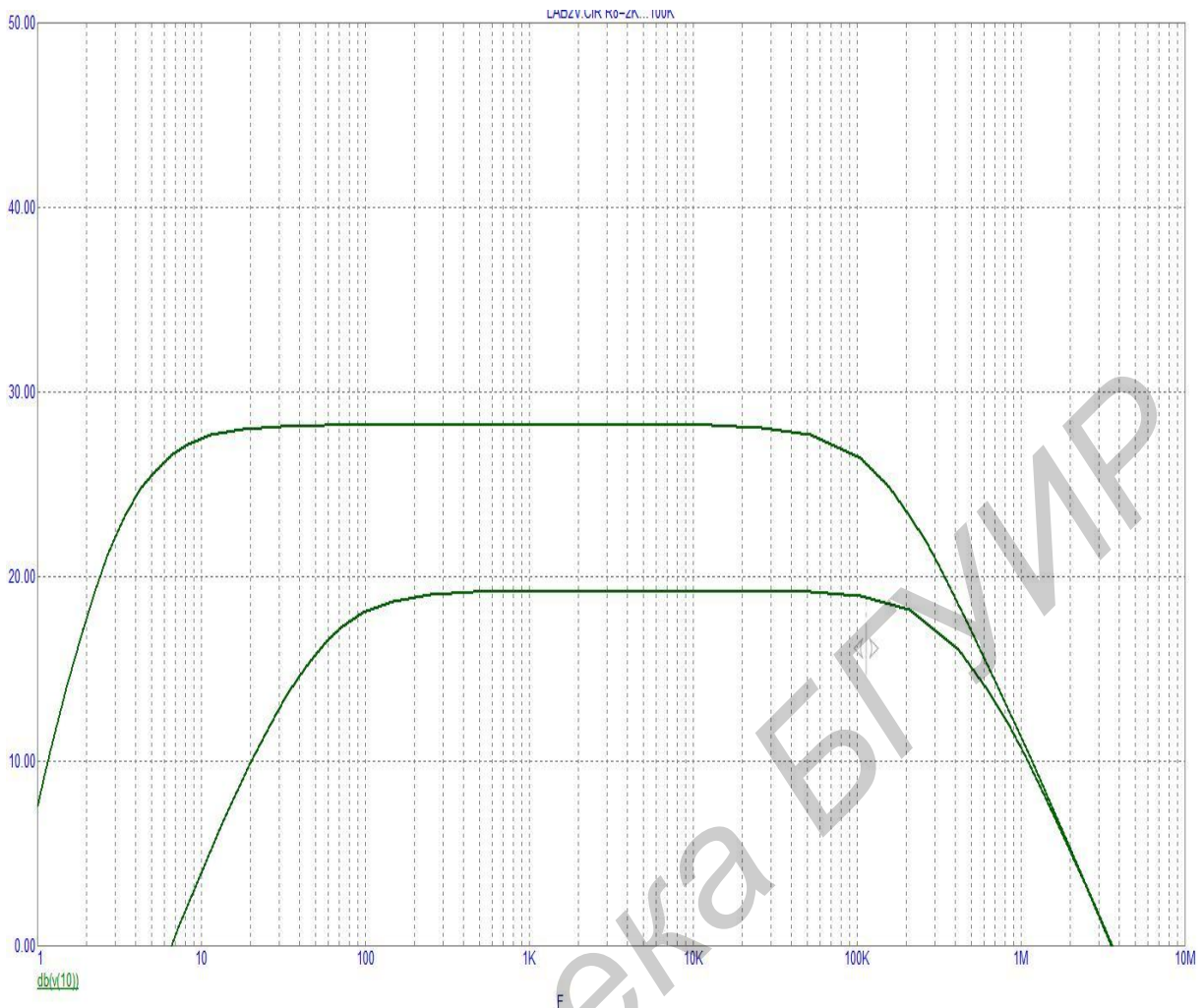





Рисунок 32 – Амплитудно-частотная характеристика

После чего снимаем характеристики. Для смены характеристик будем использовать пиктограммы . Вначале найдем пик коэффициента усиления K с помощью пиктограммы . Появится результат [частота/коэф. усил.].

Далее находим нижнюю (f_n) и верхнюю (f_v) границу частотного диапазона. При нажатии на пиктограмму  появится окно (рисунок 33), где в поле **Value (Значение)** вводим выражение [полученный пик $K \times 0.707$] (из выражения $K_0/\sqrt{2}$).

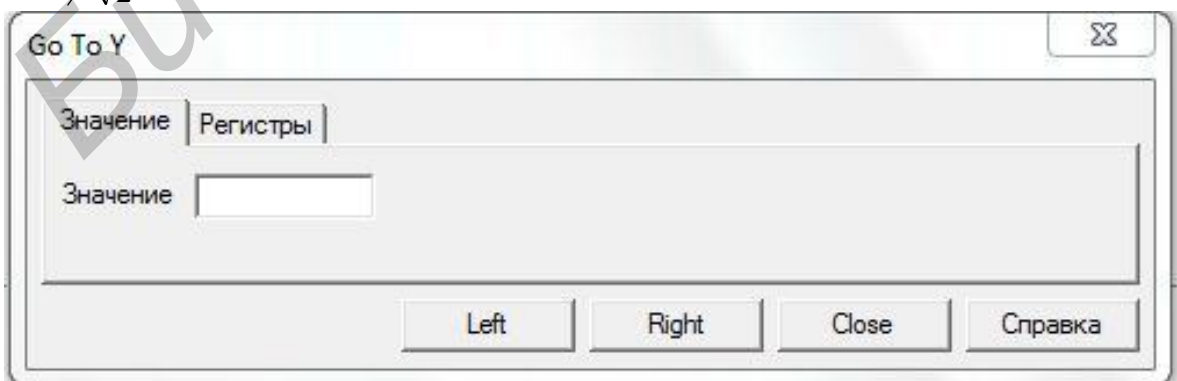



Рисунок 33 – Окно перехода к значению

После чего нажимаем кнопки **Left**, **Right**, точки снятия данных станут в нужное нам положение (если правая точка стала на место левой, то ее переместите курсором мыши противоположно левой точке). После чего можем снять (f_n) и (f_v) (рисунок 34).

Нажав на , повторим для $R8 = 100$ кОм и сделаем оценку влияния величины разделительной емкости $C5$ и емкости нагрузки $C6$.

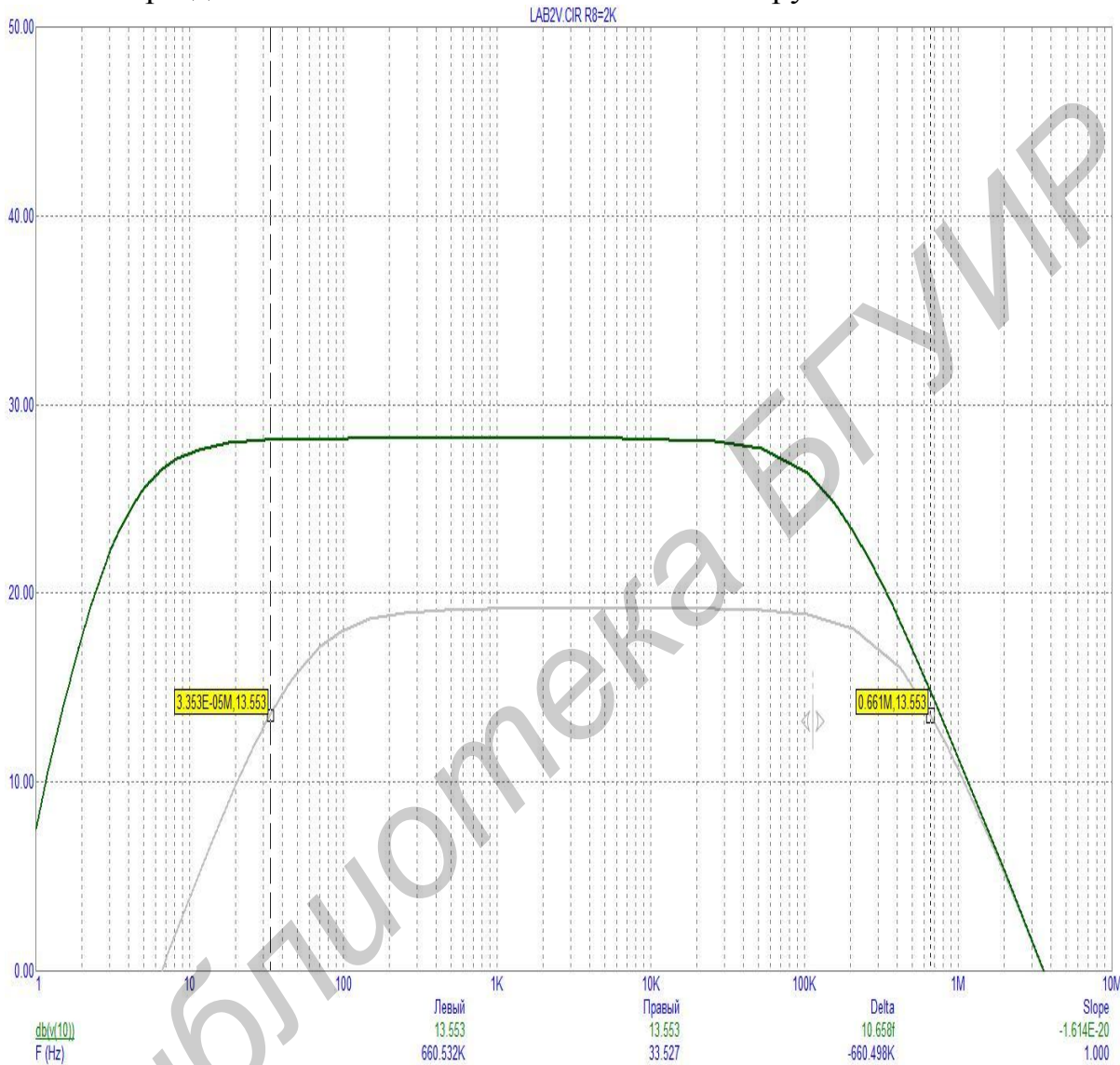


Рисунок 34 – Снятие нижней (f_n) и верхней (f_v) границ частотного диапазона

По данному принципу снятия АЧХ проведем пункты 9–11.

8 Измерить АЧХ каскада с ООС. Оценить изменение АЧХ при введении эмиттерной ВЧ-коррекции. Оставляем схему, представленную на рисунке 26, и проводим измерение АЧХ. Получим новый вид (рисунок 35) и измерим параметры (рисунок 36).

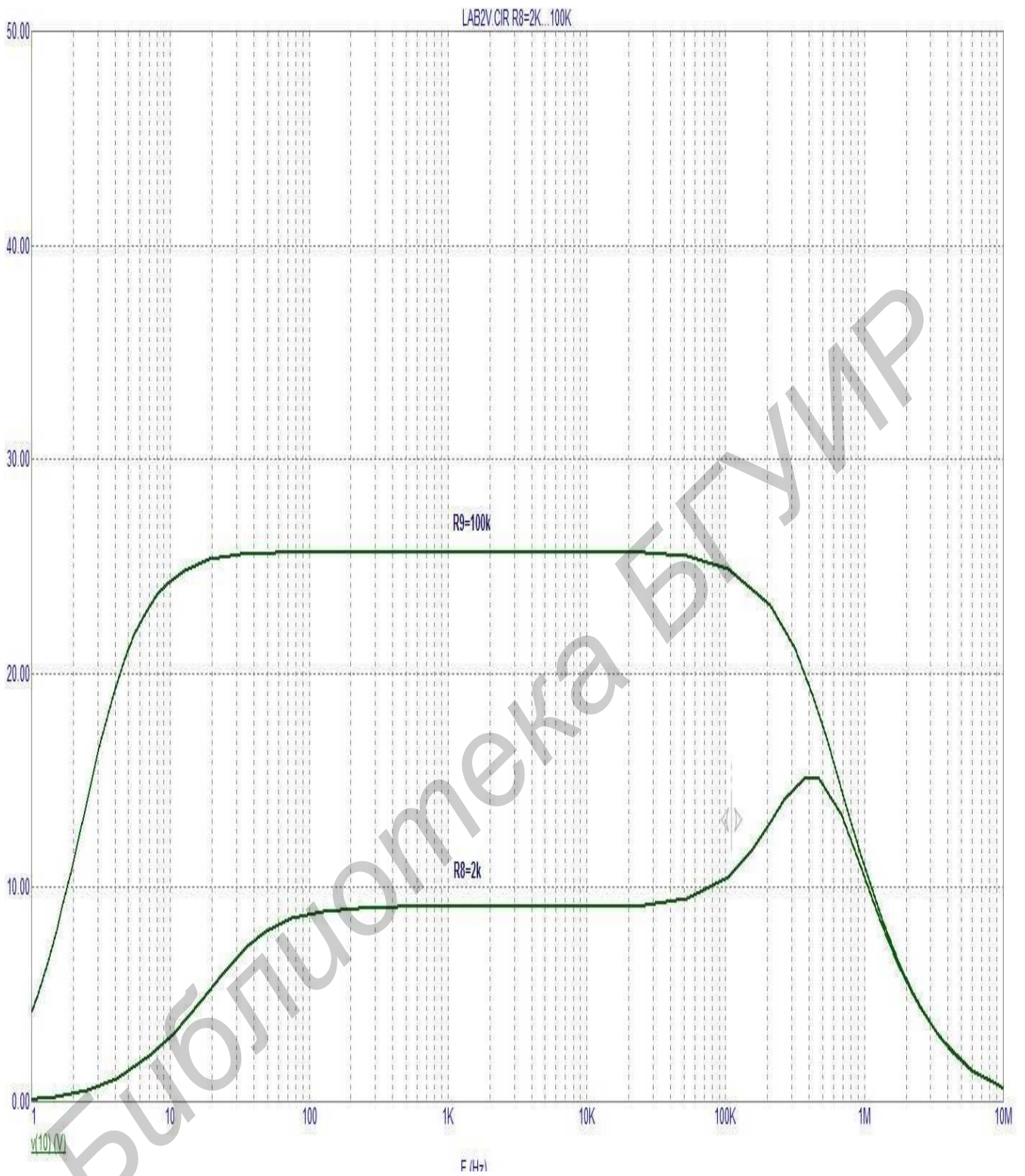


Рисунок 35 – Амплитудно-частотная характеристика

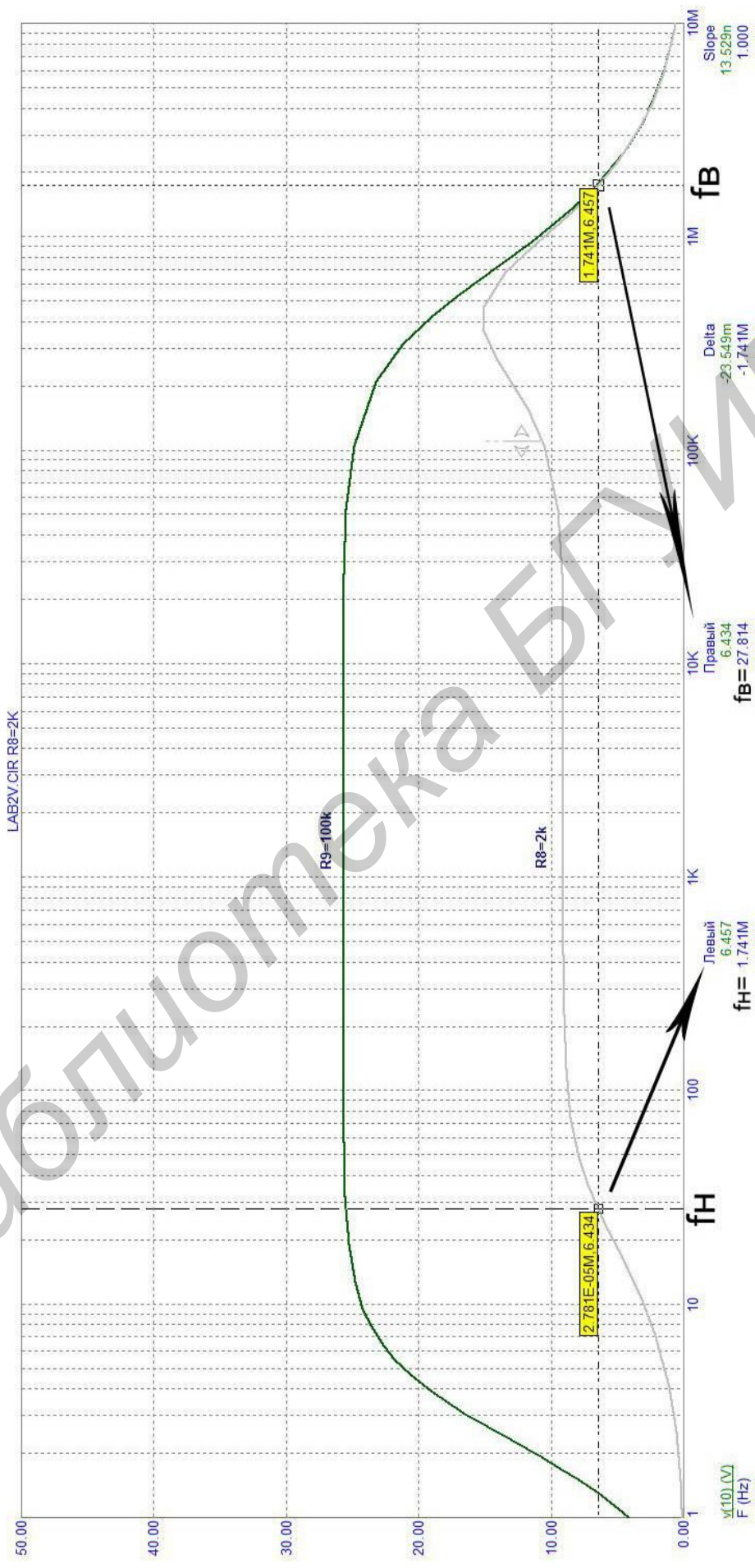


Рисунок 36 – Снятие нижней (f_H) и верхней (f_B) границы частотного диапазона

9 Снять АЧХ каскада с индуцированной ВЧ-коррекцией при условии $R8 = 100k$. Для удобства измерений $C3 = 1p$ и $S2 = 1000k$. В **Stepping (По шагам)** указываем *Step What (Какой шаг)*, выбираем $S2$ и задаем параметры $From = 1m$, $To(K) = 1000k$, $Step Value (Шаг) = 1000k$ (рисунок 37).

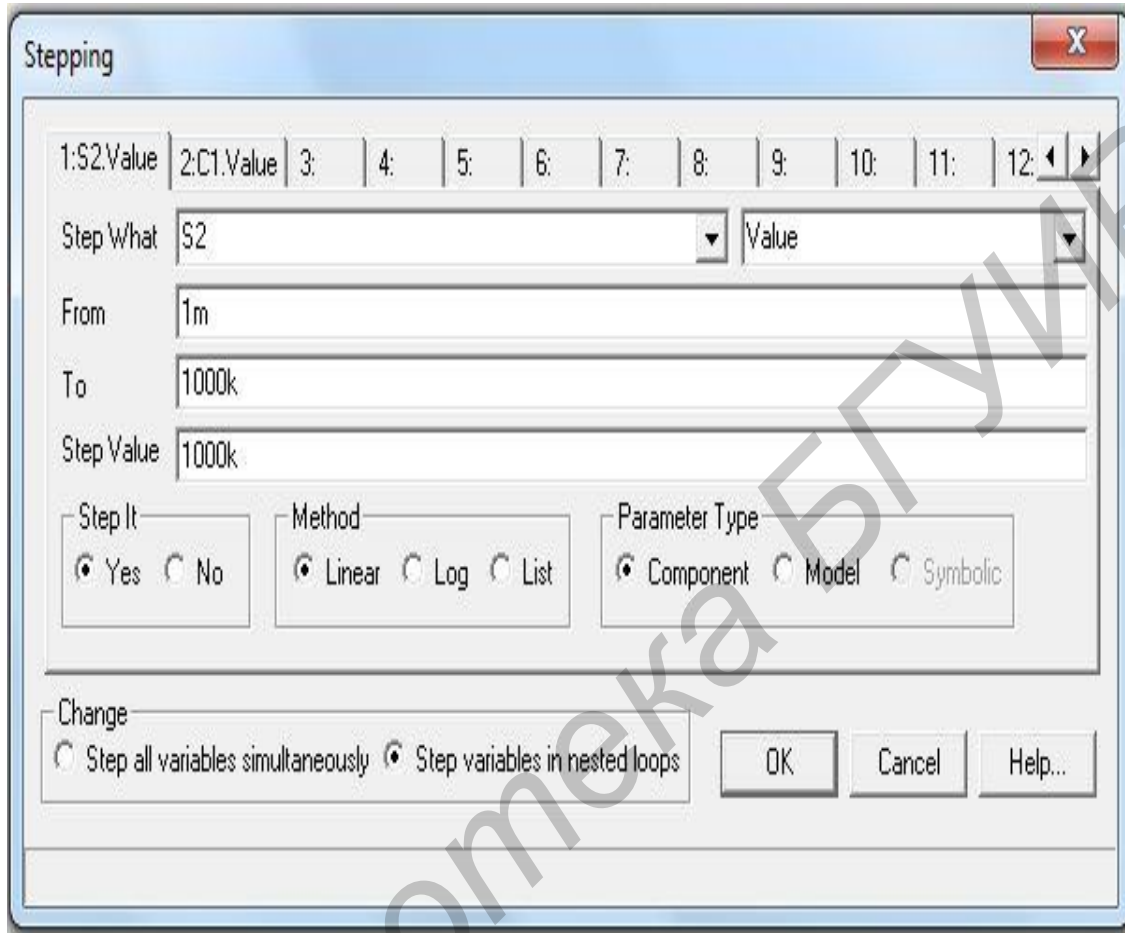


Рисунок 37 – Stepping (По шагам)

Нажимаем ОК и пиктограмму , после чего строится АЧХ нашей схемы, снимаем с нее данные (рисунок 38).

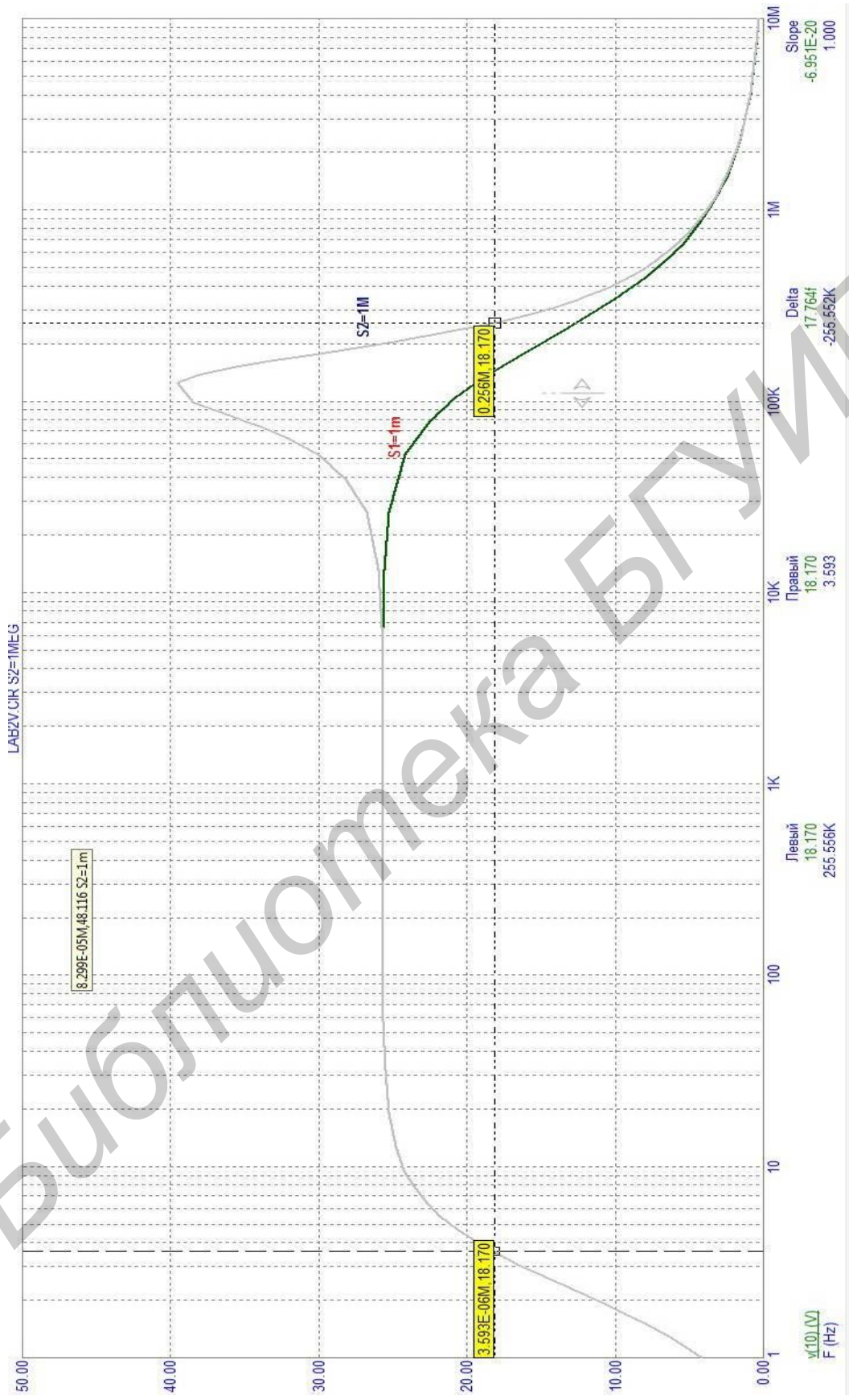


Рисунок 38 – Снятие амплитудно-частотной характеристики

10 Снять АЧХ каскада с введенной цепью НЧ-коррекции при условии $C5 = 0,5\mu$, $R8 = 100k$, $S1 = 1m$ и $S2 = 1m$.

Для этого нужно изменить параметры ключа $S1$, который отвечает за НЧ-коррекцию, таким образом, как показано на рисунке ниже (рисунок 39).

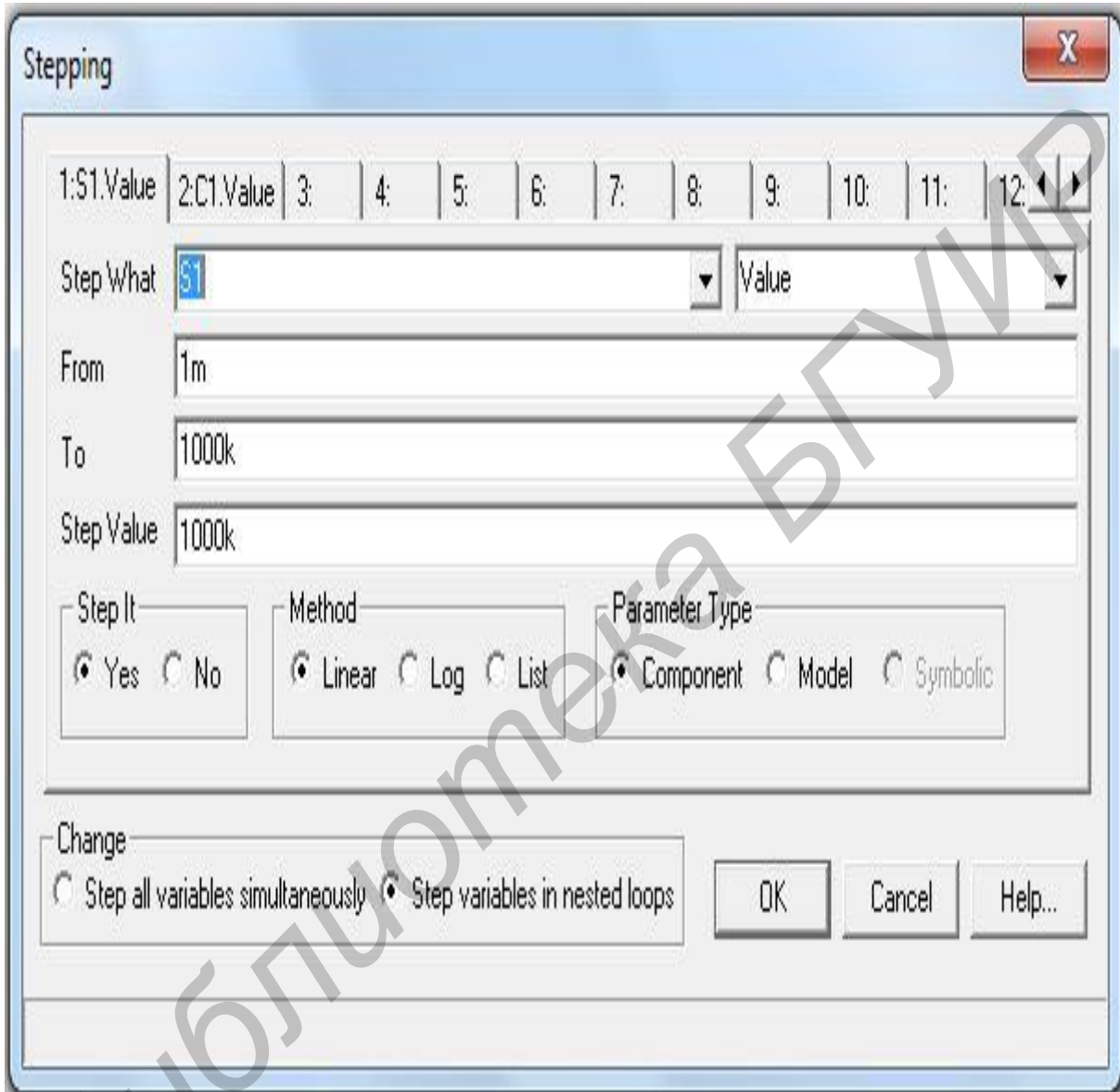


Рисунок 39 – Stepping (По шагам)

После занесения данных в программу выполняем построение графиков следующего вида (рисунок 40), где и снимаем данные.

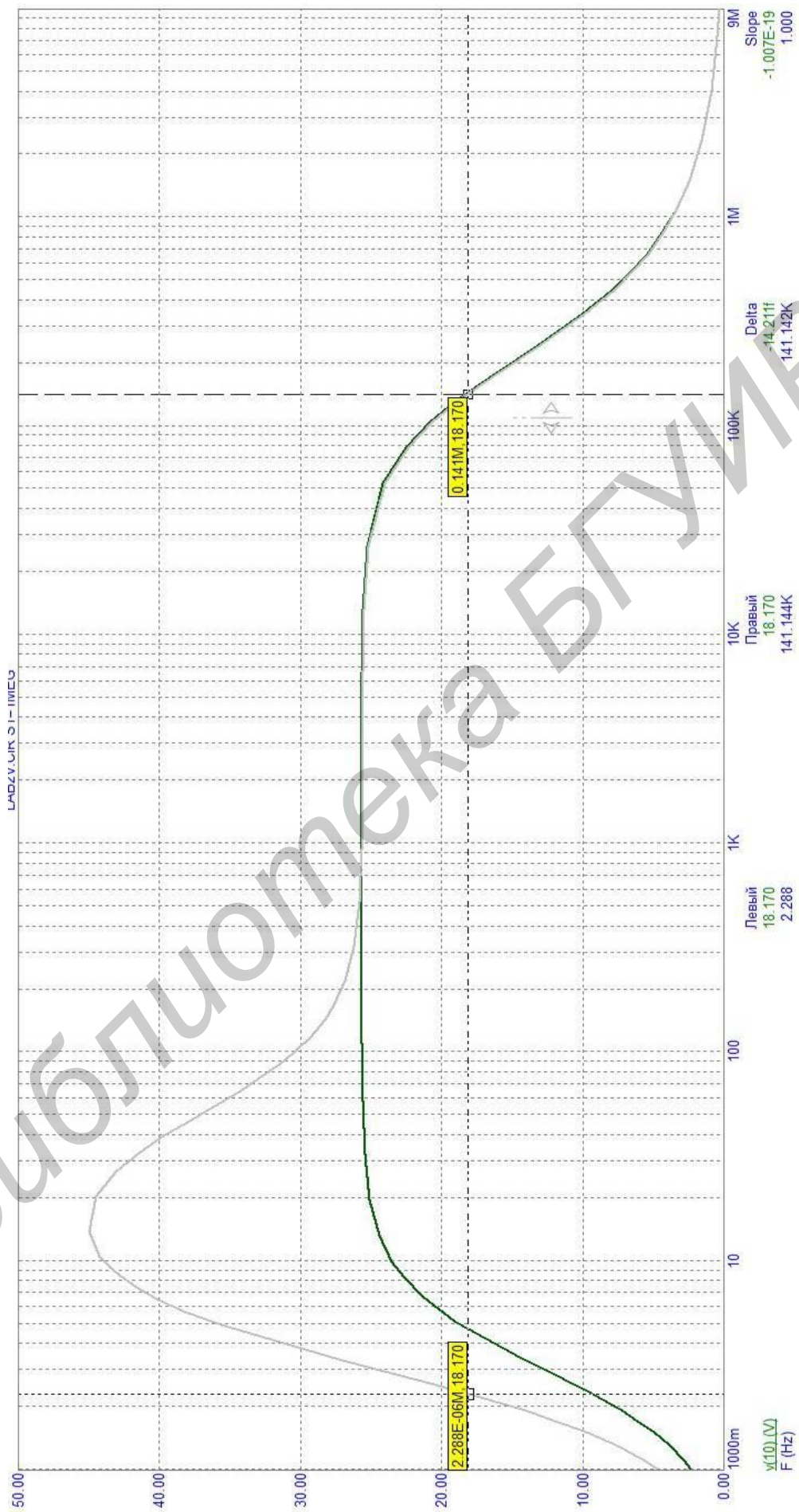


Рисунок 40 – Снятие амплитудно-частотной характеристики

11 Заменить источник синусоидального напряжения на источник прямоугольных импульсов.

Ставим параметры, приведенные на рисунке 41.

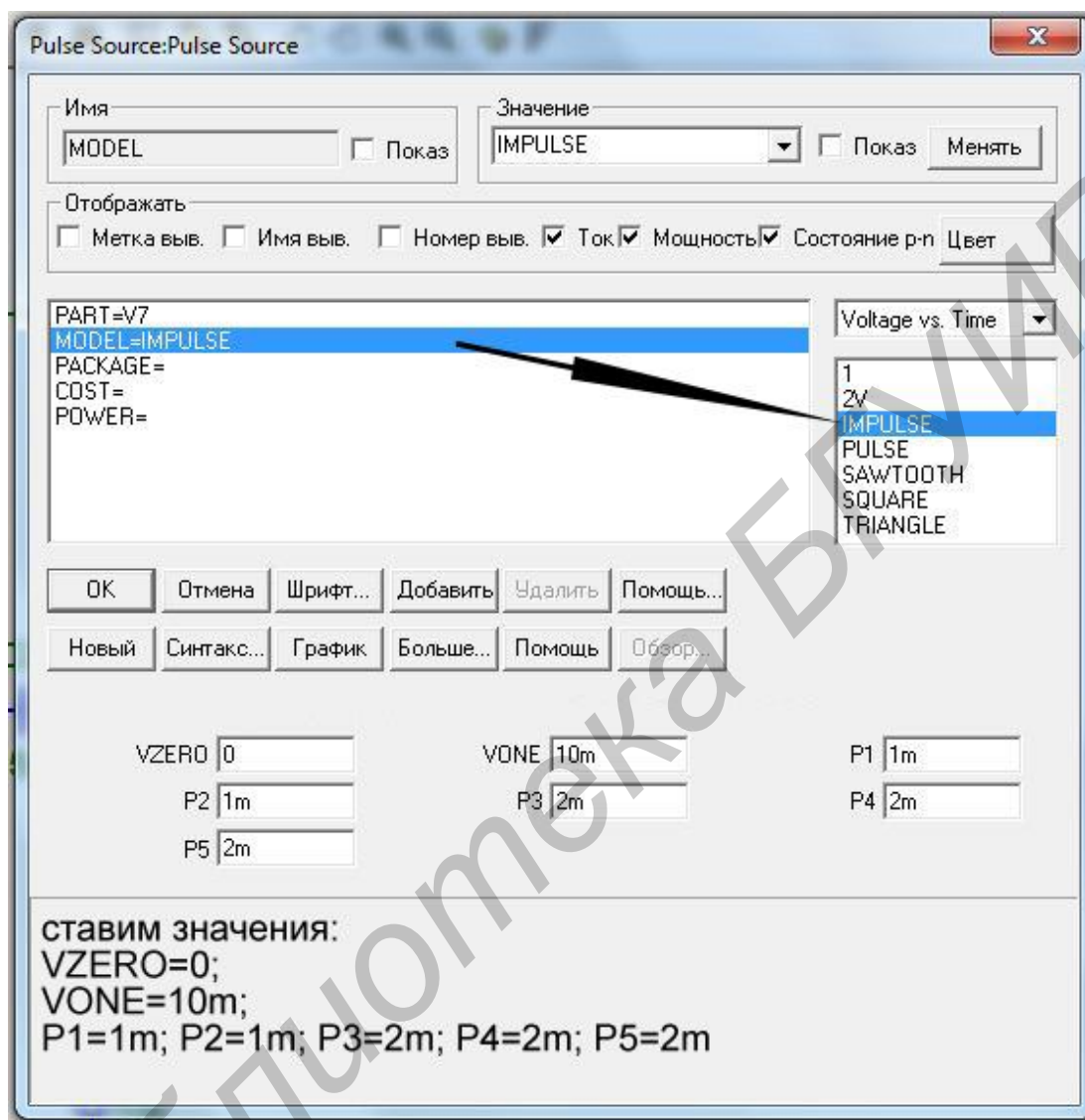


Рисунок 41 – Параметры источника прямоугольных импульсов

12 При помощи команды *Analysis(Анализ) > Transient (Переходные процессы)* или нажатием *Alt+I* перейдем в режим для снятия переходных характеристик при длительности $t_u = 1$ мс.

Нажав *Stepping (По шагам)*, указываем *Step What (Какой шаг)*, выбираем *R8* и задаем параметры *From = 2k*, *To(K) = 100k*, *Step Value (Шаг) = 98k* (рисунок 42).

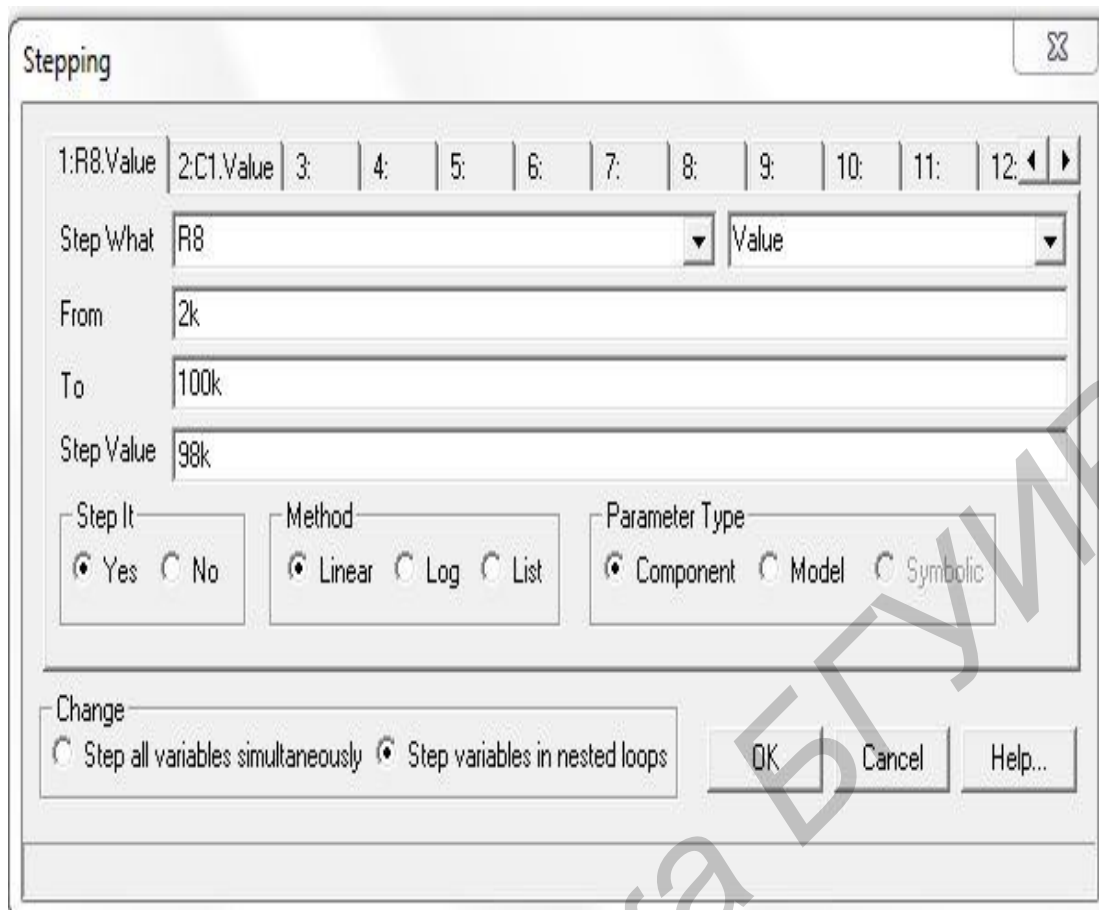


Рисунок 42 – Stepping (По шагам)

Нажимаем ОК и пиктограмму , после чего строится переходная характеристика нашей схемы (рисунок 43).

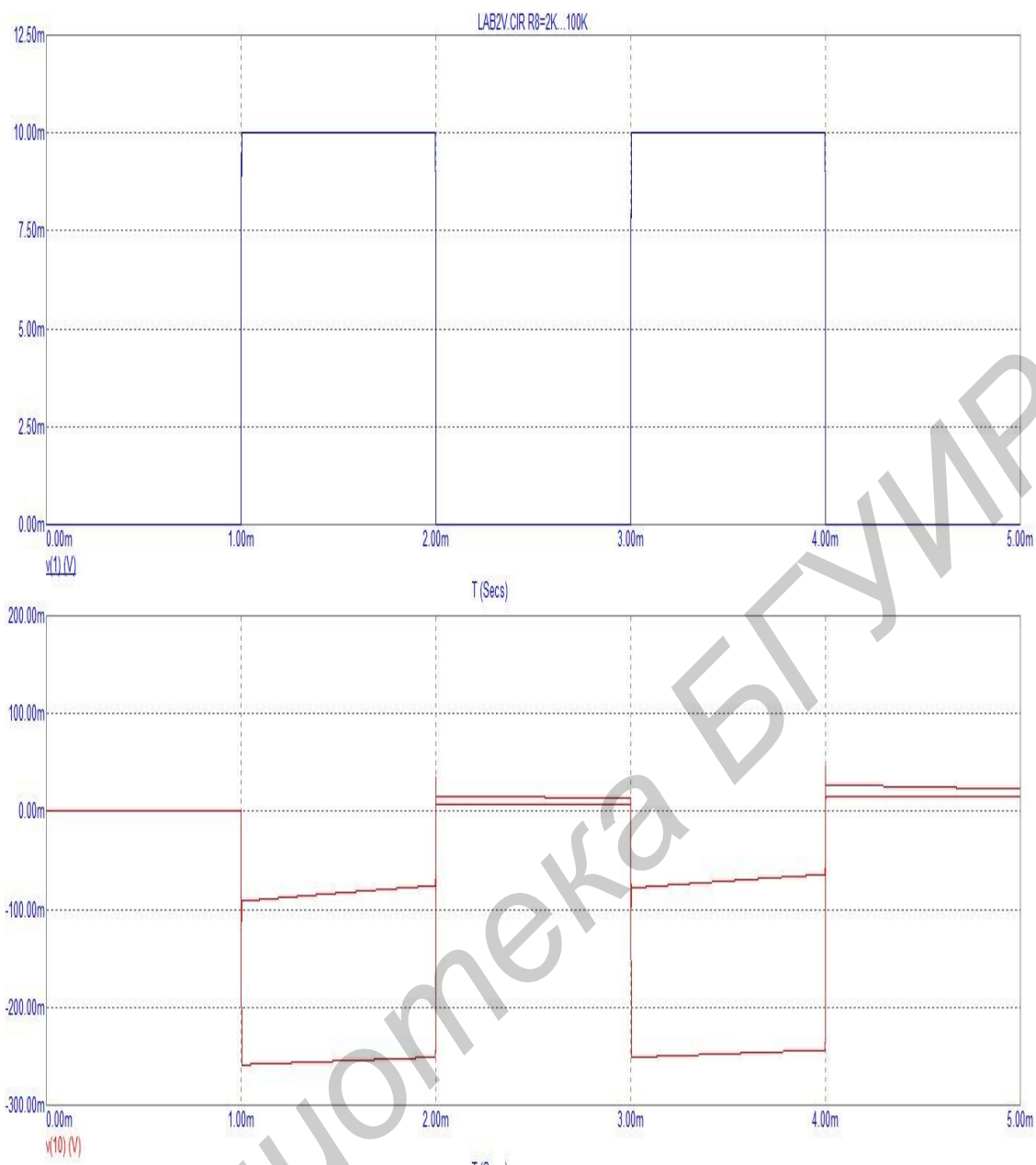



Рисунок 43 – Переходная характеристика

Нажав правую кнопку мыши, выделяем область, которую надо исследовать. После чего она увеличивается для простоты измерений. С помощью пиктограммы  можем с легкостью измерить расхождение графиков, как приведено на рисунке 44, проведя курсором (*сверху вниз*) по области измерения.

13 Сняв нужные нам данные, рассчитать относительный спад вершины ($\Delta\%$), время установления (t_y), выброс фронта ($\delta_\phi\%$) по формулам (6)–(8):

$$\Delta\% = 2\pi f_H t_H 100 \%, \quad (6)$$

$$t_y = 0,35/f_B, \quad (7)$$

$$\delta_\phi\% = \frac{\Delta U_\phi}{U_{уст}} \cdot 100 \%. \quad (8)$$

14 Сформулируйте вывод и оформите отчет по лабораторной работе.

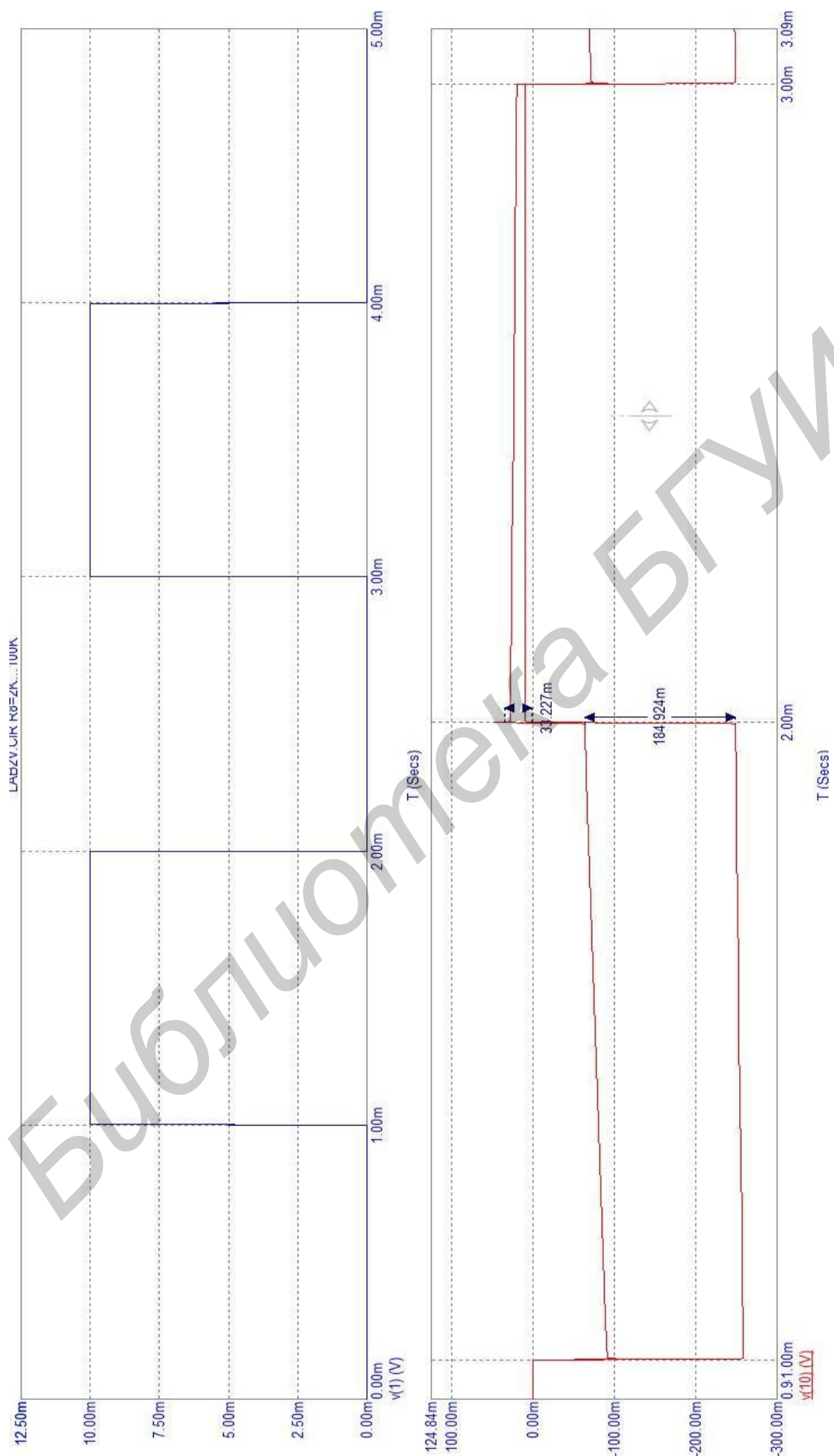


Рисунок 44 – Пример снятия характеристик

Лабораторная работа №3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО И ИСТОКОВОГО ПОВТОРИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MICROCAP

Цель работы – изучить основные параметры эмиттерного и истокового повторителей с помощью пакета MicroCap. Сравнить теоретические данные с данными, полученными на практике.

Выполнение работы

1 Исследование эмиттерного повторителя.

1.1 Загрузите пакет MicroCap.

1.2 Используя пакет MicroCap, создать или открыть схему эмиттерного повторителя (рисунок 45), V2=+12 В, VT1-KT312B_. Источник напряжения взять с *Component> Analog Primitives> Waveform Sources> Sine Source*. Параметры источника синусоидального напряжения установить по рисунку 45.

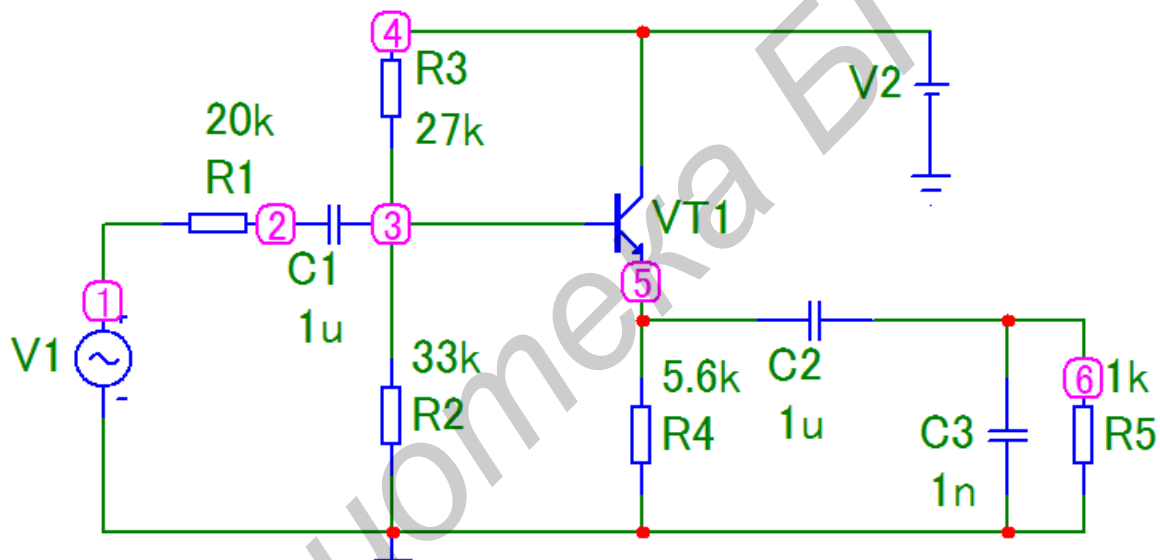


Рисунок 45 – Эмиттерный повторитель

1.3 Снять амплитудную характеристику *Analysis (Анализ) > Transient Analysis (Переходные процессы)* эмиттерного повторителя на частоте $f=1$ кГц. Обязательно поставьте галочку напротив надписи **Автомасштаб**. В скобках $V()$ ставим точку, в которой будут просматриваться характеристики (см. рисунок 45). В диалоговом окне установите следующие параметры, показанные на рисунках 46 и 47.

Далее идем к вкладке **По шагам** и настраиваем амплитуду входного синусоидального сигнала (рисунок 48). Обязательно сделайте отметку напротив слова «Да» в графе **Шаг это**. Напряжение следует подобрать так, чтобы можно было оценить напряжения, при которых начинаются искажения выходного сигнала (рисунок 49) (верхний график – входные импульсы, нижний – импульсы на выходе).

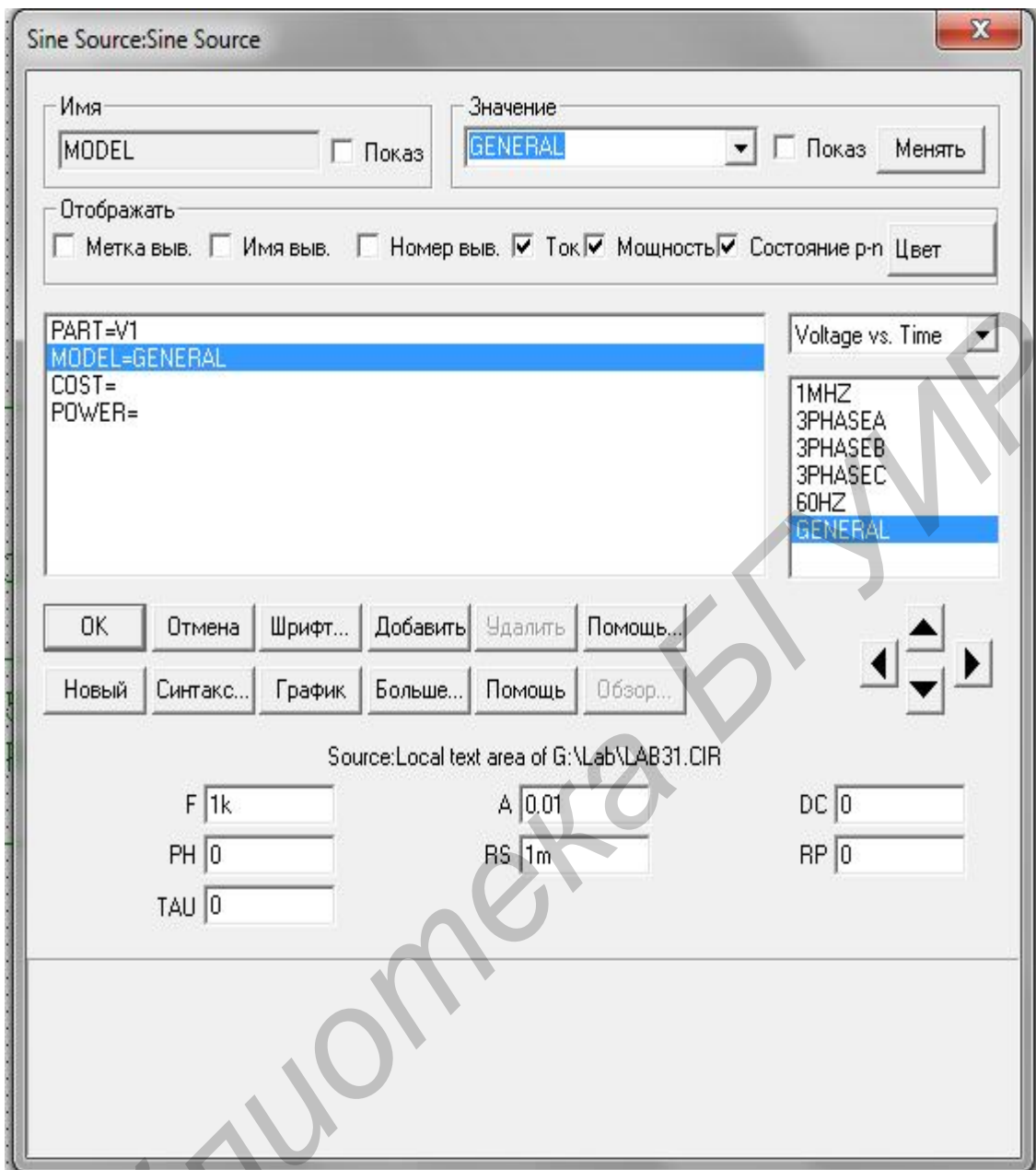


Рисунок 46 – Настройка источника синусоидального напряжения

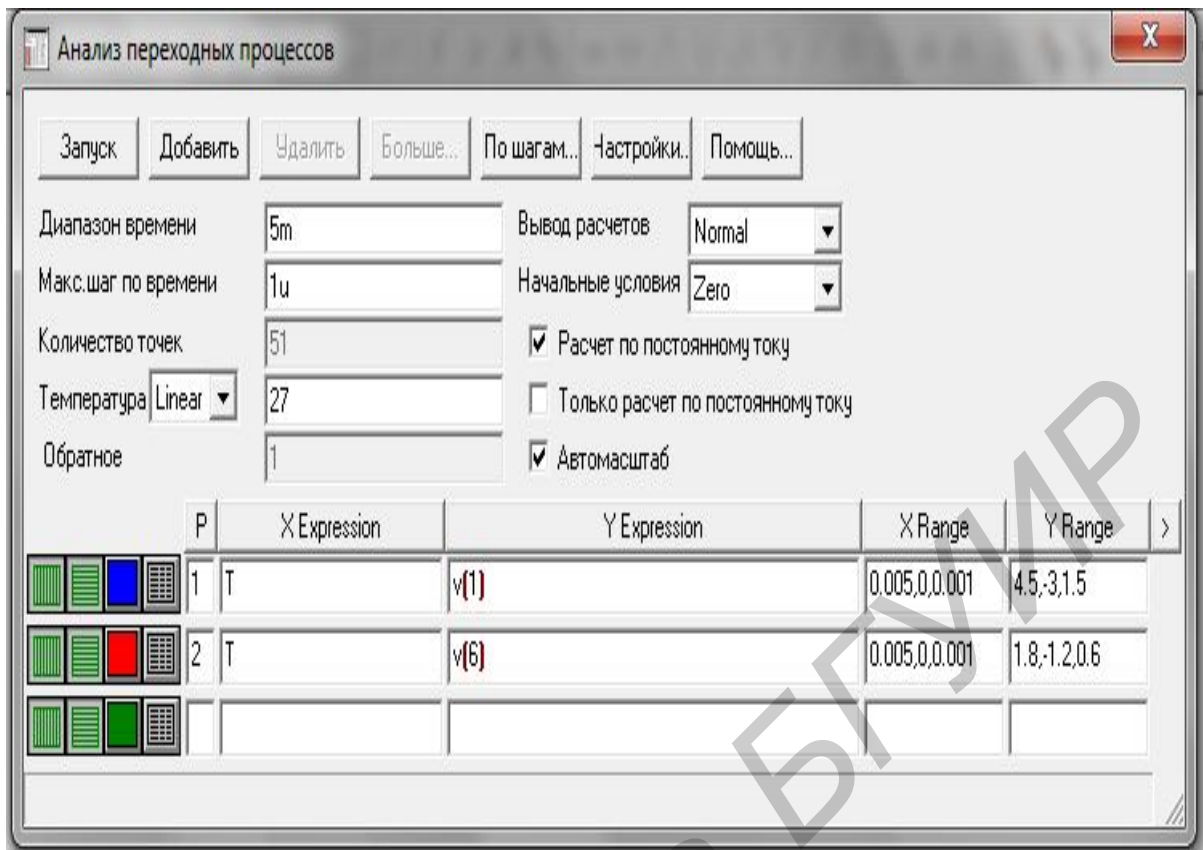


Рисунок 47 – Снятие АХ

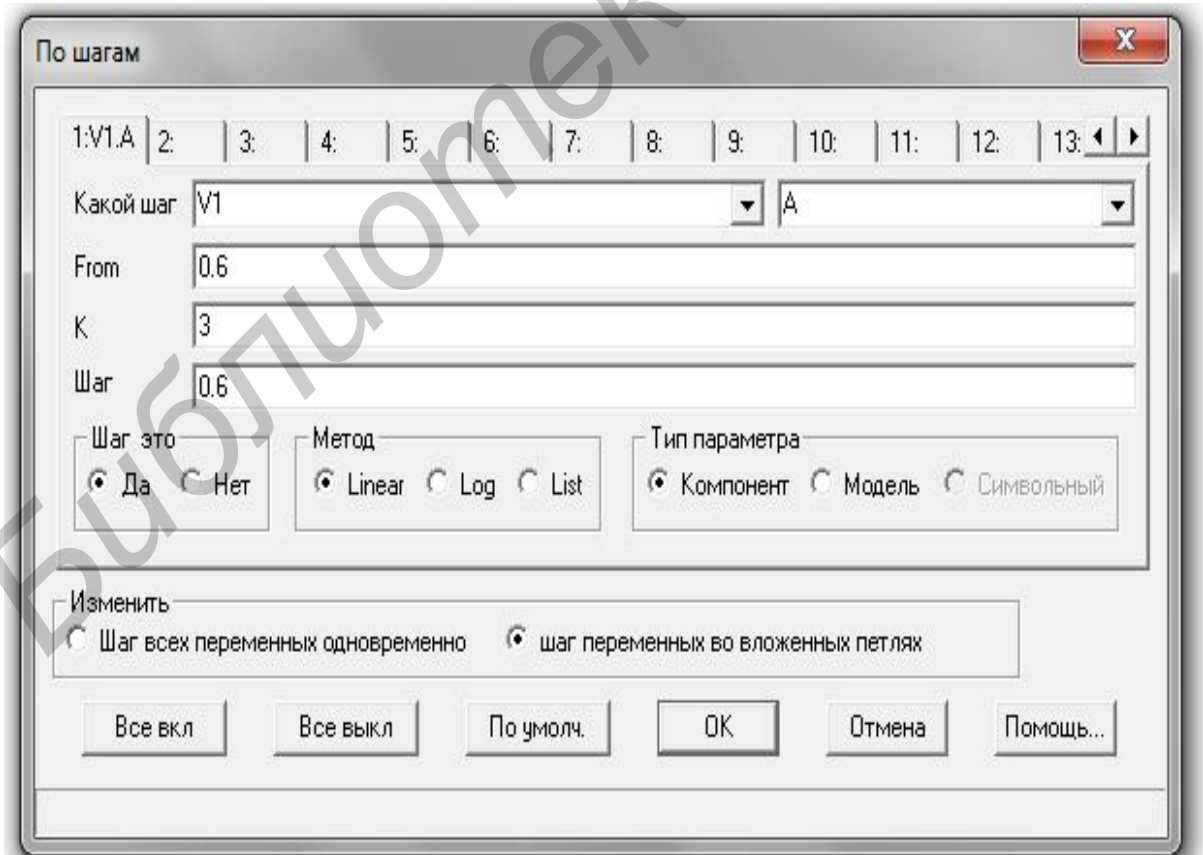


Рисунок 48 – Установка переменных параметров АХ

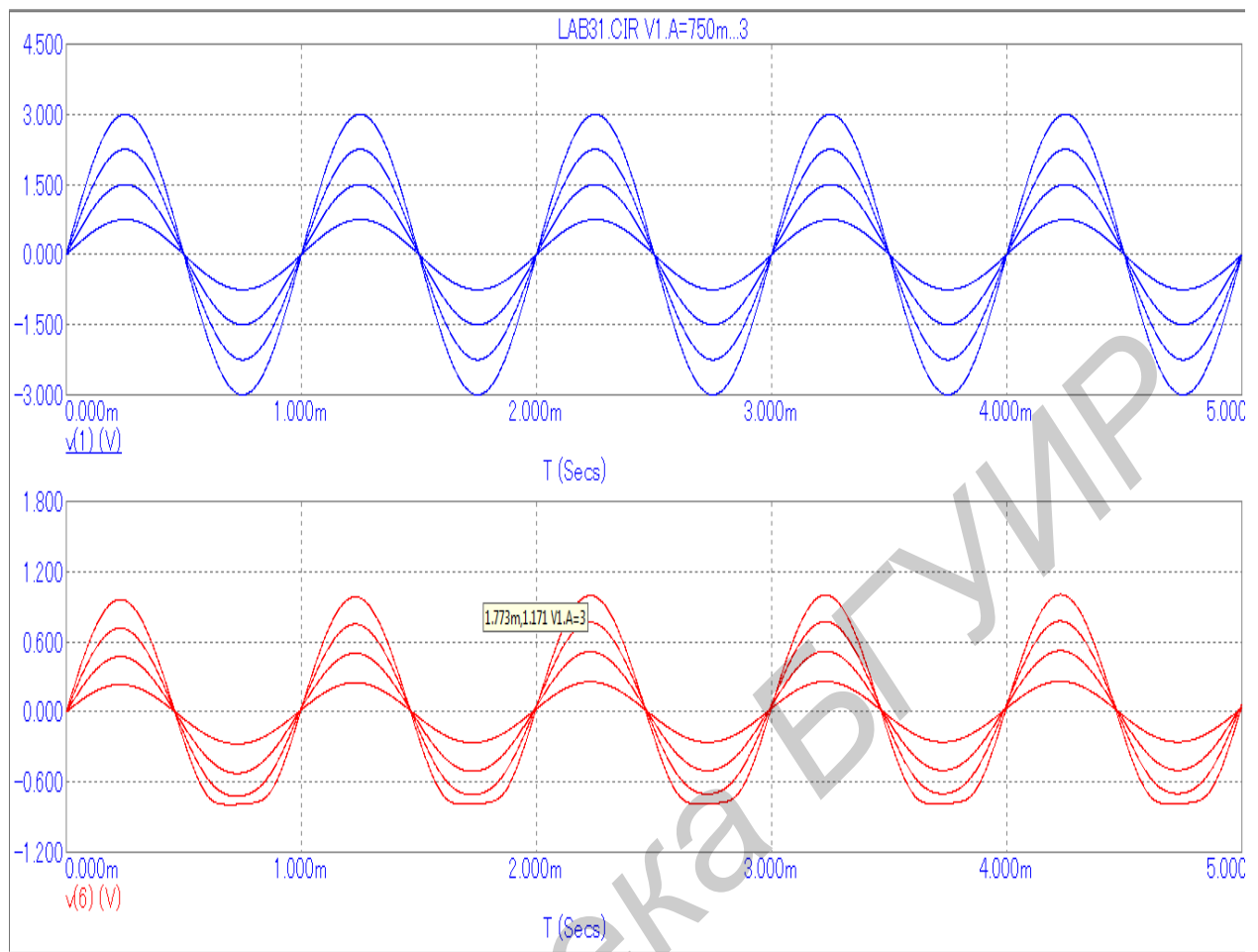


Рисунок 49 – АХ эмиттерного повторителя

1.4 Снять сквозную АЧХ повторителя при $R_r = R_1 = 300$ Ом для значений нагрузки R_{11} , R_{12} , для чего используем вкладку *Analysis (Анализ) > AC (Частотные характеристики)*. Устанавливаем параметры в диалоговом окне, как показано на рисунке 50. Проверьте правильность установки диапазона частот. Далее в закладке **По шагам** устанавливаем сопротивление резистора R_5 (рисунок 51). В итоге получатся следующие две АЧХ (рисунок 52).

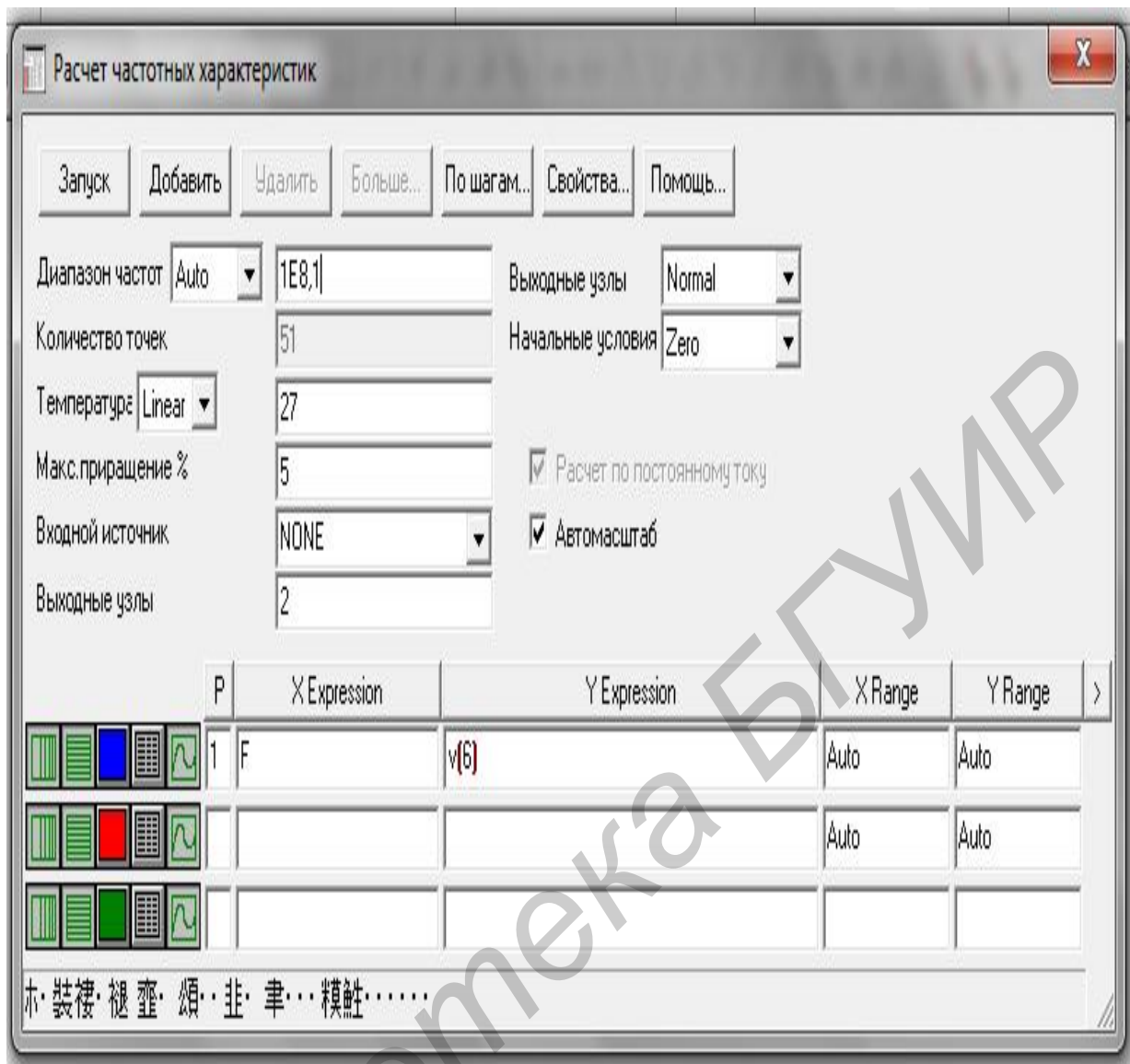


Рисунок 50 – Расчет частотных характеристик



Рисунок 51 – Установка смены сопротивления резистора R5

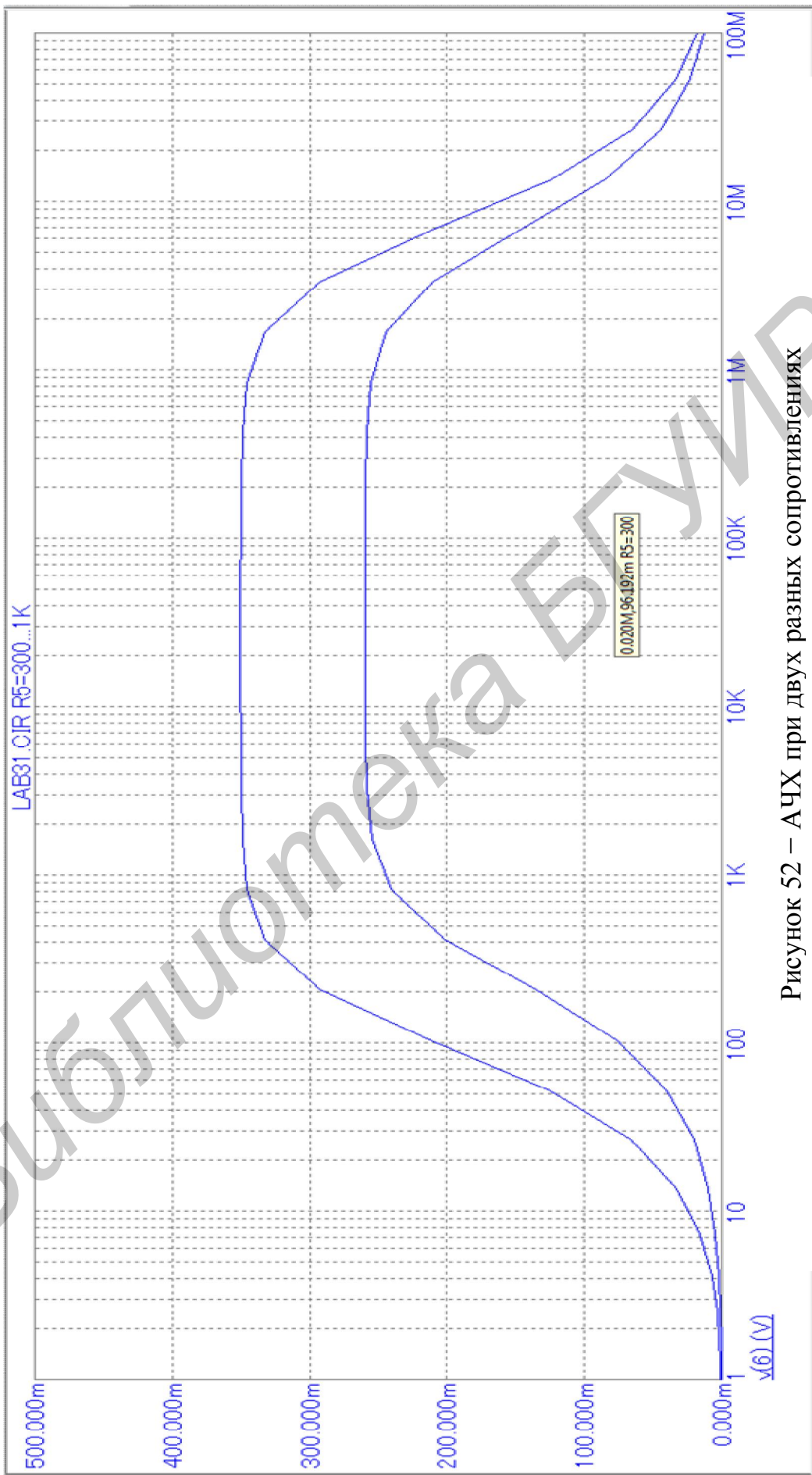


Рисунок 52 – АЧХ при двух разных сопротивлениях

1.5 Снять параметры переходных характеристик t_y , δ_ϕ и Δ при $R_T = R_1 = 300$ Ом для значений нагрузки R_{11} , R_{12} . Для этого заменяем источник синусоидального напряжения на источник прямоугольных импульсов **Component** > **Analog Primitives** > **Waveform Sources** > **Pulse Source**. Параметры источника прямоугольных импульсов устанавливаем в соответствии с рисунком 53. Затем используем вкладку **Analysis (Анализ)** > **Transient Analysis (Анализ переходных процессов)**. В диалоговом окне ставим параметры анализа в соответствии с рисунком 46. Устанавливаем параметры **По шагам** в соответствии с рисунком 51. В итоге получим характеристику, представленную на рисунке 54 (верхний график – входные импульсы, нижний – импульсы на выходе).

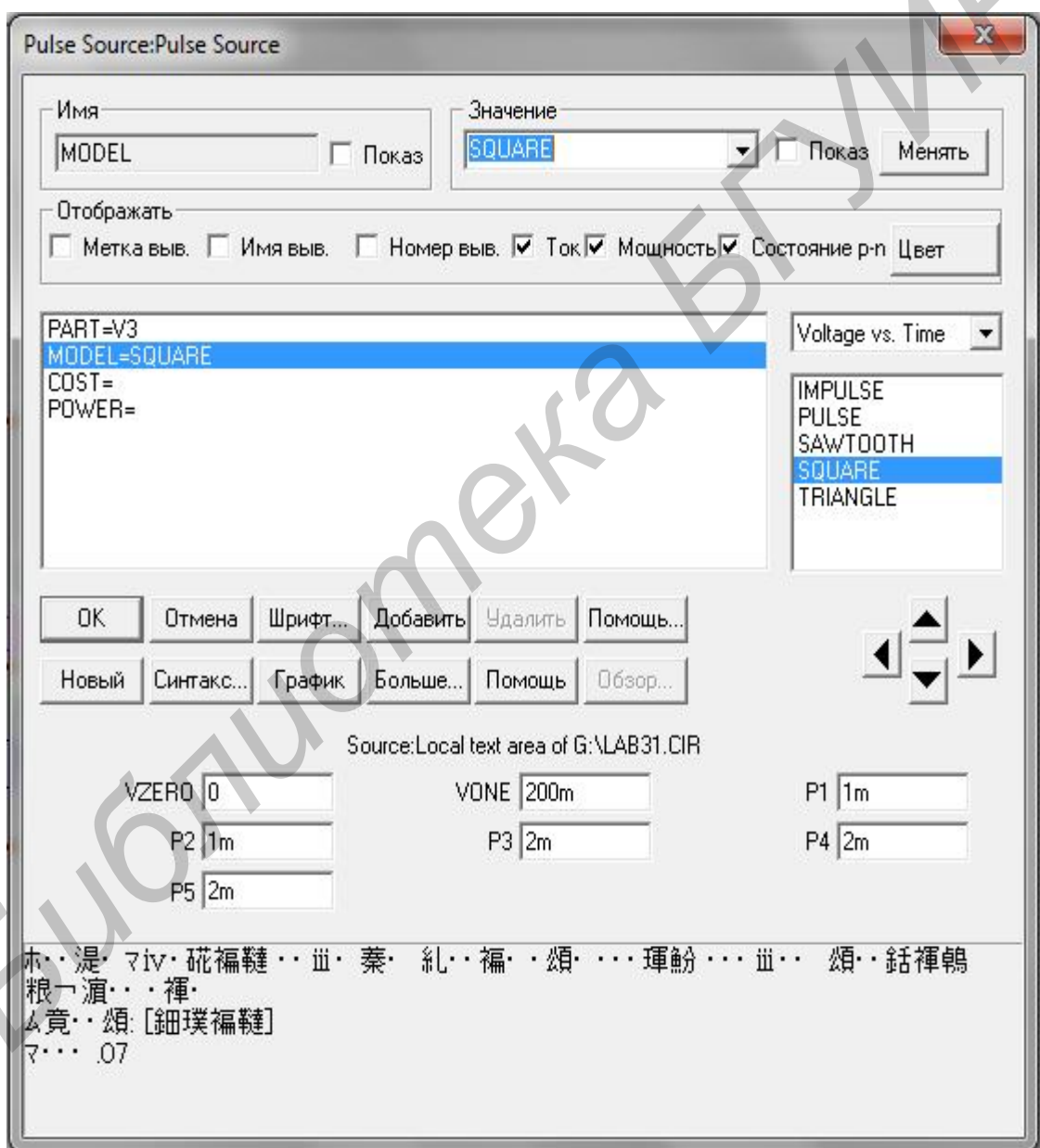


Рисунок 53 – Параметры импульсного источника напряжения

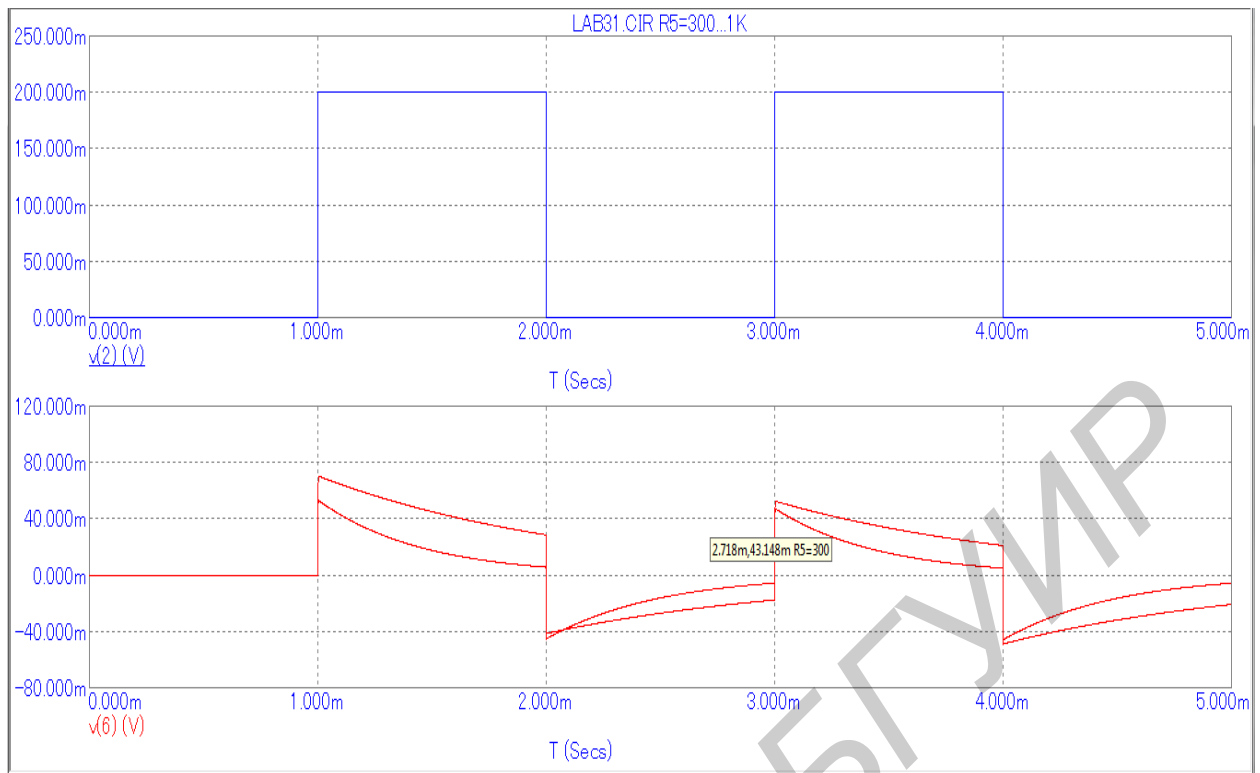


Рисунок 54 – Измерение параметров переходной характеристики

2 Исследование истокового повторителя

2.1 Используя пакет **MicroCap**, создать или открыть схему эмиттерного повторителя (рисунок 55), $V_2 = +12$ В, K -КР302А. В случае отсутствия данного транзистора использовать транзистор той же серии, что и КР302А.

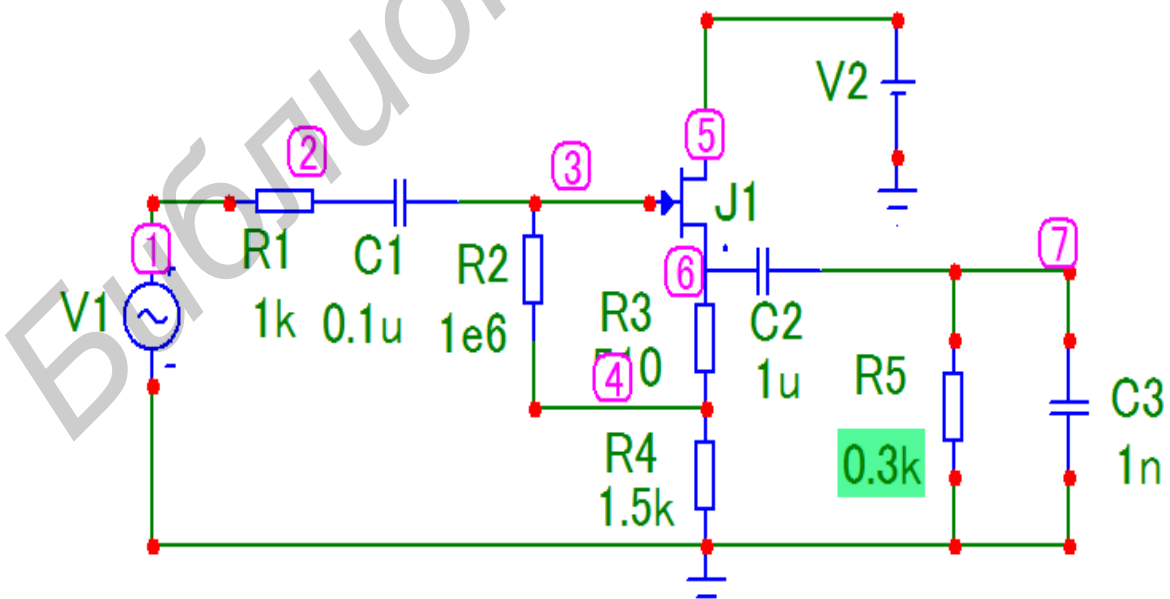


Рисунок 55 – Схема истокового повторителя

2.2 Снять амплитудную характеристику *Analysis (Анализ) > Transient Analysis (Переходные процессы)* эмиттерного повторителя на частоте $f = 1$ кГц. Повторить методику из пункта 1.3. В итоге получите АХ (рисунок 56).

2.3 Снять сквозную АЧХ повторителя при $R_r = R_2 = 1$ кОм для значений нагрузки R_{11} , R_{12} , для чего используем вкладку *Analysis (Анализ) > AC (Частотные характеристики)*. Используем методику из пункта 1.4. В результате получится АЧХ для двух значений сопротивления (рисунок 57).

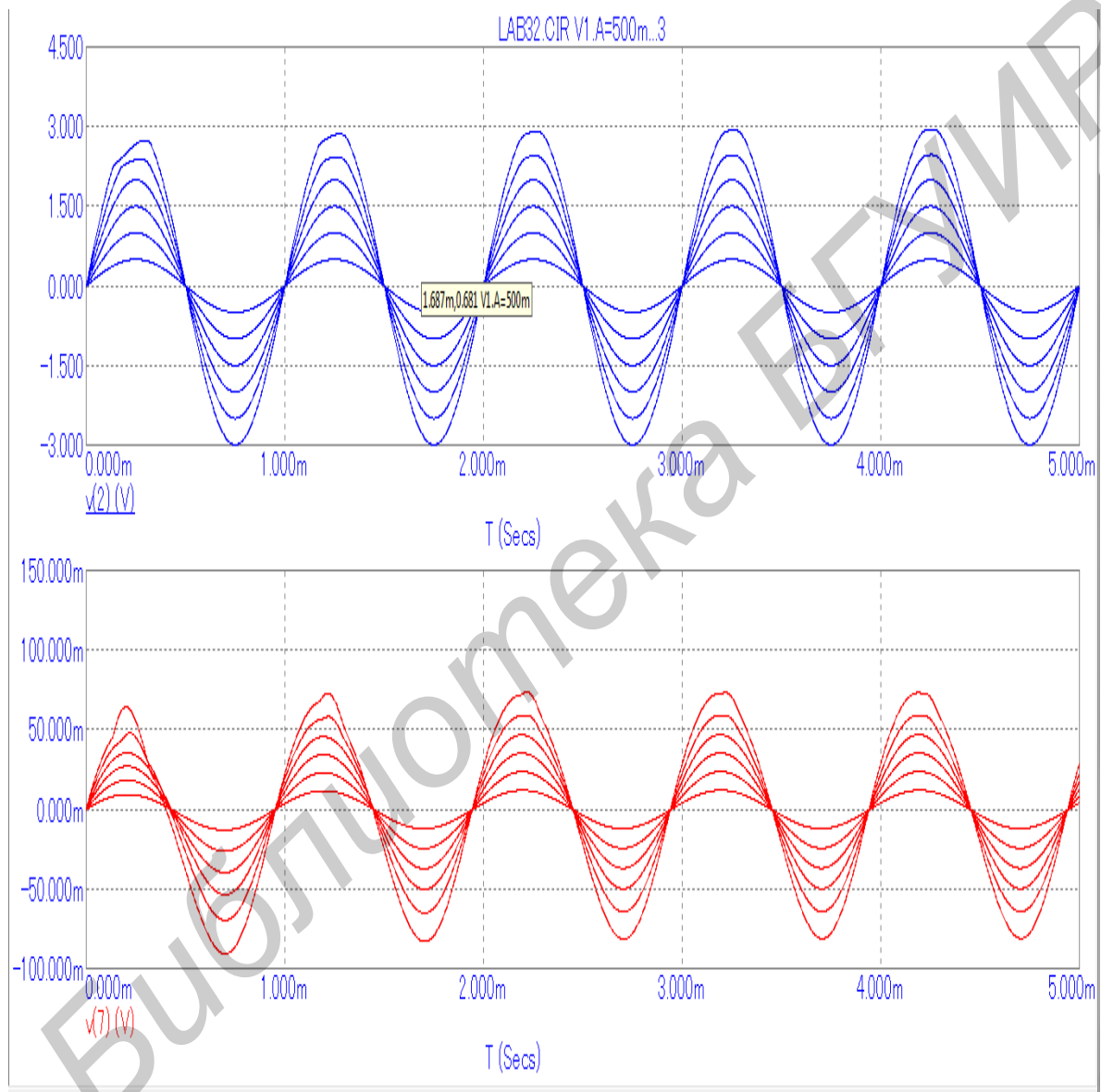


Рисунок 56 – АХ истокового повторителя

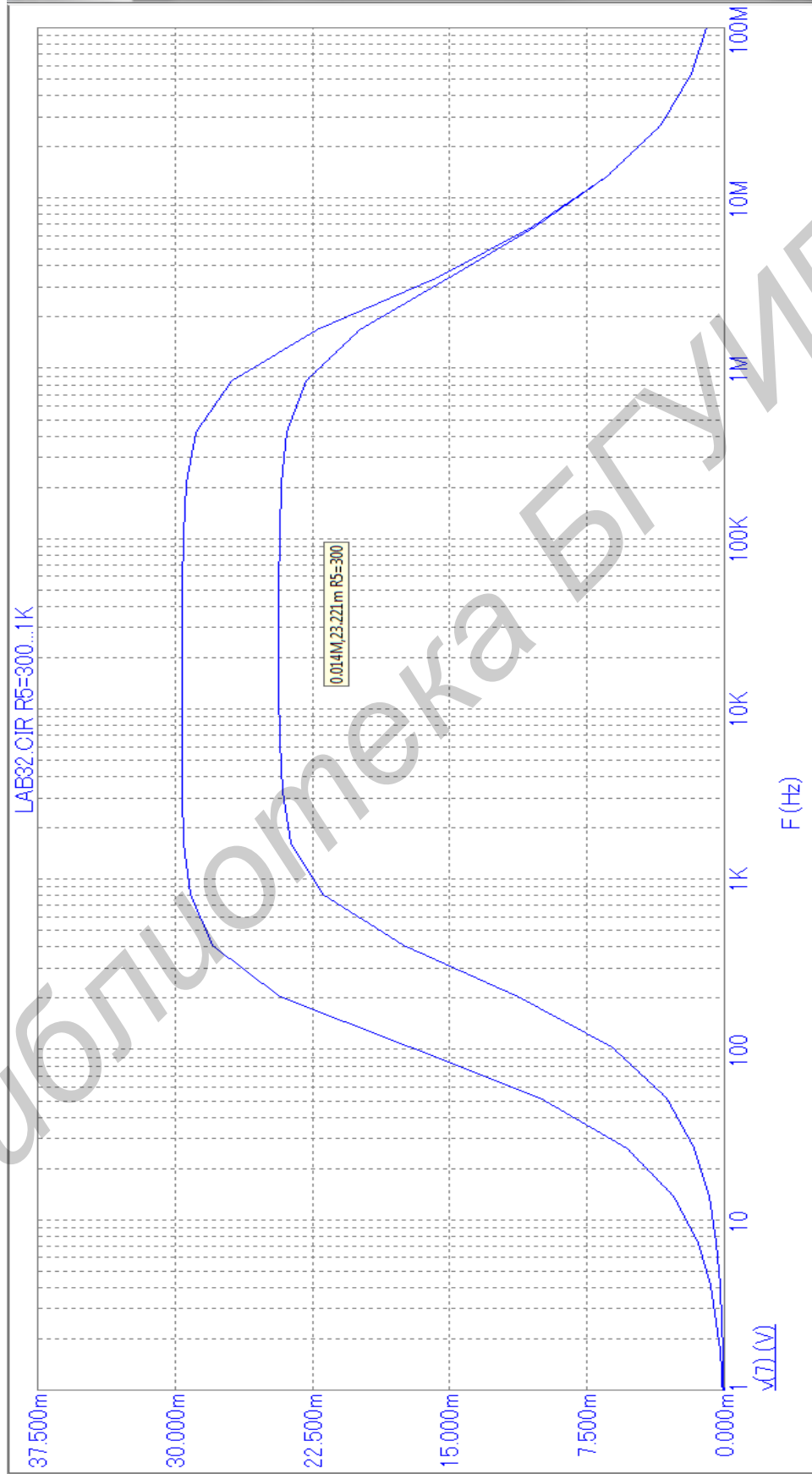


Рисунок 57 – АЧХ при двух различных нагрузках

2.4 Снять параметры переходных характеристик t_y , δ_ϕ и Δ для истокового повторителя $R_r = R_2 = 1$ кОм для значений нагрузки R_{11} , R_{12} и C_8 , для этого заменяем источник синусоидального напряжения на источник прямоугольных импульсов **Component** > **Analog Primitives** > **Waveform Sources** > **Pulse Source**. Затем во вкладке (рисунок 58) напротив **Model** выбираем **Square, Analysis (Анализ)** > **Transient Analysis (Анализ переходных процессов)**. Использовать методику из пункта 1.5. В итоге получим характеристику, представленную на рисунке 58 (верхний график – входные импульсы, нижний – импульсы на выходе).

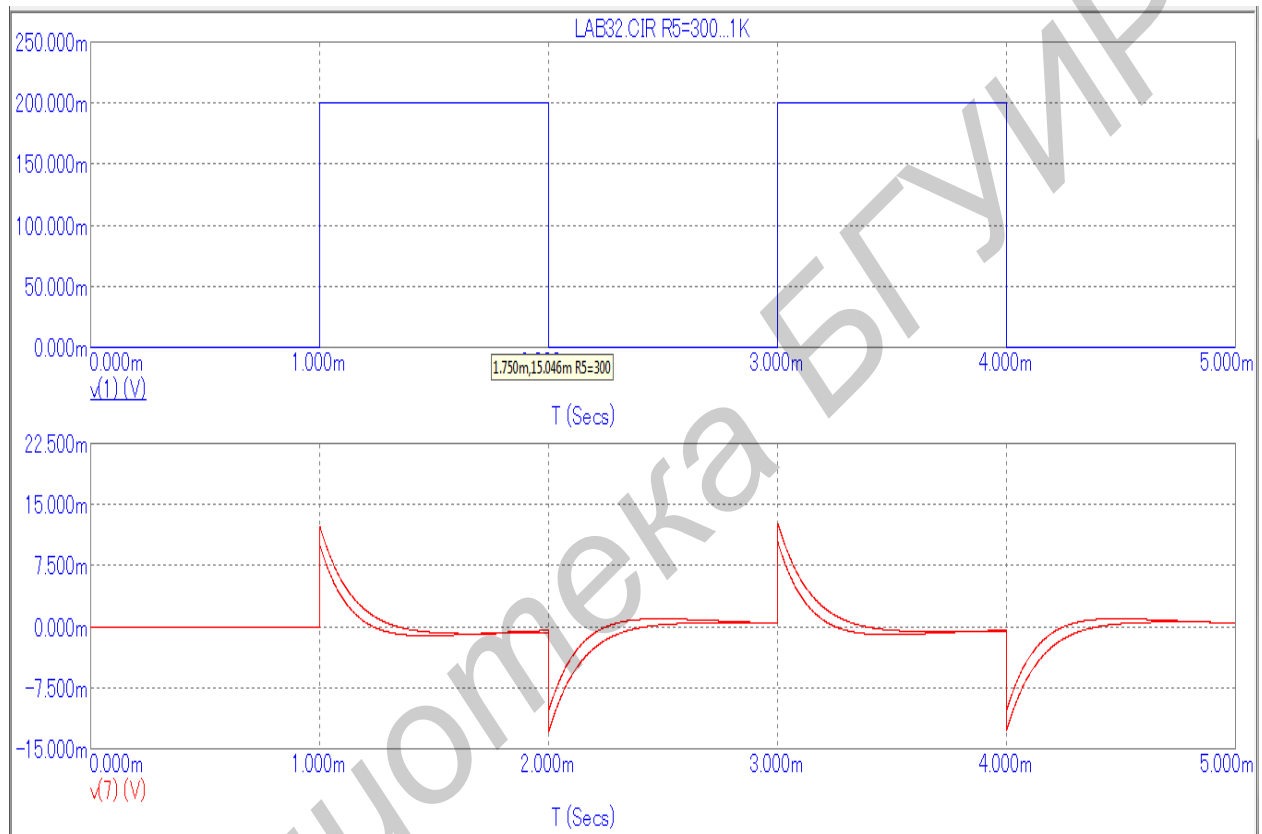


Рисунок 58 – Измерение переходных характеристик истокового повторителя

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы – изучить и освоить при помощи программы MicroCap основные свойства и параметры дифференциального каскада на биполярных транзисторах.

Выполнение работы

- 1 Включите компьютер, загрузите пакет MicroCap.
- 2 Создайте (*File (Файл) > New (Новый)*) или откройте (*File (Файл) > Open (Открыть)*) из библиотеки схему лабораторного макета в виде, представленном на рисунке 59:

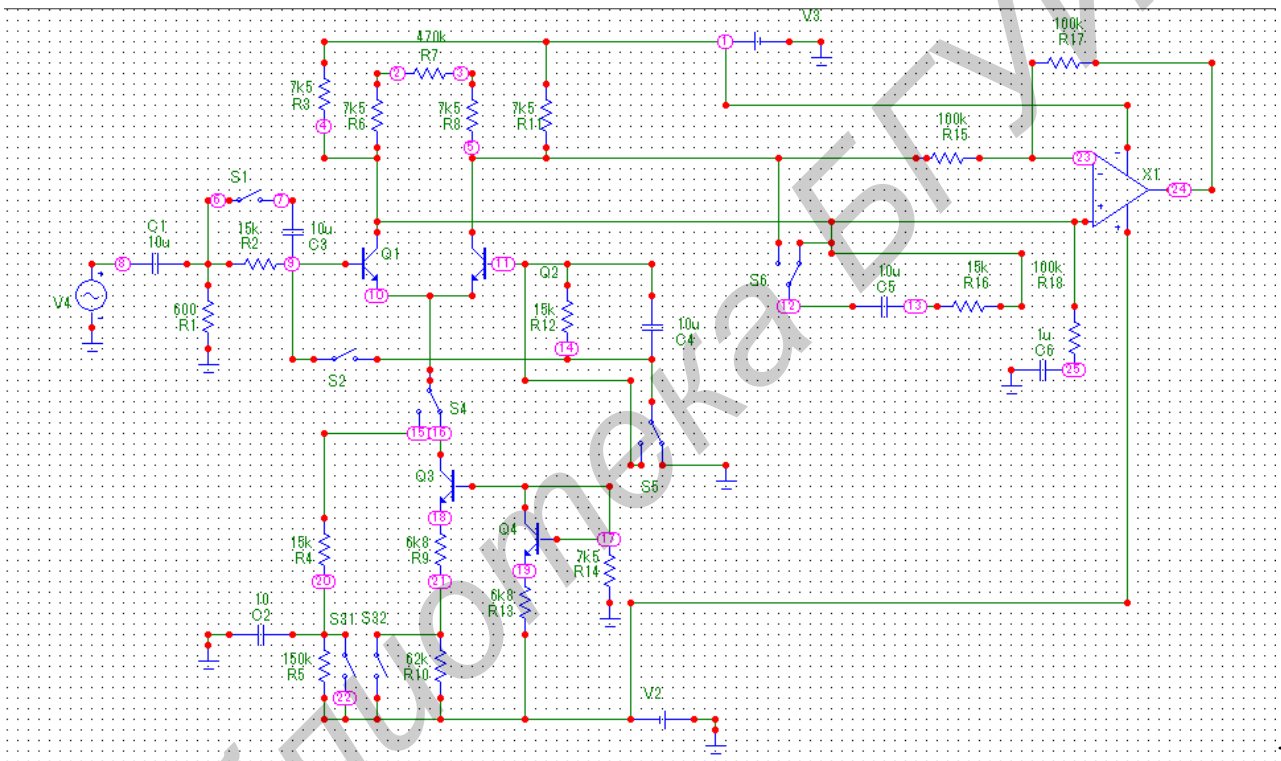


Рисунок 59 – Схема лабораторного макета

- 3 Произведите расчет схемы в режиме по постоянному току.
 - 3.1 Для этого используем команду *Analysis (Анализ) > Dynamic DC (Расчет по постоянному току...)* или нажимаем *Alt+4* (рисунок 60):

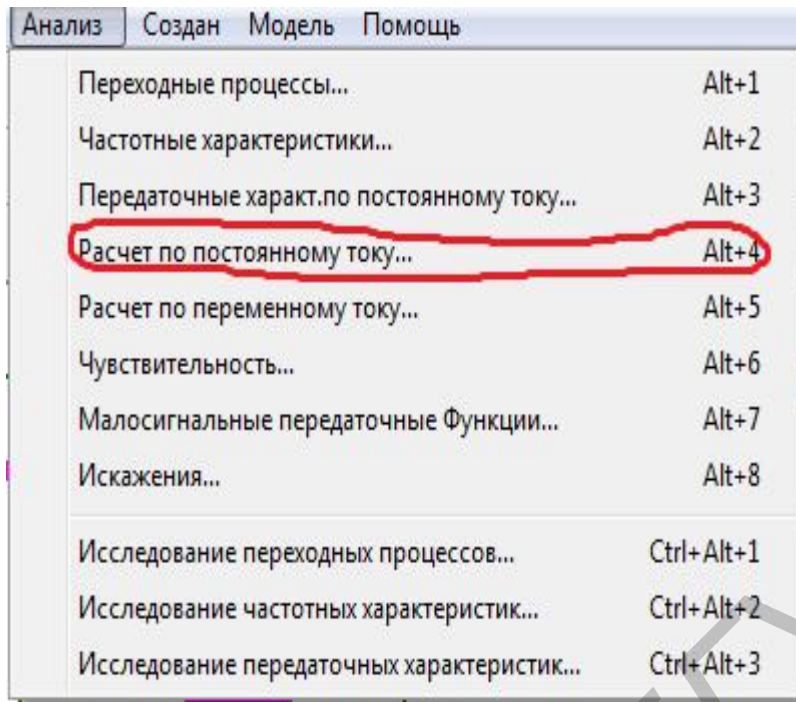


Рисунок 60 – Вызов команды **Расчет по постоянному току**

Нажатие на клавишу приводит к появлению окна, показанного на рисунке 61:

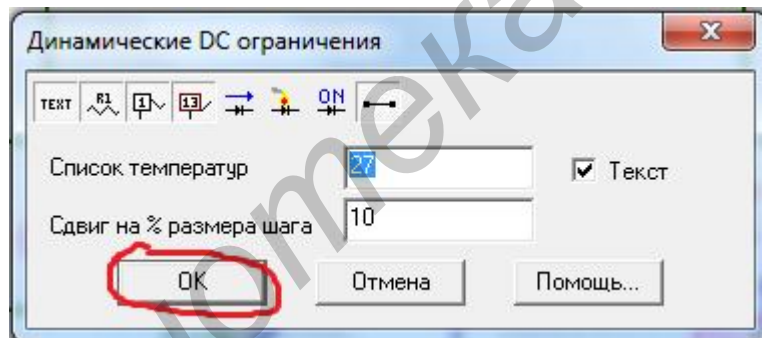


Рисунок 61 – Динамические DC ограничения

Нажимаем кнопку ОК, и программа автоматически производит расчет. После чего на схеме после номера узла будет записано значение напряжения в нем, например **1:15**.

4 Произвести расчет схемы в режиме по переменному току.

4.1 Для этого используем команду *Analysis (Анализ) > Dynamic AC (Расчет по переменному току...)* или нажимаем *Alt+5* (рисунок 62):

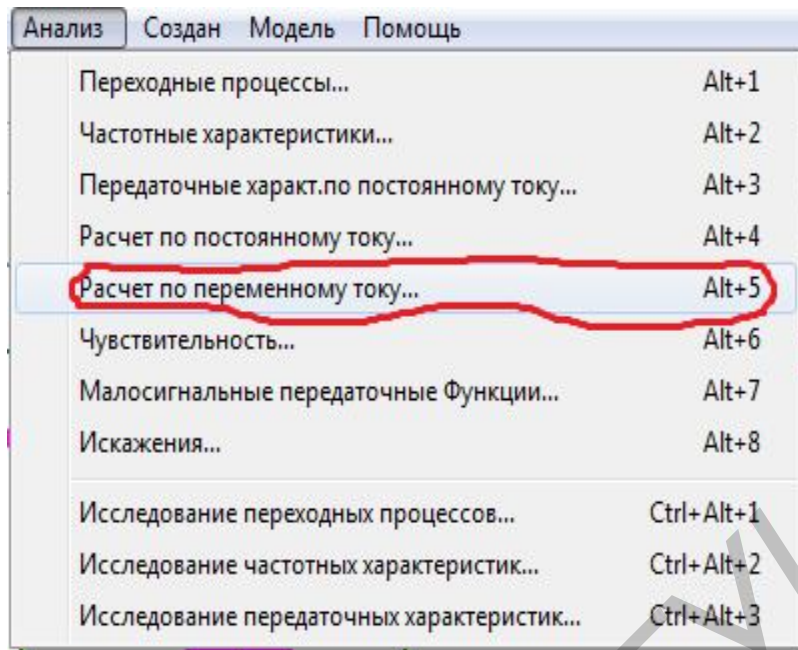


Рисунок 62 – Вызов команды **Расчет по переменному току**
 После чего появляется следующее окно (рисунок 63):

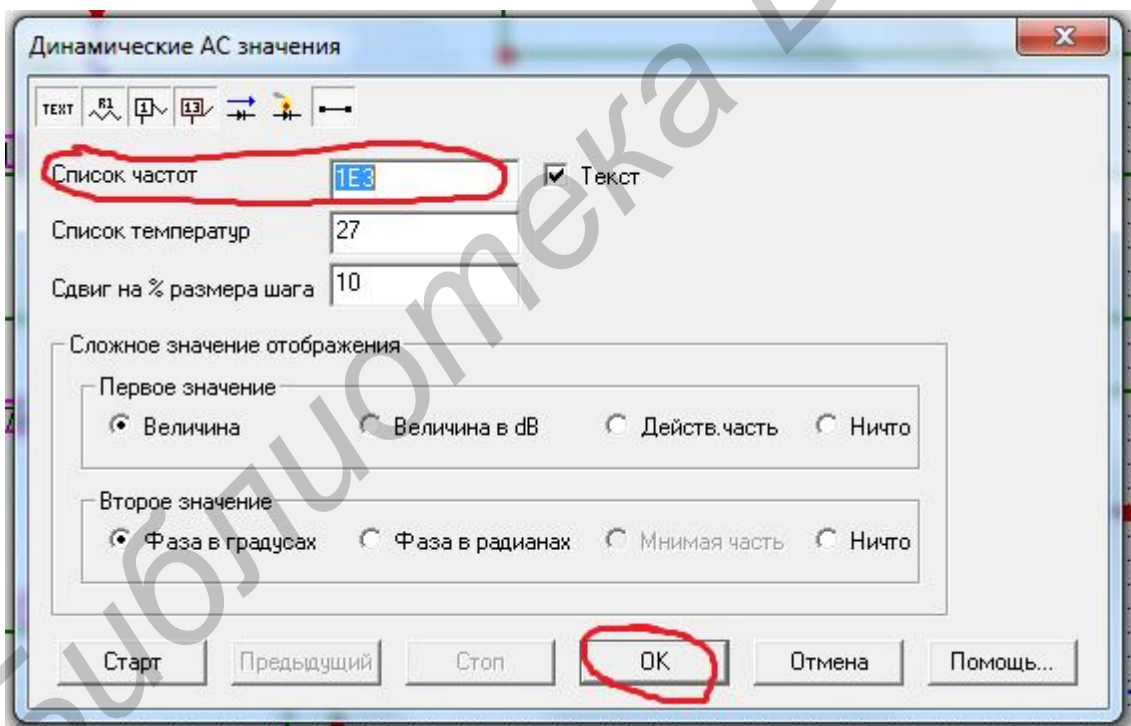




Рисунок 63 – Динамические АС значения

В окне **Список частот** устанавливаем нужную частоту, в нашем случае 1 кГц и нажимаем кнопку ОК. После этого программа автоматически производит расчет.

4.2 С помощью пиктограммы  измеряем постоянные напряжения в контрольных точках.

4.3 С помощью пиктограмм  и  измеряем фактические токи и мощность транзисторов.

4.4 Снимаем амплитудную характеристику для синфазного дифференциального сигнала. Измерения проводим при включении в цепь эмиттеров резистора $R4$ при значениях тока $I_0 = 0,1$ мА и $I_0 = 1$ мА. Положения переключателя $S3$ «1» и «2» соответственно.

При помощи команды **Analysis (Анализ) > DC (Передаточные харак. по постоянному току)** или нажатием **Alt+3** перейдем в режим для снятия АХ при частоте $f = 1$ кГц (частота задается в источнике синусоидального напряжения) для сопротивления $R4 = 15$ кОм. Переключатель $S3$ находится в положении «1».

В окне **Y Expression** (рисунок 64) выбираем нужный узел, в окне **Диапазон** – диапазон, в котором будут проводиться исследования, а также необходимо обязательно поставить галочку напротив надписи **Автомасштаб**. После чего нажимаем кнопку **Запуск**. На экране отобразится график вида (рисунок 65):

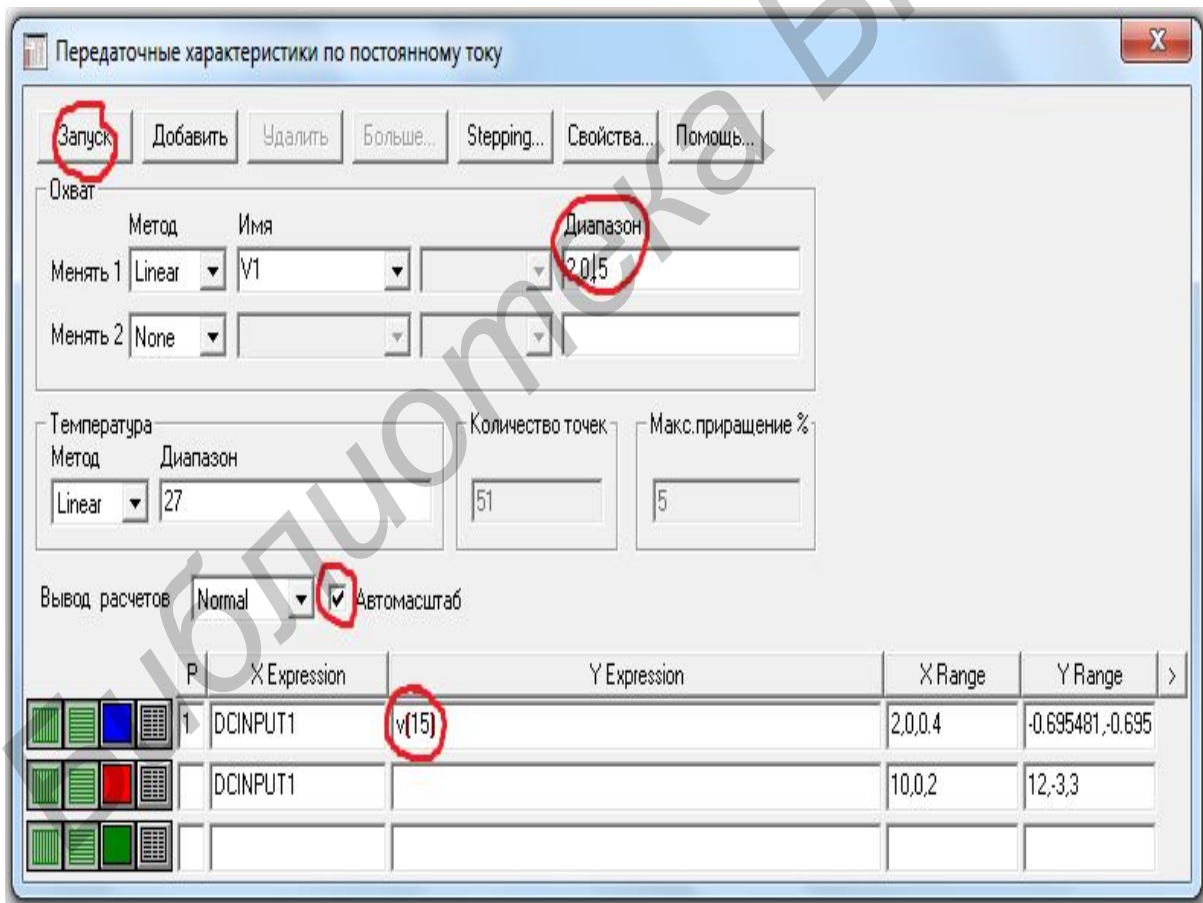


Рисунок 64 – Передаточные характеристики по постоянному току

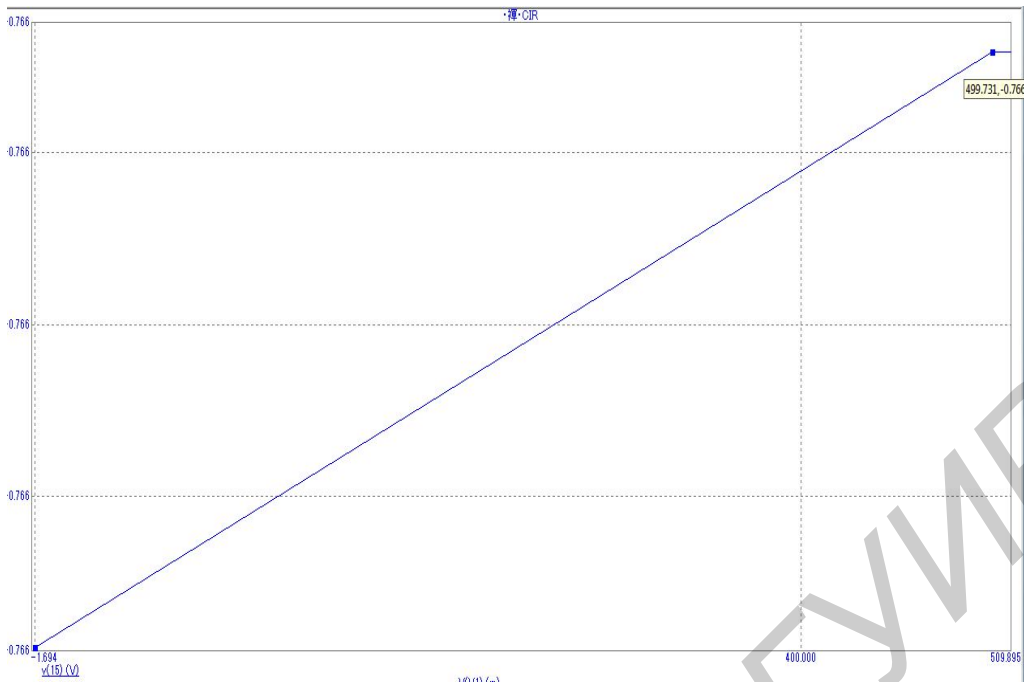


Рисунок 65 – Амплитудная характеристика

4.5 Снять с графика значения $U_{\text{вых min}}$, $U_{\text{вых max}}$, $U_{\text{вх min}}$, $U_{\text{вх max}}$.

4.6 По аналогии снять АХ для режима, когда переключатель $S3$ находится в положении «2».

5 Снять амплитудно-частотную характеристику (рисунок 66). При помощи команды *Analysis (Анализ) > AC... (Частотные характеристики)* или нажатием **Alt+2** снять АЧХ усилителя при $R8$. В ячейке **Noise Input (Входной источник)** написать или выбрать $V1$ (источник синусоидального напряжения).

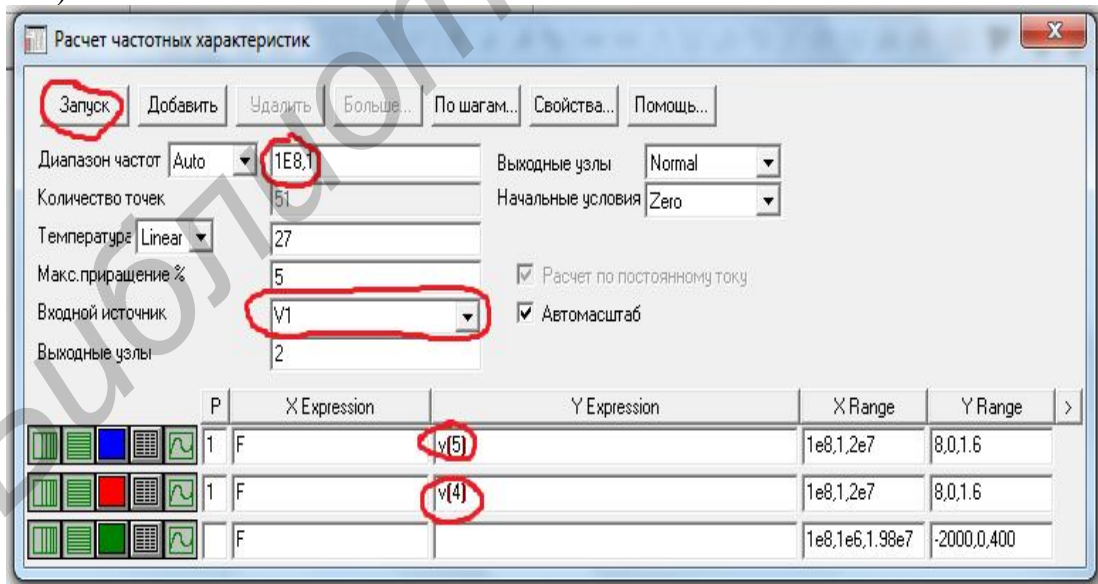


Рисунок 66 – Расчет частотных характеристик

В окне **Диапазон частот** устанавливаем необходимый диапазон частот, в нашем случае «100 МГц – 1 Гц», в окно **Y Expression** заносим номера узлов, в которых будет сниматься АЧХ, в нашем случае снимем с узлов 5 и 4.

График должен иметь вид, представленный на рисунке 67:

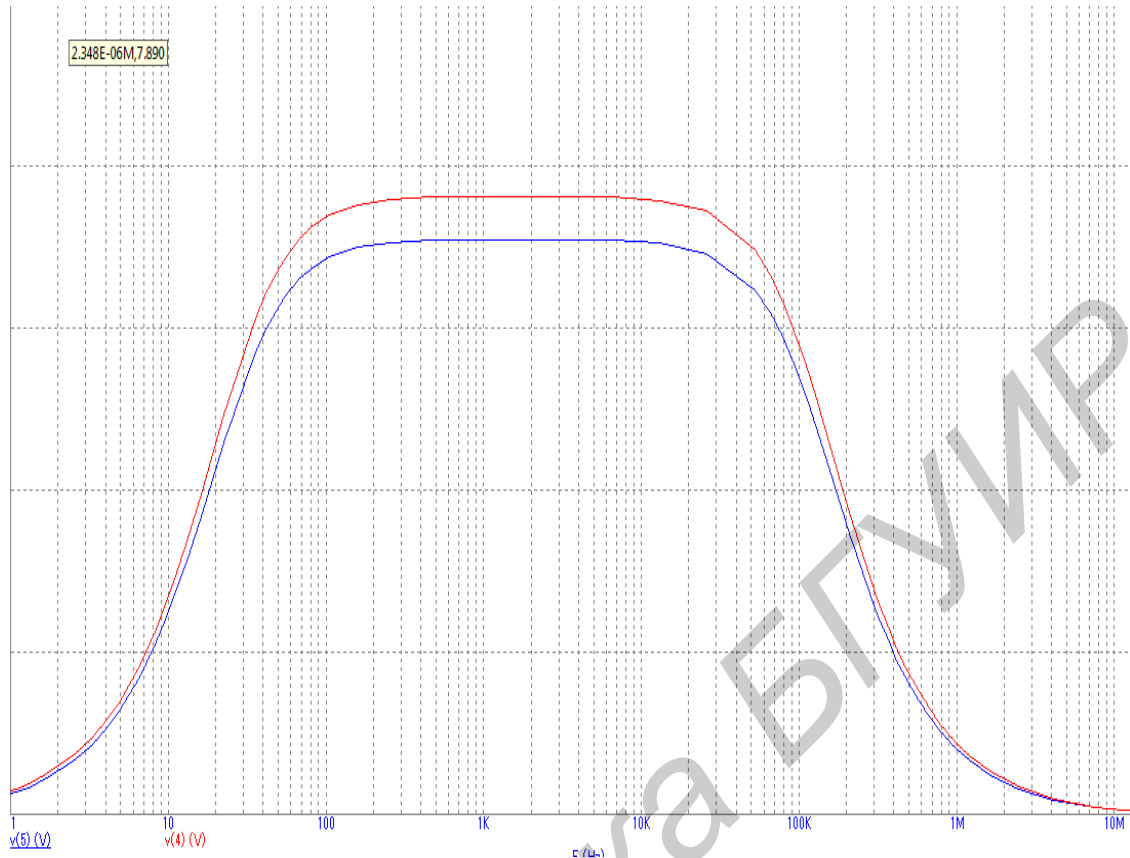





Рисунок 67 – Амплитудно-частотная характеристика

После чего снимаем характеристики. Для смены характеристик будем использовать пиктограммы . Вначале найдем пик коэффициента усиления K с помощью пиктограммы . Появится результат [частота/коэф. усил.].

Далее находим нижнюю (f_n) и верхнюю (f_v) границу частотного диапазона. При нажатии на пиктограмму  появится окно, где в поле *Value (Значение)* вводим выражение [полученный пик K].

После чего нажимаем кнопки **Left, Right**, точки снятия данных станут в нужное нам положение (если правая точка стала на место левой, то ее переместите курсором мыши противоположно левой точке). После чего можем снять (f_n) и (f_v).

Получив данные, найдем $R_{вх}$ и $R_{вых}$ по формулам

$$R_{вх} = \frac{U_{вх} \cdot R}{E - U_{вх}}, \quad R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}},$$

где $\Delta U_{вых} = U_{вых1} - U_{вых2}$, $\Delta I_{вых} = I_{вых1} - I_{вых2}$, $I_{вых1} = U_{вых1}/R_{н1}$, $I_{вых2} = U_{вых2}/R_{н2}$.

6 Снять переходную характеристику.

Заменить источник синусоидальных сигналов на источник прямоугольных импульсов. При помощи команды **Analysis (Анализ) > Transient (Переходные процессы)** или нажавшем **Alt+1** перейдем в режим для снятия переходных характеристик при длительности $t_u = 1$ мс.

Нажав **Stepping (По шагам)**, указываем **Step What (Какой шаг)**, выбираем **R9** и задаем параметры **From = 2k**, **To(K) = 10k**, **Step Value (Шаг) = 8k** (рисунок 68).

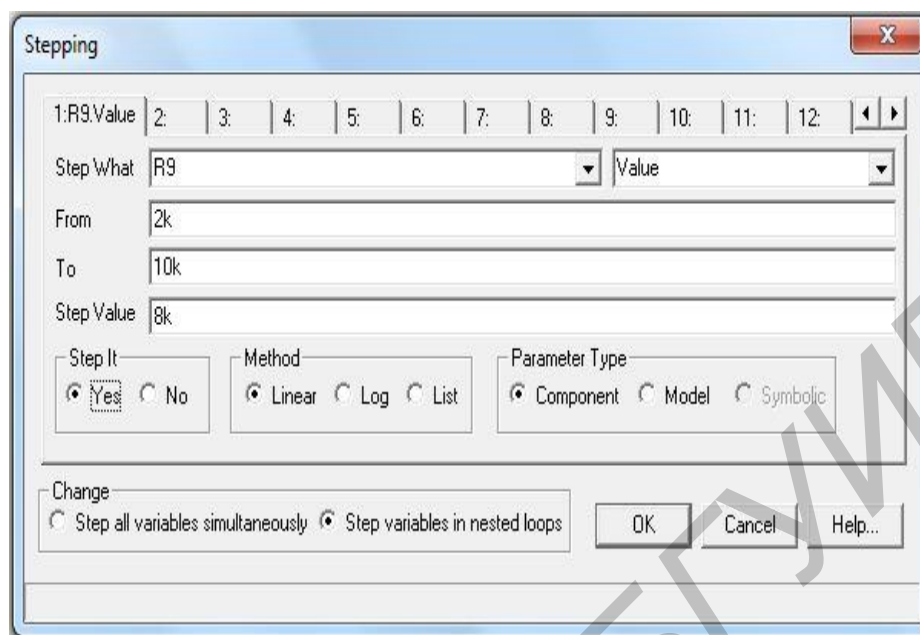


Рисунок 68 – Stepping (По шагам)

Нажимаем ОК и пиктограмму , после чего строится переходная характеристика нашей схемы (рисунок 69).

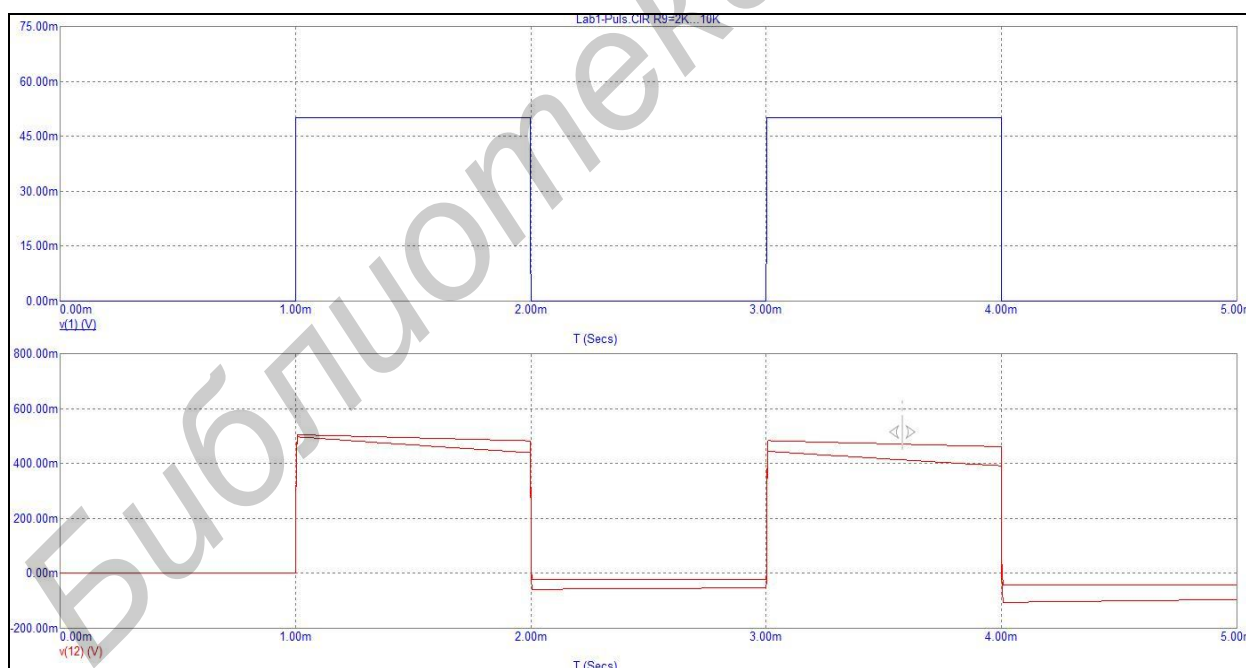



Рисунок 69 – Переходная характеристика

Нажав правую кнопку мыши, выделяем область, которую надо исследовать. После чего она увеличивается для простоты измерений. С помощью пиктограммы  можем с легкостью измерить расхождение графиков, как приведено на рисунке 69, проведя курсором (сверху вниз) по области измерения.

4 ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАЧ

4.1 Типовой расчет усилителя низкой частоты

Рассчитать линейный усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, по следующим данным: выходная мощность $P_{\text{вых}} = 1 \text{ Вт}$; диапазон рабочих частот $100\text{--}5000 \text{ Гц}$; коэффициенты линейных искажений $M_n = M_e = 0,9$; коэффициент гармоник $k_2 \leq 7 \%$.

1 Выбираем по справочнику транзистор П201А с параметрами:

- наибольшее коллекторное напряжение $U_{K \text{ max}} = 30 \text{ В}$;

- наибольший коллекторный ток $I_{K \text{ max}} = 1,5 \text{ А}$;

- мощность, рассеиваемая без радиатора (допустимая мощность), $P_{\text{доп}} = 1 \text{ Вт}$, с радиатором $P_{\text{доп}} = 10 \text{ Вт}$.

Семейство выходных статических характеристик приведено на рисунке 70, а семейство входных статических характеристик – на рисунке 71.

2 Выбираем напряжение на коллекторе:

$$U_K = 10 \text{ В} < U_{K \text{ max}}/2 = 15 \text{ В}.$$

3 Выходные характеристики транзистора имеют линейный характер, что позволяет увеличивать значение коэффициента использования коллекторного напряжения ξ почти до единицы. При таких значениях коэффициента ξ величина КПД каскада оказывается близкой к 50 %. Значение КПД обычно выбирается в пределах 40–45 %. С уменьшением напряжения источника питания КПД уменьшается до 25–35 %.

Задаемся величиной гарантированного КПД $\eta = 25 \%$ и находим величину мощности, потребляемой усилителем от источника коллекторного питания:

$$P_0 = P_{\text{вых}}/\eta = 1,0/0,25 = 4,0 \text{ Вт}.$$

4 Определяем постоянную составляющую тока коллектора:

$$I_0 = P_0/U_K = 4,0/10 = 400 \text{ мА} < I_{K \text{ max}} = 1,5 \text{ А}.$$

5 Оценим величину сопротивления нагрузки цепи коллектора:

$$R_K = U_K/I_0 = 10/0,4 = 25 \text{ Ом}.$$

6 Выполним построение динамической выходной характеристики. В нашем случае выходная динамическая характеристика проходит через рабочую точку А с координатами $U_K = 10 \text{ В}$ и $I_0 = 0,4 \text{ мА}$ и ограничивается точками В и С с координатами:

точка В – $U_{K \text{ min}} \approx 0,1 U_K = 1 \text{ В}$, $I_{K \text{ max}} = I_0 + 0,9 U_K/R_K = 0,76 \text{ А}$;

точка С – $U_{K \text{ max}} = 1,9 U_K = 19 \text{ В}$, $I_{K \text{ min}} = I_0 - 0,9 U_K/R_K = 0,04 \text{ А}$.

7 По динамической выходной характеристике определяем:

- ток базы в режиме покоя $I_{B0} = 4 \text{ мА}$;

- максимальный ток базы $I_{B \text{ max}} = 9,6 \text{ мА}$;

- минимальный ток базы $I_{B \text{ min}} = 0,4 \text{ мА}$.

8 Используя данные, полученные при расчете динамической выходной характеристики, построим входную динамическую характеристику на семействе входных статических характеристик (рисунок 71). Если в справочнике при-

водится не семейство входных статических характеристик, а только типовая входная характеристика для паспортного значения напряжения на коллекторе транзистора, то в первом приближении можно пользоваться только одной статической входной характеристикой.

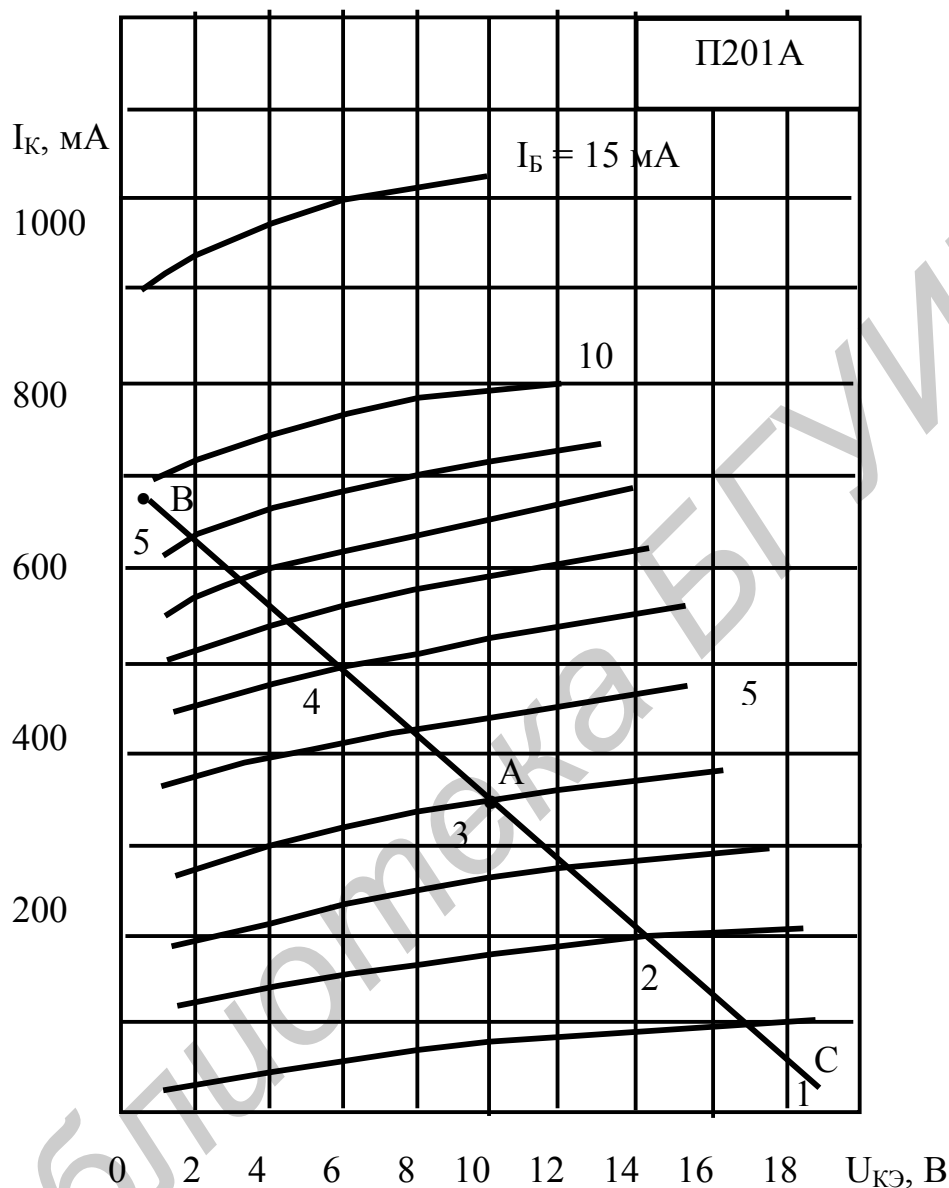


Рисунок 70 – Семейство выходных статических характеристик транзистора П201А и построение выходной динамической характеристики

9 По динамической входной характеристике находим:

- напряжение на базе в режиме покоя $U_{Б0} = 0,36$ В;
- минимальное напряжение на базе $U_{БЭ \min} = 0,23$ В;
- максимальное напряжение на базе $U_{БЭ \max} = 0,47$ В.

10 Оценим размах базового напряжения:

$$2U_{БЭ} = U_{БЭ \max} - U_{БЭ \min} = 0,47 - 0,23 = 0,24 \text{ В}$$

и размах изменений базового тока:

$$2I_B = I_{B \max} - I_{B \min} = 9,6 - 0,4 = 9,2 \text{ мА.}$$

11 Оценим величину среднего значения входного сопротивления усилительного каскада:

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{БЭ}}/I_B = 0,12/4,6 \cdot 10^{-3} = 26,1 \text{ Ом.}$$

12 Выбираем величину тока делителя в цепи задания базового смещения

$$I_d = (2-5) I_{B0} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ мА.}$$

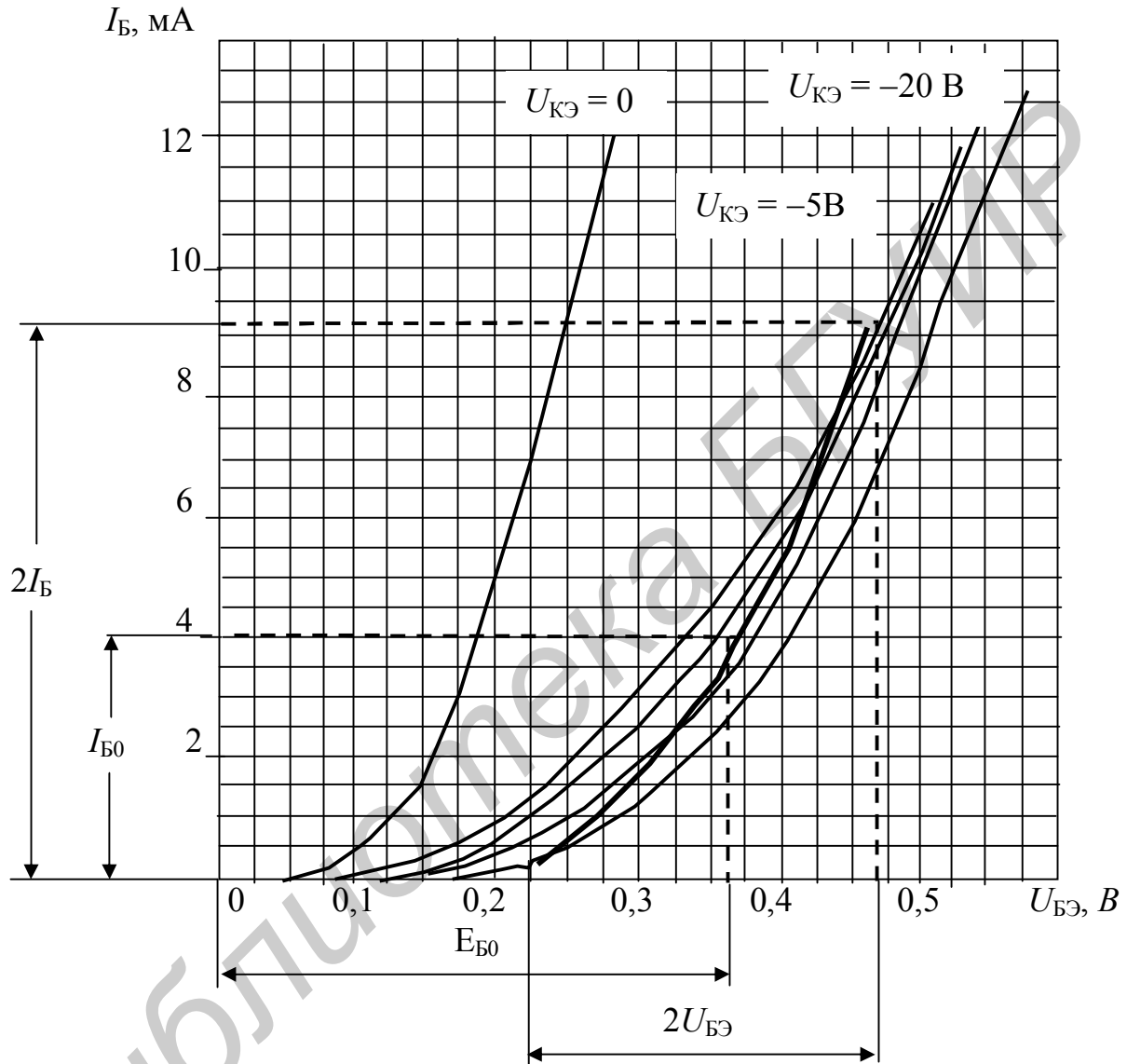


Рисунок 71 – Семейство входных статических характеристик транзистора П201А и построение входной динамической характеристики

13 Рассчитаем величины сопротивлений цепи делителя базового смещения и величину резистора в эмиттерной цепи транзистора. Выбираем $U_Э = 1 \text{ В}$. Тогда имеем

$$R1 \approx \frac{U_K - U_{B0} - U_Э}{I_d + I_{B0}} = \frac{10 - 0,36 - 1}{(8 + 4)10^{-3}} = 720 \text{ Ом;}$$

$$R2 = \frac{U_{B0} + U_Э}{I_d} \approx 170 \text{ Ом;}$$

$$R_{\Sigma} \approx U_{\Sigma}/I_0 = 1/0,4 = 2,5 \text{ Ом.}$$

14 Рассчитаем эквивалентную величину входного сопротивления. Поскольку по цепи переменного тока сопротивления R_1 и R_2 оказываются включенными параллельно, то сопротивление делителя $R_1 - R_2$ определится как

$$R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 720 \cdot 171 / (720 + 171) = 138 \text{ Ом.}$$

15 Тогда эквивалентное сопротивление усилителя можно определить как параллельно включенные сопротивления делителя $R_1 - R_2$ и входного сопротивления собственно усилительного каскада $R_{\text{вх}}$. Имеем

$$R_{\text{вх.}\Sigma} = R_{\text{вх}} \cdot R_{12} / (R_{\text{вх}} + R_{12}) = 26,1 \cdot 138 / (26,1 + 138) = 21,9 \text{ Ом.}$$

16 Определим мощность, потребляемую во входной цепи:

$$P_{\text{вх}} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{БЭ}}^2}{R_{\text{вх.}\Sigma}} = \frac{1}{2} \frac{0,12^2}{21,9} = 0,33 \text{ мВт.}$$

17 Переходим к построению сквозной (проходной) динамической характеристики $I_K = f(E_c)$, где E_c – амплитуда входного испытательного гармонического сигнала.

Для этого выбираем сопротивление источника сигнала $R_c = 150 \text{ Ом}$ и находим точки проходной характеристики.

Точка 1: $I_{k1} = 35 \text{ мА}$, $I_{B1} = 0,4 \text{ мА}$, $U_{\text{БЭ}1} = 0,23 \text{ В}$.

$$E_{c1} = U_{\text{БЭ}1} + R_c I_{B1} = 0,23 + 150 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 0,29 \text{ В.}$$

Точка 2: $I_{k2} = 190 \text{ мА}$, $I_{B2} = 2 \text{ мА}$.

$$E_{c2} = 0,32 + 150 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,62 \text{ В.}$$

Точка 3: $I_{k3} = 352 \text{ мА}$, $I_{B3} = 4 \text{ мА}$, $U_{\text{БЭ}3} = 0,365 \text{ В}$.

$$E_{c3} = 0,365 + 150 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,965 \text{ В.}$$

Точка 4: $I_{k4} = 500 \text{ мА}$, $I_{B4} = 6 \text{ мА}$, $U_{\text{БЭ}4} = 0,415 \text{ В}$.

$$E_{c4} = 0,415 + 150 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 1,315 \text{ В.}$$

Точка 5: $I_{k5} = 670 \text{ мА}$, $I_{B5} = 9,6 \text{ мА}$, $U_{\text{БЭ}5} = 0,47 \text{ В}$.

$$E_{c5} = 0,47 + 150 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 1,91 \text{ В.}$$

Динамическая сквозная характеристика, построенная по полученным данным, показана на рисунке 72.

18 Вычислим амплитуды гармонических составляющих коллекторного тока, необходимые для расчета коэффициента нелинейных искажений рассчитываемого усилительного каскада.

Для определения спектральных составляющих тока цепи коллектора найдем мгновенные напряжения:

$$2U_{\text{вх}} = E_{c5} - E_{c1} = 1,91 - 0,29 = 1,62 \text{ В;}$$

$$U_{\text{вх}} = 0,81 \text{ В, } U_{\text{вх}}/2 = 0,405 \text{ В}$$

и следующие мгновенные значения токов:

$$I_{K \text{ min}} = 35 \text{ мА, при напряжении } E_{c \text{ min}};$$

$$I_{K \text{ max}} = 670 \text{ мА, при напряжении } E_{c \text{ max}};$$

$$I_0 = 395 \text{ мА, при напряжении } E_{c \text{ min}} + U_{\text{вх}};$$

$$I_{K1} = 565 \text{ мА, при напряжении } E_{c \text{ min}} + 3/2 U_{\text{вх}};$$

$$I_{K2} = 222 \text{ мА, при напряжении } E_{c \text{ min}} + U_{\text{вх}}/2.$$

Амплитуды составляющих коллекторного тока находим по формулам пяти ординат, которые позволяют рассчитать амплитуды первых четырех гармоник коллекторного тока. В большинстве практических случаев ограничиваются расчетом только этих амплитуд, так как амплитуды гармоник более высокого порядка, как правило, оказываются незначительными, и ими просто пренебрегают. Имеем:

$$I_{K_{m1}} = \frac{(I_{K_{\max}} - I_{K_{\min}}) + (I_{K1} - I_{K2})}{3} = \frac{(670 - 35) + (565 - 222)}{3} = 326 \text{ мА};$$

$$I_{K_{m2}} = \frac{0,5(I_{K_{\max}} + I_{K_{\min}}) - I_0}{2} = \frac{0,5(670 + 35) - 395}{2} = -21 \text{ мА};$$

$$I_{K_{m3}} = \frac{(I_{K_{\max}} - I_{K_{\min}}) - 2(I_{K1} - I_{K2})}{6} = \frac{670 - 35 - 2(565 - 222)}{6} = 8,5 \text{ мА}.$$

$$\begin{aligned} I_{K_{m4}} &= \frac{(I_{K_{\max}} + I_{K_{\min}}) - 4(I_{K1} + I_{K2}) + 6I_0}{12} = \\ &= \frac{(670 + 35) - 4(565 + 222) + 6 \cdot 395}{12} = 0,58 \text{ мА}. \end{aligned}$$

19 Определим коэффициент гармоник:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_{K_{m2}}^2 + I_{K_{m3}}^2 + I_{K_{m4}}^2}}{I_{K_{m1}}} = \frac{\sqrt{21^2 + 8,5^2 + 0,58^2}}{326} \approx 0,07.$$

Таким образом коэффициент гармоник рассчитанного усилительного каскада находится в пределах, требуемых заданием. Если в результате расчета получается более высокий коэффициент нелинейных искажений, чем предусмотрено заданием, тогда нужно принять меры для его снижения, например, уменьшить величину коэффициента использования ξ нелинейного элемента по коллекторному питанию или уменьшить сопротивление коллекторной нагрузки и произвести новый расчет. Поскольку мы использовали графический метод расчета, то гарантируем высокую точность расчета, но не можем найти оптимальный режим работы усилительного каскада. Поэтому при всех изменениях параметров рассчитываемого усилителя всякий раз приходится проводить расчет заново. Но при приобретении практических навыков эта работа не является сложной. Тем более надо подчеркнуть, что графические методы позволяют избежать многих грубых ошибок, которые могут возникнуть при выполнении расчета аналитическими методами, имеющими меньшую точность, но позволяющими оптимизировать некоторые параметры рассчитываемого усилительного каскада.

20 Коэффициент частотных искажений на нижних частотах определяется формулой

$$M_H = \sqrt{1 + \left[\frac{1}{\Omega_H C_P (R_{K1Э} + R_{BK2Э})} \right]^2},$$

где $\Omega_H = 2\pi F_H$ – нижняя циклическая частота усилителя;

$R_{K1Э}$ – параллельное сопротивление выходного сопротивления каскада и сопротивления в коллекторной цепи транзистора;

$R_{BX2Э}$ – входное эквивалентное сопротивление транзисторного каскада, равное параллельному сопротивлению входного сопротивления транзистора и эквивалентного сопротивления цепи смещения R_{12} .

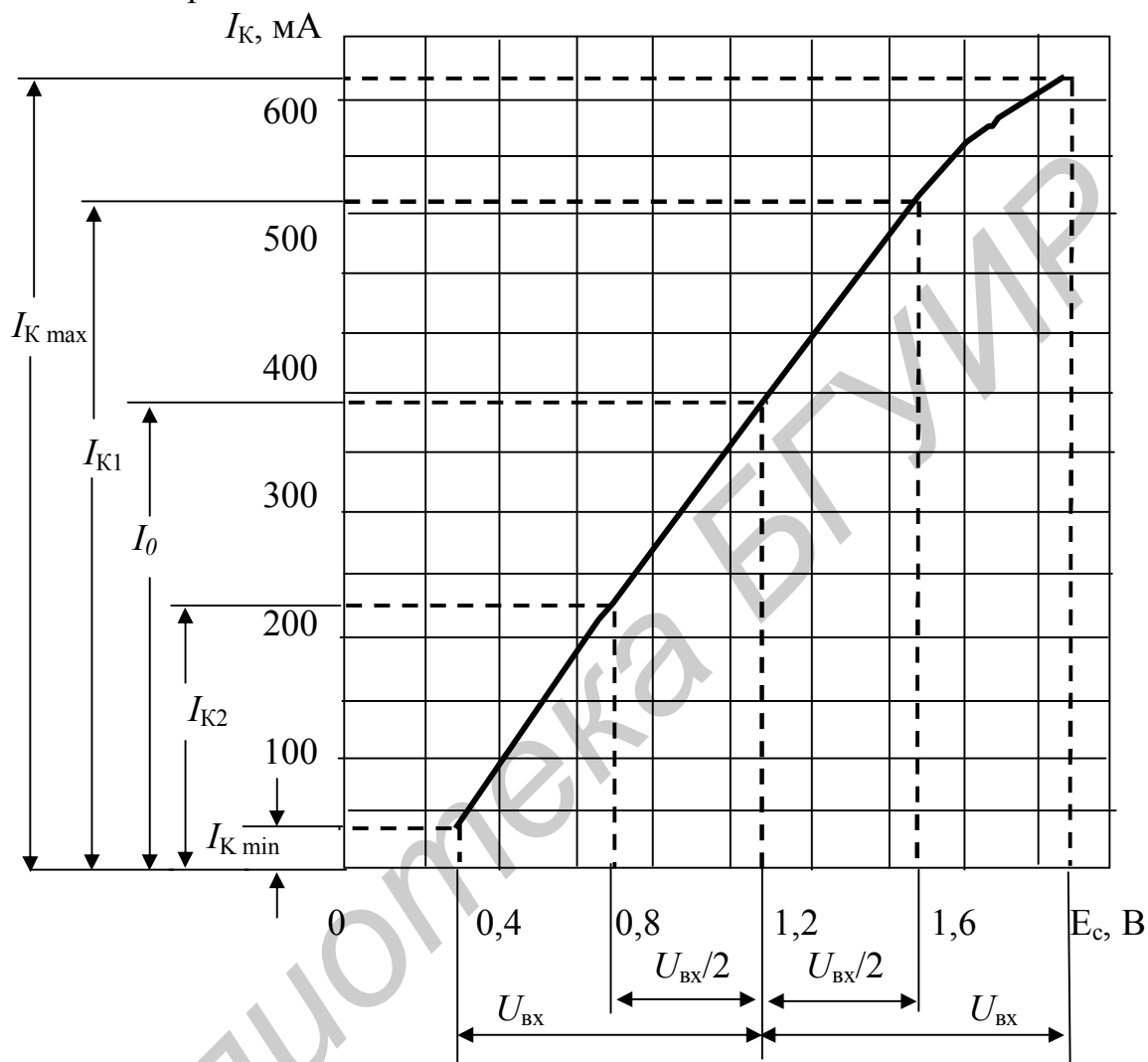


Рисунок 72 – Проходная динамическая характеристика транзистора П201А и расчет коэффициента гармоник по формулам пяти ординат

Поскольку выходное сопротивление в данной схеме значительно больше величины коллекторного резистора, то при расчете величины сопротивления $R_{K1Э}$ можно ограничиться учетом только резистора $R_K = 25$ Ом. А так как сопротивление цепи смещения значительно больше входного сопротивления транзистора, то можно считать, что $R_{BX2Э} \approx R_{BX} = 26,1$ Ом. Отсюда легко оценить величину разделительной емкости $C_p \geq 10,0$ мкФ. При установке такой большой емкости в усилительный каскад нужно учитывать то обстоятельство, что тем самым мы увеличиваем паразитную емкость каскада, снижая усиление на высоких частотах. Поэтому в технике всегда имеют дело с компромиссными про-

блемами, благодаря умелому разрешению которых и получаются устройства с оптимальными характеристиками.

21 Коэффициент частотных искажений в области верхних частот, обусловленный влиянием паразитной емкости, условно обозначаемой $C_{кэ}$, определяется формулой

$$M_B = \sqrt{1 + (\Omega_B R_{нэ} C_{кэ})^2},$$

где Ω_B – верхняя рабочая частота усилительного каскада;

$R_{нэ}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки усилительного каскада, равное параллельному сопротивлению $R_{к1}$ и $R_{вх2э}$.

Величина емкости $C_{кэ}$ определяется качеством выполненного монтажа и изготовления конструкции усилителя. Продуманное выполнение усилительного каскада обеспечивает незначительную величину $C_{кэ}$, равную 10–15 пФ, в то время как неряшливый монтаж той же схемы усилителя может увеличить емкость $C_{кэ}$ до 50–100 пФ, в результате чего значительно снизится усиление в области верхних частот. В данном случае мы предполагаем, что усилитель выполнен качественно, поэтому его частотные свойства будут удовлетворять поставленным в условии требованиям.

На этом расчет усилительного каскада можно закончить, однако можно рассчитывать еще ряд других, не менее важных параметров, таких, как устойчивость положения рабочей точки при изменении температуры окружающей среды в достаточно широких пределах, устойчивость режима работы усилителя при замене транзисторов и т. д.

4.2 Анализ работы усилителя при больших уровнях входного сигнала (нелинейное усиление)

Выше был проведен анализ работы усилителя в малосигнальном приближении, т. е. считалось, что рабочая точка хотя и смещается по вольт-амперной характеристике, но не настолько, чтобы сказывалась нелинейность этих характеристик и появлялись новые частоты в спектре выходного сигнала. Рассмотрим теперь работу усилителя при таких уровнях входного сигнала, когда нелинейный элемент работает с отсечкой протекающего по нему тока.

4.2.1 Усилитель при большом уровне входного сигнала

Заменяем (аппроксимируем) вольт-амперную характеристику ломаной прямой и будем считать, что на вход усилителя подается постоянное напряжение (смещение) U_0 и гармоническое колебание (рисунок 73).

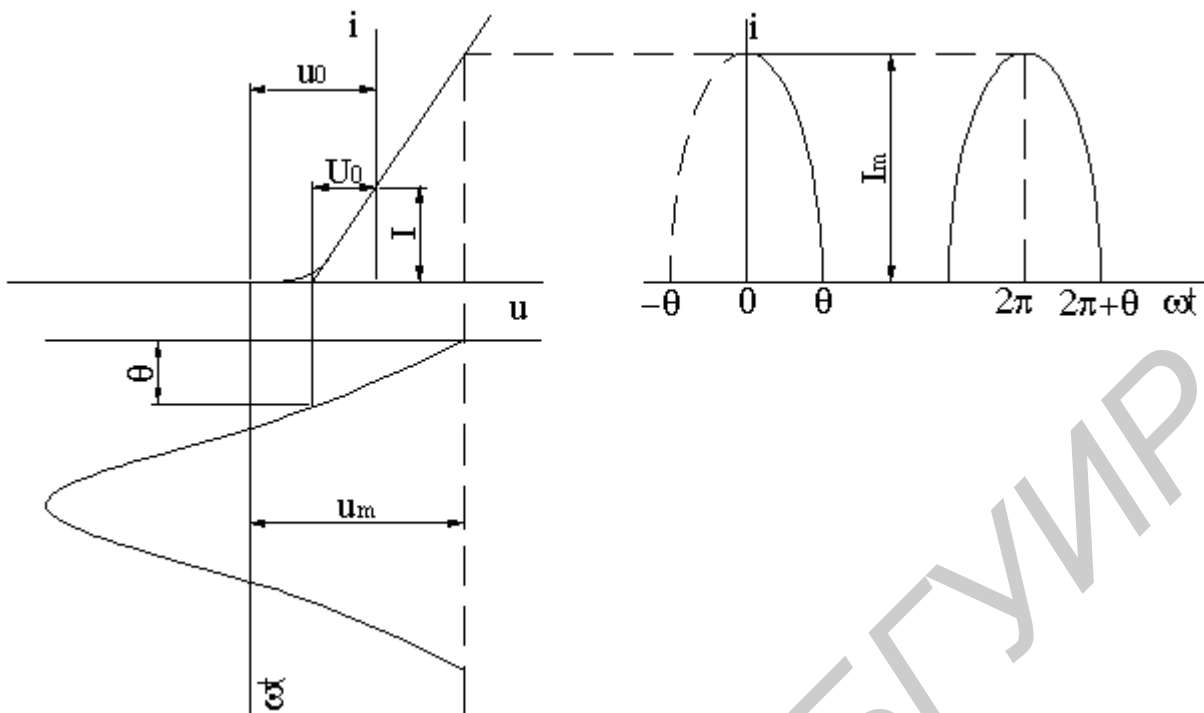


Рисунок 73 – Усиление при большом уровне входного сигнала

$$U_{\text{вх}} = U_0 + U_m \cos \omega t. \quad (9)$$

Уравнение ломаной прямой, аппроксимирующей вольт-амперную характеристику активного элемента усилителя, запишем в виде совокупности уравнений:

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } u \leq U_n, \\ Su + I & \text{при } u > U_n, \end{cases} \quad (10)$$

где U_n – напряжение запирающего активного элемента;

S – крутизна вольт-амперной характеристики;

I – ордината точки пересечения аппроксимирующей прямой с осью ординат.

Форму тока, протекающего через активный элемент усилителя, можно построить графически, как это сделано на рисунке 73, но можно описать и аналитически, подставив (9) в (10), а именно:

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } u \leq U_n, \\ S(U_0 + U_m \cos \omega t) + I & \text{при } u > U_n. \end{cases} \quad (11)$$

Из (11) определим фазу входного гармонического колебания, при которой прекращается ток через активный элемент (так называемый угол отсечки θ). Для этого в (11) положим $\omega t = \theta$ для $i = 0$. Имеем

$$0 = S(U_0 + U_m \cos \theta) + I, \quad (12)$$

откуда

$$\cos \theta = - \frac{SU_0 + I}{SU_m}. \quad (13)$$

С учетом (9) и (13) соотношение (11) можно записать в таком виде:

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta, \\ SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) & \text{при } 0 < \omega t < \theta, 2\pi - \theta < \omega t < 2\pi. \end{cases} \quad (14)$$

Из (14) легко установить максимальное значение тока, протекающего через активный элемент:

$$I_m = SU_m (1 - \cos \theta). \quad (15)$$

Найдем спектр выходного сигнала, которым является ток, определяемый выражением (14). Так как входное воздействие описывается четной функцией, то спектр выходного сигнала можно записать в виде ряда Фурье:

$$i(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n \cos n\omega t, \quad (16)$$

где

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(t) d\omega t, \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(t) \cos n\omega t d\omega t. \quad (17)$$

Так как подынтегральное выражение отлично от нуля только при $-\theta \leq \omega t \leq \theta$, то интегрирование будем проводить от $-\theta$ до $+\theta$. Для постоянной составляющей имеем

$$I_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) d\omega t = \frac{SU_m}{\pi} (\theta - \theta \cos \theta). \quad (18)$$

Величину первой гармоники выходного тока оценим по выражению

$$I_{1m} = a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{\theta} SU_m (\cos \omega t - \cos \theta) d\omega t = \frac{SU_m}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta). \quad (19)$$

Вообще для n -й гармоники выходного тока ($n > 1$) можем получить

$$I_{nm} = a_n = \frac{2SU_m}{\pi} \frac{\sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)}. \quad (20)$$

Определив из (15) величину SU_m , вместо (18–20) получаем

$$I_0 = \alpha_0 I_m, \quad (21)$$

$$I_{1m} = \alpha_1 I_m, \quad (22)$$

...

$$I_{nm} = \alpha_n I_m, \quad (23)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}, \quad (24)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\pi} \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{1 - \cos \theta}, \quad (25)$$

$$\alpha_{n,n>1} = \frac{1}{\pi} \frac{\sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta)}. \quad (26)$$

Коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ представляют собой функции одного переменного и называются функциями А. И. Берга. Эти функции табулированы. Графики функций $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ приведены на рисунке 74.

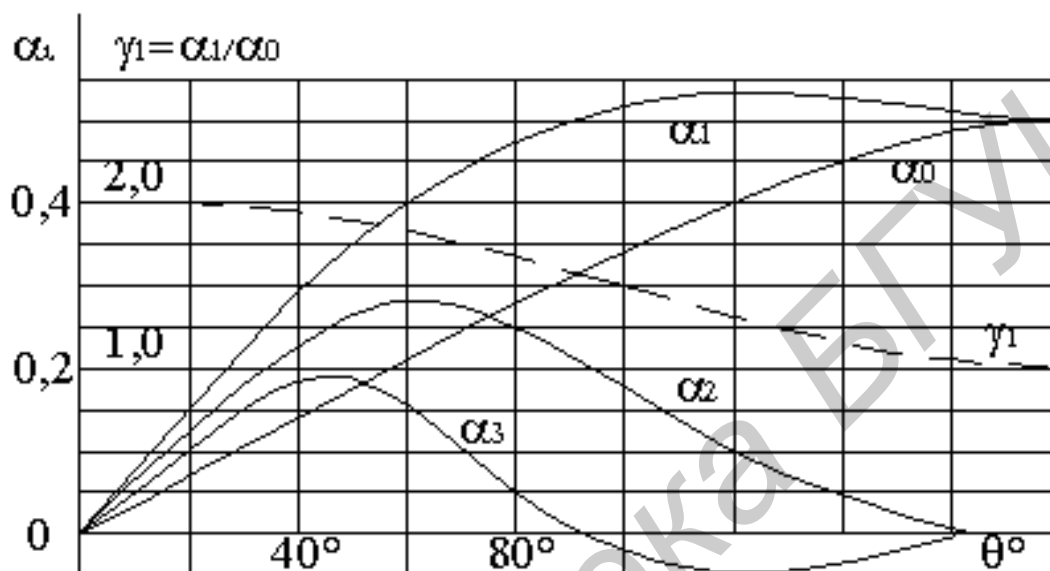


Рисунок 74 – Графики функции А. И. Берга

4.2.2 Методика расчета спектра выходного тока нелинейного усилителя

Таким образом, расчет спектра выходного тока усилителя, работающего с отсечкой, можно проводить в следующей последовательности:

- по заданной вольт-амперной характеристике и параметрам входного сигнала по (13) вычислим угол отсечки;
- по формуле (15) оценим величину I_m и значения коэффициентов А. И. Берга;
- по формулам (21)–(23) находим амплитуды спектральных составляющих.

Пример 1 Кусочно-линейная аппроксимация проходной характеристики транзистора определяется параметрами: крутизна линейной части $S = 10$ мА/В, напряжение, соответствующее точке излома, $U_H = 0,5$ В. К этому транзистору приложено напряжение $u = 0,5 + 2 \cos \omega t$, В. Оценить спектральный состав тока, протекающего через транзистор.

В соответствии с методикой расчета выходного тока нелинейного усилителя вычислим сначала величину угла отсечки. По формуле (13) имеем

$$\cos \theta = -\frac{SU_0 + I}{SU_m} = -\frac{10 \cdot 0,5 + (-5)}{10 \cdot 2} = 0,$$

откуда $\theta = 90^\circ$. По формуле (15) найдем величину $I_m = 20$ мА. По формулам (24)–(26) или по графикам, приведенным на рисунке 74, получаем $\alpha_0 = 0,32$, $\alpha_1 = 0,50$, $\alpha_2 = 0,20$, $\alpha_3 = 0$. По формулам (21)–(23) имеем $I_{0m} = 6,4$ мА, $I_{1m} = 10$ мА, $I_{2m} = 4,0$ мА, $I_{3m} = 0$.

Пример 2 По условию предыдущей задачи найти оптимальное значение смещения, обеспечивающее удвоение частоты входного сигнала.

Из графиков функций А. И. Берга видим, что оптимальным для удвоения частоты является режим усиления с углом отсечки $\theta = 60^\circ$, так как именно при этом угле отсечки вторая гармоника достигает максимального значения. Для расчета необходимой величины смещения составляем уравнение

$$\cos \theta = -\frac{SU_0 + I}{SU_m} = \frac{1}{2}.$$

Отсюда получаем $U_0 = -1,5$ В.

Пример 3 Во многих УКВ радиостанциях осуществляется умножение частоты в $2 \times 3 \times 3 = 18$ раз. Постройте эффективную схему умножителя, т. е. решите задачу построения структурной схемы умножителя частоты в 18 раз путем выбора самого благоприятного случая из $2 \times 3 \times 3$, $3 \times 3 \times 2$ и $3 \times 2 \times 3$.

4.3 Примерный расчет усилителя промежуточной частоты

Усилители промежуточной частоты (УПЧ) работают на частотах, непосредственно примыкающих к некоторой постоянной частоте $f_{пр}$, выбранной в качестве промежуточной. Они могут быть апериодическими и резонансными. Расчет таких усилителей не отличается принципиально от расчета апериодических или резонансных усилителей высокой частоты (УВЧ). Наиболее широкое применение получили УПЧ с полосовыми фильтрами (рисунок 75).

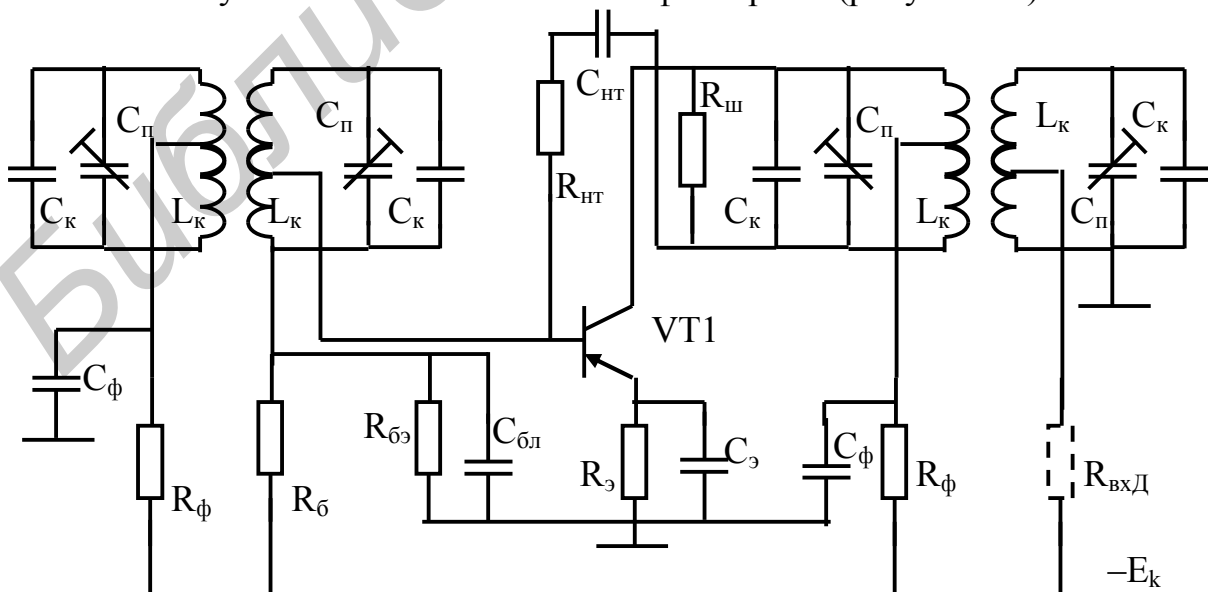


Рисунок 75 – Схема однокаскадного усилителя промежуточной частоты с двухконтурным полосовым фильтром

Пример 4 Произведем расчет однокаскадного усилителя промежуточной частоты, нагруженного на амплитудный диодный детектор, по следующим исходным данным: $U_{\text{вых Д}} = U_{\text{вх Д}} = 1$ В – входное напряжение детектора; $R_{\text{н}} = R_{\text{вх Д}} = 0,6$ кОм – сопротивление нагрузки; $F_{\text{в}} = 8$ кГц – максимальная частота модулирующего сигнала; $f_{\text{пр}} = 465$ кГц – промежуточная частота. Предполагается наличие ее одного полосового фильтра на входе УПЧ, т. е. $N = 2$ – число полосовых фильтров.

Решение: 1 Выбираем высокочастотный транзистор ГТ309А. Его основные данные: $h_{21э} = 45$; $f_{h21э} = 2,7$ МГц; $P_{\text{К max}} = 50$ мВт; $C_{\text{л}} = 10$ пФ; $r'_6 = 50$ Ом; $h_{11э} = 0,45$ кОм при $I_{\text{э}} \approx 5$ мА; $R_{\text{вых.э}} = 1/h_{22э} = 50$ кОм.

2 Проводим расчет полосовых фильтров. Требуемая полоса пропускания УПЧ определяется соотношением

$$2\Delta f_N = 2F_{\text{в}} = 2 \cdot 8 \text{ кГц} = 16 \text{ кГц}.$$

Для обеспечения этой полосы пропускания при использовании N фильтров полоса пропускания каждого контура в отдельности должна быть равна

$$2\Delta f = \frac{2\Delta f_N}{\sqrt{2\sqrt{2^{1/N}} - 1}} = \frac{f_{\text{пр}}}{Q_{\text{э}}}. \quad (27)$$

Формула (27) справедлива в случае критической связи между контурами:

$$\beta_{\text{кр}} = k_{\text{св}} \cdot Q_{\text{э}} = 1, \quad (28)$$

где $k_{\text{св}}$ – коэффициент связи между контурами.

При $N = 2$, $2\Delta f_N = 16$ кГц и $f_{\text{пр}} = 465$ кГц получаем значение добротности $Q_{\text{э}}$ каждого контура:

$$Q_{\text{э}} = \frac{f_{\text{пр}} \sqrt{2\sqrt{2^{1/N}} - 1}}{2\Delta f_N} = \frac{465 \sqrt{2\sqrt{2^{1/2}} - 1}}{16} = 33.$$

Для промежуточной частоты $f_{\text{пр}} = 465$ кГц емкости контуров целесообразно выбирать в пределах $C_{\text{к.общ}} = 200$ – 1000 пФ. Принимаем $C_{\text{к.общ}} = 500$ пФ.

Индуктивность контура

$$L_k = \frac{1}{(2\pi f_{\text{пр}})^2 C_{\text{к.общ}}} = \frac{1}{(6,28 \cdot 465 \cdot 10^3)^2 \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = 240 \text{ мкГн}.$$

Добротность одиночного ненагруженного контура может быть достаточно высокой. Принимаем ее равной 100, тогда резонансное сопротивление ненагруженного контура

$$R_{\text{к.рез}} = Q \cdot 2\pi f_{\text{пр}} \cdot L_k = 100 \cdot 6,28 \cdot 465 \cdot 10^3 \cdot 240 \cdot 10^{-6} = 70 \text{ кОм}.$$

Эквивалентное резонансное сопротивление нагруженного контура

$$R_{\text{к.э}} = R_{\text{к.рез}} \cdot Q_{\text{э}} / Q = 70 \cdot 33 / 100 = 24 \text{ кОм}.$$

Коэффициент подключения контура ко входу схемы находим по формуле

$$p_{\text{вх}} = \frac{w_{\text{св}}}{w_{\text{к}}} = \sqrt{\frac{R_{\text{вх.В}}}{R_{\text{к.рез}}} \left(\frac{Q_{\text{А}}}{Q_{\text{А}}} - 1 \right)}, \quad (29)$$

где $w_{\text{св}}$ – число витков катушки связи;

$w_{\text{к}}$ – число витков катушки контура;

$R_{к.рез} = Q_A 2\pi f_{нec \ min} L_K$ – резонансное сопротивление ненагруженного контура;
 $R_{вх.В} = 1$ кОм – входное сопротивление первого каскада УВЧ (задаем ориентировочно).

Используя формулу (29), вычислим коэффициент подключения второго контура полосового фильтра к нагрузке:

$$p_{2n} = \sqrt{\frac{R_{вх.Д}}{R_{к.рез}} \left(\frac{Q}{Q_0} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{0,6}{70} \left(\frac{0,6}{70} - 1 \right)} = 0,132.$$

Находим эквивалентное шунтирующее сопротивление, которое следует подключить к первому контуру полосового фильтра, чтобы его добротность была равна 33.

$$R_{ш.э} = \frac{R_{к.рез} R_{к.э}}{R_{к.рез} - R_{к.э}} = \frac{70 \cdot 24}{70 - 24} = 33,5 \text{ кОм}.$$

Следует учесть, что при критической связи между контурами действительное резонансное сопротивление первого контура будет в два раза меньше $R_{к.э}$, т.е. $R'_{к.э} = R_{к.э} / 2 = 12$ кОм. Определим коэффициент включения первого контура в цепь коллектора, обеспечивающий устойчивую работу резонансного каскада УПЧ. Полагая $K'_{max} = 30$, находим требуемое сопротивление в коллекторной цепи для переменного тока:

$$R'_H - \frac{K'_{max} R_{вх.э}}{h_{21э}} = \frac{30 \cdot 0,45}{45} = 0,3, \text{ кОм},$$

следовательно,

$$p_{1ввых} = \sqrt{R'_H / R'_{к.э}} = \sqrt{0,3 / 12} = 0,158.$$

Оценим шунтирующее действие выхода транзистора на первый контур:

$$R'_{ввых.э} \approx R_{ввых.э} / p_{1ввых}^2 = 50 / 0,158^2 \approx 2 \text{ МОм} \gg R_{ш.э} = 33,5 \text{ кОм}.$$

Шунтирующее действие транзистора незначительно, поэтому $R_{ш} = 33,5$ кОм (33 кОм).

3 Действительный коэффициент усиления схемы

$$K = K'_{max} p_{2н} / p_{1ввых} = 30 \cdot 0,132 / 0,158 \approx 25.$$

Входное напряжение

$$U_{вхП} = U_{ввыхП} / K = 1 / 25 = 0,04, \text{ В}.$$

4 Выполним расчет режима транзистора по постоянному току. Максимальное значение амплитуды напряжения в коллекторной цепи с учетом коэффициента модуляции $m = 0,3$:

$$U_{КЭm \ max} = (1 + m) m_{ввыхП} p_{1ввых} = 1,3 \cdot 1 \cdot 0,158 / 0,132 = 1,56 \text{ В}.$$

Максимальная амплитуда тока коллектора

$$I_{Кm \ max} = U_{КЭm \ max} / R'_H = 1,56 / 0,3 = 5,2 \text{ мА}.$$

Соответственно принимаем

$$I_K = I_{Кm \ max} / k_0 = 5,2 / 0,85 \approx 6 \text{ мА},$$

$$|U_{КЭ}| \geq U_{КЭm \ max} + |U_{КЭmin}| = 1,56 + 1 = 2,56 \text{ В}.$$

Производим проверку режима транзистора по мощности

$$P_K = I_{КП} |U_{КЭП}| = 6 \cdot 3 = 18 \text{ мВт} < P_{К\text{max}} = 50 \text{ мВт}.$$

5 Элементы схемы, определяющие режим работы транзистора по постоянному току, сопротивление температурной стабилизации R_τ , сопротивление фильтров R_ϕ , емкости C_ϕ и C_τ , а также значение E_K , рассчитываются как для обычных усилителей по методике, изложенной выше.

Емкость конденсатора C_K полосового фильтра:

$$C_K = C_{K\text{общ}} - (C_M + C_L + p_{\text{вых}}^2 C_{\text{вых.э}} + C_\Pi),$$

где $C_M = 5 \text{ пФ}$; $C_L = 10 \text{ пФ}$; $C_{\text{вых.э}} = C_K(h_{21э} + 1) = 10 \cdot 46 = 460 \text{ пФ}$; $C_\Pi = 5\text{--}50 \text{ пФ}$. Следовательно, $C_K = 500 - (5 + 10 + 0,158^2 \cdot 460 + 25) \approx 450 \text{ пФ}$ (430 пФ).

Данная емкость при регулировке усилителя нуждается в соответствующем подборе, так, чтобы с помощью подстроечного конденсатора можно было бы настроить контур на частоту $f_{\text{пр}} = 465 \text{ кГц}$.

Для получения устойчивого усиления УПЧ ($K'_{\text{max}} = U_{КЭм}/U_{КБм} > 30$) следует применить цепочку нейтрализации обратной связи транзистора, состоящую из $C_{\text{нт}}$ и $R_{\text{нт}}$.

Имеем

$$C_{\text{нт}} = \frac{p_{1\text{вых}} C_K}{1 - p_{1\text{вых}}} \left[1 + \frac{1}{(2\pi f_{\text{пр}} C_K R'_{Kэ})^2} \right] \approx \frac{p_{1\text{вых}} C_K}{1 - p_{1\text{вых}}} = \frac{0,158 \cdot 10}{1 - 0,158} \approx 1,9 \text{ пФ} \text{ (2 пФ)},$$

$$R_{\text{нт}} \approx \frac{(1 - p_{1\text{вых}}) R'_{12э}}{p_{1\text{вых}} [1 + (2\pi f_{\text{пр}} C_K R'_{12э})^2]} = \frac{(1 - 0,158) \cdot 4,6 \cdot 10^6}{0,158 \cdot [1 + (6,28 \cdot 465 \cdot 10 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3})^2]} = 159 \text{ кОм},$$

где $R'_{12э} \approx 1/g_{12э} \approx 2(h_{21э} + 1)/h_{22э} = 2 \cdot 46 \cdot 50 \cdot 10^{-2} = 4,6 \text{ МОм}$ – сопротивление внутренней обратной связи транзистора. Принимаем $R_{\text{нт}} = 160 \text{ кОм}$.

При настройке усилителя требуется тщательный подбор $C_{\text{нт}}$ и $R_{\text{нт}}$ не по номинальному значению, а по эффекту нейтрализации обратной связи.

Качественно выполненная нейтрализация обратной связи позволяет увеличить коэффициент усиления каскада УНЧ в несколько раз. Это достигается увеличением коэффициента включения первого контура в коллекторную цепь транзистора.

В полосовых фильтрах вместо трансформаторной связи между контурами полосового фильтра (рисунок 75) можно применить внешнеемкостную связь (рисунок 76). Для обеспечения критической связи между контурами в соответствии с формулой (28):

$$k_{\text{св}} \approx \frac{C_{\text{св}}}{C_{K\text{общ}}} = \frac{1}{Q_э}$$

емкость конденсатора связи должна быть

$$C_{\text{св}} \approx \frac{C_{K\text{общ}}}{Q_э} = \frac{500}{23} = 15,2 \text{ пФ}.$$

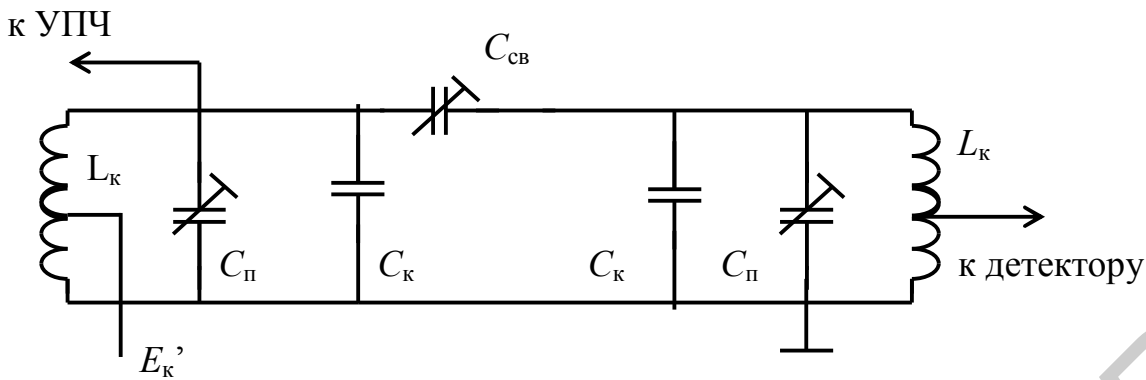


Рисунок 76 – Схема полосового фильтра с внешнеемкостной связью

Подстроечный конденсатор $C_{\text{п}} = C_{\text{св}}$ позволит в процессе отладки схемы установить точную критическую связь.

4.4 Графическое определение стационарной амплитуды генерируемых колебаний. Устойчивость стационарной амплитуды

4.4.1 Метод средней крутизны

Поставим задачу – найти амплитуду переменного напряжения, действующего на базе транзистора в стационарном режиме. Процесс стационарности описывается основным уравнением генератора:

$$S_{\text{ср}} \geq \frac{1}{(k_{\text{о.с}} - D)Z_k}. \quad (30)$$

Отсюда по известным элементам схемы можно найти необходимую величину $S_{\text{ср}}$, но из этого условия нельзя найти амплитуду напряжения на базе транзистора. Однако $S_{\text{ср}}$ является величиной постоянной в течение одного периода напряжения на базе, т. е. существует зависимость

$$S_{\text{ср}} = f(U_b). \quad (31)$$

Эту зависимость легко построить. Решим задачу качественно. Зависимость (31) имеет вид для мягкого и жесткого режимов, показанный на рисунке 77.

Для решения вопроса о величине стационарной амплитуды наносим на графике средней крутизны прямые линии обратной связи, т. е. решаем графически систему, состоящую из уравнений (30) и (31). Точка пересечения этих зависимостей определяет величину стационарной амплитуды и среднюю крутизну в установившемся режиме автоколебаний.

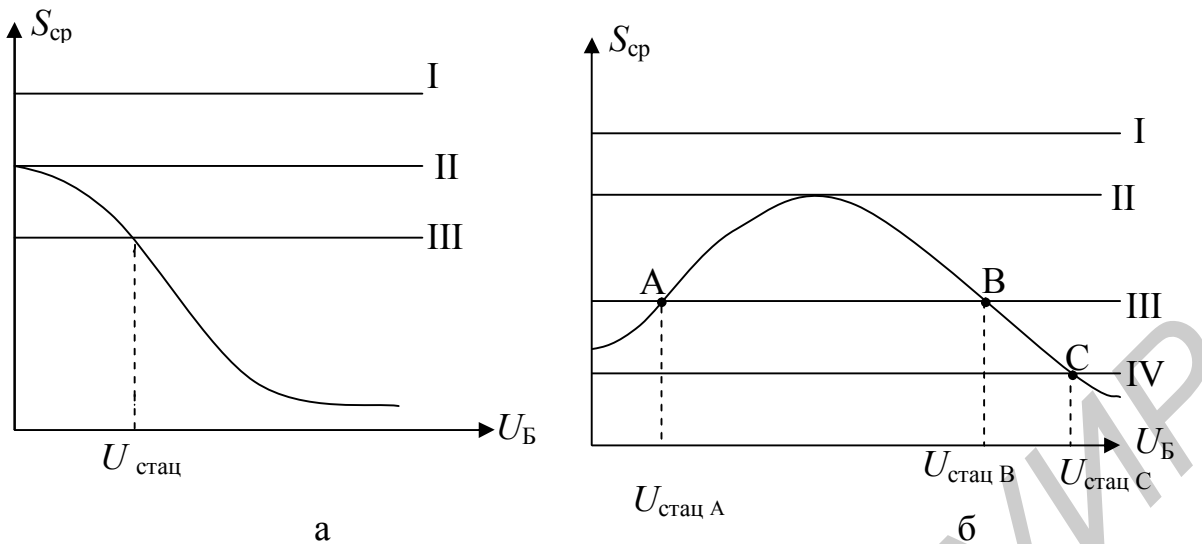


Рисунок 77 – Зависимость средней крутизны от напряжения возбуждения в мягком (а) и жестком (б) режимах

Пример 5 По данной проходной характеристике транзистора (рисунок 78) построить кривую средней крутизны для генератора, работающего в мягком и жестком режимах.

Итак, допустим, что мы получили экспериментально данные для построения графика проходной характеристики транзистора, по которым составили таблицу 6.

Таблица 6

$U_B, В$	0,0	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6
$I_K, мА$	0,0	0,5	2,0	3,0	6,0	9,0	10,0	11,0	11,0

По данным таблицы 6 построим график проходной характеристики, показанный на рисунке 78. Мягкий режим автогенератора будет соответствовать

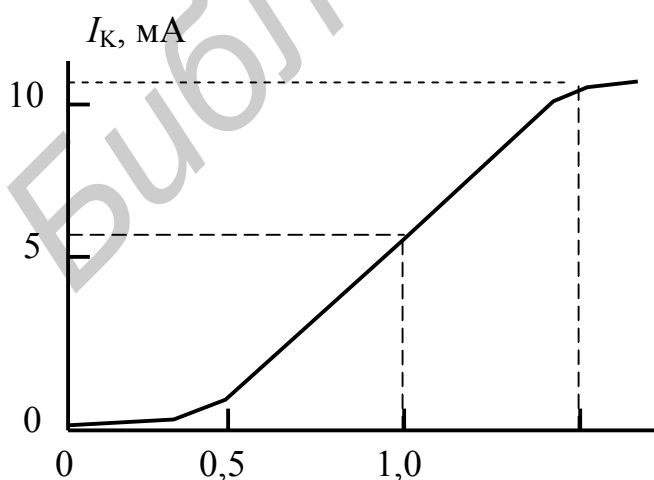


Рисунок 78 – График проходной характеристики транзистора

положению рабочей точки на проходной характеристике с координатами (1, 6). Для этого случая проведем расчет значений средней крутизны. Поскольку значения средней крутизны определяются отношением амплитуды первой гармоники коллекторного тока к амплитуде переменного напряжения, действующего на базе транзистора, то расчет проведем следующим образом. Сначала найдем амплитуду коллекторного тока для

различных величин напряжения, действующего на базе транзистора, а затем вычислим соответствующие значения средней крутизны.

Итак, имеем:

$$I_{m1}(0,2) = (I_{\max} - I_{\min})/2 = (9 - 6)/2 = 3 \text{ мА}, S(0,2) = I_{m1}/U_B = 3/0,2 = 15 \text{ мА/В}.$$

Для других значений базового напряжения получим

$$I_{m1}(0,3) = 4 \text{ мА}, S(0,3) = 13,3 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(0,5) = 5 \text{ мА}, S(0,5) = 10 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(0,7) = 5,5 \text{ мА}, S(0,7) = 8 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(0,9) = 5,5 \text{ мА}, S(0,9) = 6 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(1,1) = 5,5 \text{ мА}, S(1,1) = 5 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(1,2) = 5,5 \text{ мА}, S(1,2) = 4,5 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(1,3) = 5,5 \text{ мА}, S(1,3) = 4 \text{ мА/В}.$$

По результатам расчета построим график средней крутизны для мягкого режима работы автогенератора (рисунок 79).

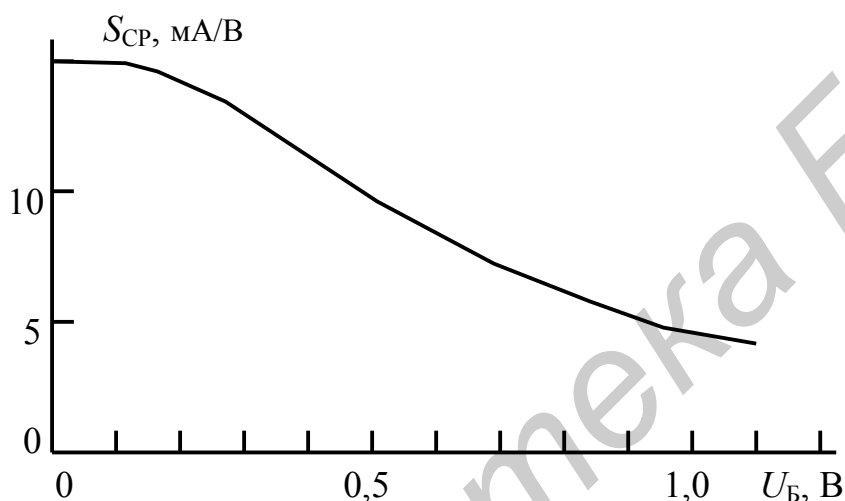


Рисунок 79 – Кривая средней крутизны для мягкого режима работы автогенератора

Теперь перейдем к получению данных для построения кривой средней крутизны для жесткого режима автогенератора. Выберем положение рабочей точки на проходной характеристике транзистора с координатами (0,5; 0,5), расположенной на нижнем изгибе проходной характеристики транзистора. Расчет значений средней крутизны проведем

аналогично той последовательности действий, которую мы избрали при расчете кривой средней крутизны для мягкого режима, т. е. рассчитаем значения величины амплитуды первой гармоники коллекторного тока, а затем вычислим значения кривой средней крутизны для выбранных значений амплитуды переменного напряжения, действующего на базе транзистора.

Итак, при напряжении $U_B = 0,2 \text{ В}$ имеем

$$I_{m1}(0,2) = (I_{\max} - I_{\min})/2 = (2 - 0)/2 = 1 \text{ мА}, S(0,2) = I_{m1}/U_B = 1/0,2 = 5 \text{ мА/В}.$$

Продолжая расчеты по этим же формулам, получим

$$I_{m1}(0,3) = 1,5 \text{ мА}, S(0,3) = 5 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(0,5) = 3 \text{ мА}, S(0,5) = 6 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(0,7) = 4,5 \text{ мА}, S(0,7) = 7 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(1,0) = 5,5 \text{ мА}, S(1,0) = 5,5 \text{ мА/В};$$

$$I_{m1}(1,6) = 5,5 \text{ мА}, S(1,6) = 3,5 \text{ мА/В}.$$

По полученным данным построим график кривой средней крутизны для жесткого режима автогенератора, показанный на рисунке 80. Видим, что в жестком режиме этот график действительно имеет экстремум. Кроме того, общее поведение графика свидетельствует о значительно меньшей величине средней крутизны в жестком режиме по сравнению с величиной средней крутизны в мягком режиме. Следует обратить внимание на расчет амплитуды первой гармоники коллекторного тока в жестком режиме. В этом случае гармоническое напряжение сильнее искажается, чем в мягком режиме. Однако благодаря фильтрующему действию колебательного контура эти искажения, представляющие собой высшие гармоники базового напряжения, не будут существенным образом влиять на форму генерируемых автогенератором гармонических колебаний.

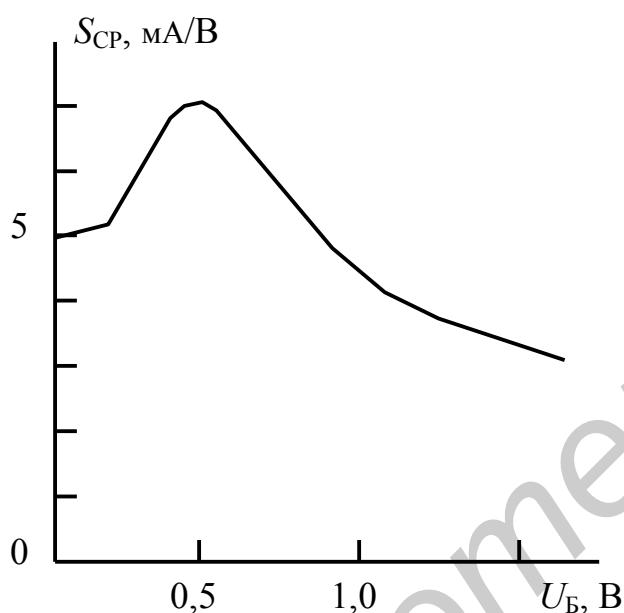


Рисунок 80 – График кривой средней крутизны для жесткого режима работы автогенератора

Графики полученных зависимостей являются основными при расчете амплитуды стационарных колебаний в схеме автогенератора. Для расчета амплитуды стационарных колебаний нужно построить на графике средней крутизны прямые на основании рассчитанных значений средней крутизны из основного неравенства генератора. Эти значения соответствуют значениям средней крутизны, которые устанавливаются в схеме генератора при стационарной амплитуде генерируемых колебаний. Если график средней крутизны пересечется с прямой, соответствующей значению средней крутизны, то координаты точки пересечения и дадут ответ на вопрос о

величине стационарной амплитуды генерируемых колебаний.

Пример 6 Найти выражение для средней крутизны, если характеристику транзистора можно аппроксимировать полиномом третьей степени:

$$I_K = a_0 + a_1 U_б + a_3 U_б^3.$$

Определить в общем виде знак коэффициента a_3 , исходя из условия: при росте амплитуды напряжения, действующего на базе транзистора, крутизна характеристики должна уменьшаться.

Полученную формулу для средней крутизны изобразить в виде графика и определить границы изменения амплитуды $U_б$, в которых эта формула имеет смысл.

Если к базе транзистора приложено напряжение $U_б = U_m \cos \omega t$, то для коллекторного тока получим

$$I_K = a_0 + a_1 U_m \cos \omega t + a_3 (U_m \cos \omega t)^3 = a_0 + (a_1 U_m + 3a_3 U_m^3/4) \cos \omega t + (a_3 U_m/4) \cos 3\omega t,$$

откуда для первой гармоники коллекторного тока получаем

$$I_{m1} = a_1 U_m + 3a_3 U_m^3.$$

Теперь вычислим среднюю крутизну как отношение амплитуды первой гармоники коллекторного тока к амплитуде напряжения, действующего на базе транзистора:

$$S_{CP} = I_{m1}/U_m = a_1 + 3a_3 U_m^2/4 = a_1 - 3|a_3|U_m^2/4.$$

Из полученного выражения видно, что коэффициент a_3 должен быть отрицательным. График зависимости средней крутизны от напряжения, действующего на базе транзистора, показан на рисунке 80. Практически средняя крутизна при увеличении амплитуды всегда стремится к нулю. Найдем величину напряжения, при котором средняя крутизна обращается в нуль. Для этого составим уравнение

$$S_{CP} = a_1 - 3a_3 U_0^2/4 = 0.$$

Отсюда получаем: $U_0 = (4a_1/3a_3)^{0,5}$.

Пример 7 Условие самовозбуждения транзисторного генератора с контуром в цепи базы имеет вид $S_{CP} > RC/M$. Найти величину амплитуды стационарных колебаний, действующих на базе транзистора, если характеристику транзистора можно аппроксимировать полиномом третьей степени $I_K = a_0 + a_1 u_B - a_3 u_B^3$.

Уравнение стационарности в данном случае имеет вид

$$S_{CP} = a_1 - 3a_3 U_B^2/4 = RC/M,$$

откуда получаем

$$U_{B\text{ст}} = 2((a_1 - RC/M)/3a_3)^{0,5}.$$

4.4.2 Метод колебательных характеристик

Колебательной характеристикой называется зависимость амплитуды первой гармоники коллекторного тока от амплитуды переменного напряжения на базе транзистора. Эта зависимость снимается при разомкнутой обратной связи, т. е. когда генератор работает в режиме независимого возбуждения (как усилитель):

$$I_k = f(U_b). \quad (32)$$

Средняя крутизна за период

$$S_{cp} = I_k/U_b. \quad (33)$$

Тогда с учетом (30) имеем

$$I_k = U_b/(k_{o.c} - D)Z_k. \quad (34)$$

Решая систему, составленную из уравнений (32) и (34), легко определить амплитуду стационарных колебаний. Графики колебательных характеристик для мягкого и жесткого режимов приведены на рисунке 81.

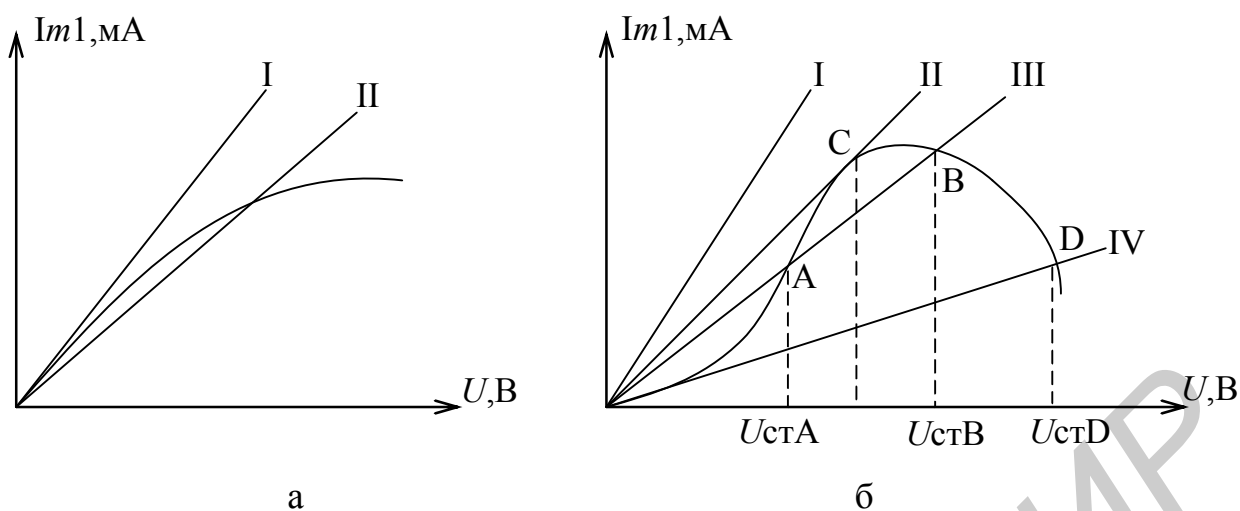


Рисунок 81 – Определение амплитуды стационарных колебаний методом колебательных характеристик

Уравнение (34) называется уравнением прямой обратной связи. Относительно графиков колебательных характеристик графики прямой обратной связи могут занимать различное положение. Характерно, что в случае двух стационарных амплитуд одна из них оказывается неустойчивой. Чтобы определить, какая из стационарных амплитуд является устойчивой, воспользуемся критерием устойчивости. Если систему вывести из состояния равновесия, и она вернется в прежнее состояние, тогда такую систему будем называть устойчивой. Применяя этот критерий, приходим к выводу о том, что U_A является неустойчивой, а U_B – устойчивой стационарной амплитудой.

Пример 8 По данным о проходной характеристике транзистора, приведенным в условии предыдущей задачи, построить колебательные характеристики для генератора, работающего в мягком и жестком режимах. Разобраться в механизме расчета стационарной амплитуды генерируемых колебаний по полученным колебательным характеристикам.

4.5 Примерный расчет мультивибратора

Наиболее широко распространенная схема мультивибратора на транзисторах $p-n-p$ с временными диаграммами напряжений для случая несимметричной схемы приведена на рисунке 82, а на рисунке 83 приведена схема мультивибратора с управляемым смещением. Выходными напряжениями мультивибратора являются напряжения, формирующиеся на коллекторах транзисторов, использующихся в схеме.

Пример 9 Методику расчета мультивибратора рассмотрим на примере, когда требуется рассчитать элементы схемы несимметричного мультивибратора, у которого выходным является напряжение, снимаемое с коллектора транзистора VT1. Исходные данные: амплитуда положительного импульса равна 12 В, длительность импульса равна 10 мкс, длительность фронта не превышает 1,0 мкс, длительность среза не более 2,0 мкс, период следования $T = 40$ мкс, сопротивление нагрузки равно 2 кОм, максимальная температура окружающей среды равна $+40^\circ\text{C}$.

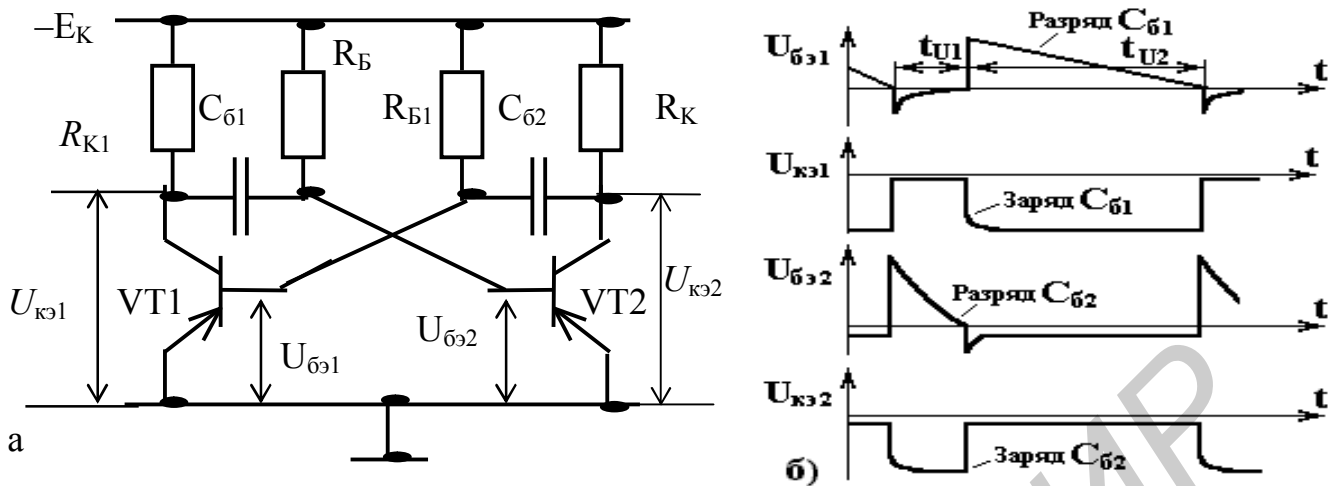


Рисунок 82 – Схема мультивибратора (а) и временные диаграммы напряжений мультивибратора (б)

1 Выбор типа транзистора. Транзистор можно выбирать по предельной частоте $f_{h21Б}$, максимально допустимому напряжению $U_{Кб\max}$ и статическому коэффициенту передачи по току $h_{21Э}$.

Так как скважность определяется выражением

$$Q = 1 + 0,23h_{21Э}/K_{нас},$$

то транзистор должен иметь коэффициент передачи по току, определяемый выражением

$$h_{21Э} = (Q - 1)K_{нас}/0,23. \quad (35)$$

Необходимое значение предельной частоты выбираемого транзистора $f_{h21Б}$ находится исходя из следующих соображений.

Малое значение длительности фронта импульса

$$t_{ф2} = \tau'_\alpha \approx \tau_\alpha + R_k C_k$$

получится в том случае, если постоянная времени заряда емкости C_1 отвечает условию $R_k C_1 \geq (5-10)\tau'_\alpha$. Обычно $\tau_\alpha \gg R_k C_k$, и поэтому можно принять $R_k C_1 \approx 10 \tau_\alpha$.

Так как $R_k = R_B K_{нас}/h_{21Э}$, то $R_B C_1 K_{нас}/h_{21Э} \approx 10 \tau_\alpha$. Но $t_{и1} \approx 0,7R_B C_1$, и поэтому

$$t_{и1} K_{нас} / 0,7 h_{21Э} \approx 10 \tau_\alpha \approx 10/2\pi f_{h21Б}.$$

Используя выражение для $h_{12Э}$, после преобразований получаем

$$f_{h21Б} \geq 5(Q - 1)/t_{и1}. \quad (36)$$

В нашем примере скважность импульса $Q = T/t_{и1} = 40/10 = 4$ и требуемое значение

$$f_{h21Б} \geq 5(Q - 1)/t_{и1} = 5 \cdot 3/10 \cdot 10^{-5} = 1,5 \text{ МГц.}$$

Необходимое выражение источника питания

$$E_k = (1,1-1,2)U_{к1н} = (1,1-1,2) \cdot 12 = 13,2-14,4, \text{ В.}$$

Принимаем $E_k = 14$, В. Тогда $U_{КБ\ max} \geq 2E_k = 2 \cdot 14 = 28$, В. Коэффициент передачи тока вычисляем по формуле (35). Коэффициент насыщения $K_{нас}$ в мультивибраторе выбирают в пределах от 2 до 3. Меньшее значение брать нежелательно, так как увеличивается длительность фронта импульса, а при большом значении сильно возрастает длительность импульса за счет времени рассасывания. Таким образом, устанавливаем

$$h_{21Э} \geq (4 - 1) \cdot 2 / 0,23 = 26.$$

По рассчитанным параметрам выбираем транзистор МП20А, у которого $U_{КБ\ max} = 30$ В; импульсный ток коллектора $I_{Кн} = 300$ мА; обратный ток коллектора $I_{КБ0} = 50$ мкА; $f_{h12Б} = 2,0$ МГц; $h_{21Э} = 50-150$; наибольшая температура коллекторного перехода $t_{k\ max}^0 = +85^\circ\text{C}$.

2 Сопротивление резистора выбираем исходя из требования

$$R_k \geq U_{Кн} / I_{К\ нас}. \quad (37)$$

Ток насыщения коллектора $I_{К\ нас}$ определяется с учетом температуры окружающей среды по выражению

$$I_{Кнас} \leq I_{Кн} \sqrt{\frac{t_{k\ max}^0 - t_{окр}^0}{t_{k\ max}^0 - 20^0}} = 300 \sqrt{\frac{70 - 40}{70 - 20}} \approx 232 \text{ мА}, \quad (38)$$

$$R_k \geq 12 / 232 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Минимально допустимое значение выбирать не стоит, так как при этом режим работы мультивибратора будет неэкономичным. С другой стороны, при малом сопротивлении резистора R_k уменьшается длительность среза импульса и увеличивается нагрузочная способность схемы. Поэтому на данном этапе расчета R_k можно выбирать из условия $R_k = (0,1-0,15)R_n$ и после расчета емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$ произвести проверку – удовлетворяется ли заданное значение t_{C1} . Так как $R_n = 2$ кОм, то $R_n = (0,1-0,15) \cdot 2 \cdot 10^3 = 200-300$ Ом. Принимаем $R_k = 270$ Ом.

3 Сопротивление резистора R_B определяется из условия режима насыщения открытого транзистора. Поэтому

$$R_k < h_{21Э} R_k / K_{нас} = 50 \cdot 270 = 6750 \text{ Ом (6,8 кОм)}.$$

4 Проверяем выполнение условия температурной стабильности схемы. Имеем

$$I_{КБ0\ max} = I_{КБ0} \cdot 2^{\frac{t_{окр}^0 - 20^0}{10^0}} = 50 \cdot 2^{\frac{40 - 20}{10}} \approx 200 \text{ мкА},$$

$$\frac{I_{КБ0\ max} R_B}{E_k} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 6,8 \cdot 10^3}{14} = 0,097 \ll 1.$$

На основании полученного неравенства можно не учитывать влияние обратного тока коллектора на длительность и период следования импульсов.

5 Вычислим величины емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$. Так как с учетом предыдущего пункта $t_{и1} \approx 0,7R_B C1$ и $t_{и2} \approx 0,7R_B C2$, то

$$C1 \approx \frac{t_{и1}}{0,7R_B} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 6,8 \cdot 10^3} = 2100 \text{ пФ};$$

$$C2 \approx \frac{t_{и2}}{0,7R_{\text{Б}}} = \frac{T - t_{и1}}{0,7R_{\text{Б}}} = \frac{(40 - 10) \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 6,8 \cdot 10^3} = 6300 \text{ пФ}.$$

Требуемая емкость конденсатора $C1$ получается при параллельном соединении емкостей 2000 и 100 пФ, а конденсатора $C2$ – 6200 и 100 пФ.

6 Проверяем длительности фронта и среза импульса $t_{\phi 1}$ и t_{c1} , $t_{\phi 2}$ и t_{c2} :

$$t_{\phi 1} \approx t_{\phi 2} \approx 2\tau_{\alpha} \approx 2 \frac{0,16}{f_{h21Б}} \approx 2 \frac{0,16}{2 \cdot 10^6} = 0,16 \text{ мкс};$$

$$t_{c1} \approx 2,3R_{\text{К}}C1 \approx 2,3 \cdot 270 \cdot 2100 \cdot 10^{-12} = 1,3 \text{ мкс};$$

$$t_{c2} \approx 2,3R_{\text{К}}C2 \approx 2,3 \cdot 270 \cdot 6300 \cdot 10^{-12} = 3,0 \text{ мкс}.$$

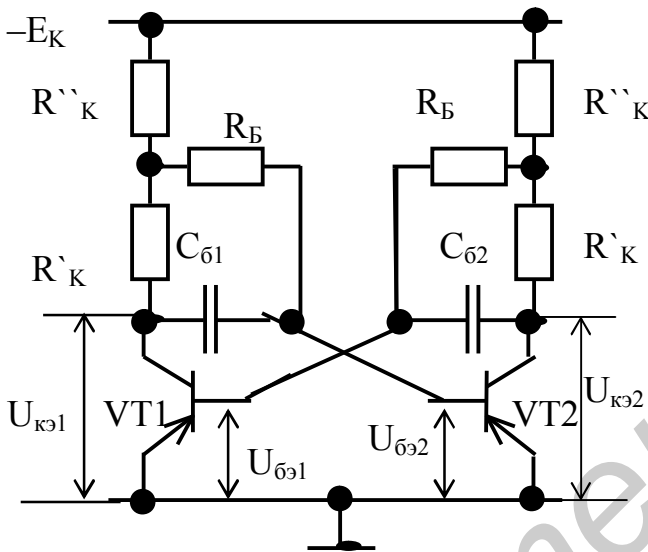


Рисунок 83 – Схема мультивибратора с управляемым смещением

Таким образом, полученные значения $t_{\phi 1}$ и t_{c1} не превышают заданных.

Недостатком рассмотренного мультивибратора является возможность жесткого самовозбуждения, т. е. такого режима, при котором мультивибратор не будет генерировать колебания после включения источника питания. Это происходит вследствие того, что оба транзистора окажутся в режиме насыщения, и условие развития регенеративного процесса не будет выполняться.

Для исключения жесткого самовозбуждения необходимо использовать такую связь между каскадами, при которой транзисторы после включения не заходят в режим насыщения.

Этим условиям удовлетворяет мультивибратор с управляемым смещением (см. рисунок 83), временные диаграммы которого не отличаются от изображенных на рисунке 82.

Оставим те же исходные данные и произведем выбор элементов схемы мультивибратора.

7 Выбор транзистора производится так же, как и в схеме, приведенной на рисунке 82, поэтому будем использовать тот же самый транзистор МП20А.

8 Найдем сопротивление резистора $R_{\text{К}}$. Сопротивление резистора выбираем исходя из требования $R_{\text{К}} \geq U_{\text{КН}}/I_{\text{Кнас}}$, т. е. точно такие же, как и в схеме, рассмотренной выше. Точно по тем же соображениям принимаем $R_{\text{К}} = 270 \text{ Ом}$.

9 Определяем сопротивления резисторов $R'_{\text{К}}$ и $R''_{\text{К}}$. Выбираем отношение $d = R'_{\text{К}}/R_{\text{К}}$. Для обеспечения лучшего режима самовозбуждения необходимо выбирать отношение d как можно меньше. Однако при малых d возрастает тем-

пературная нестабильность временных параметров мультивибратора. Обычно $d = 0,4-0,6$. Задаемся $d = 0,5$ и находим $R'_K = dR_K = 0,5 \cdot 270 = 135$ Ом. Выбираем $R'_K = R''_K = 130$ Ом.

10 Расчет сопротивления резисторов R_B . Для создания мягкого режима самовозбуждения необходимо, чтобы $R_B > dh_{21Э}(R'_K + R''_K)$, т. е.

$$R_B = \frac{h_{21Э}(R'_K + R''_K)}{K_{нас}} = \frac{2 \cdot (130 + 130)}{2} = 2,6 \text{ кОм}.$$

Так как полученное значение R_B не удовлетворяет условию мягкого самовозбуждения, то выбираем $R_B = 3,0$ кОм и проверяем условие насыщения, которое должно выполняться для получения плоской вершины импульса:

$$K_{нас} = \frac{h_{21Э}(R'_K + R''_K)}{R_B} = \frac{20 \cdot (130 + 130)}{3 \cdot 10^3} \approx 1,7.$$

Полученное значение коэффициента насыщения обеспечивает хорошую форму вершины положительного импульса.

В тех случаях, когда $K_{нас}$ окажется близким к единице, необходимо изменить значение d и сделать пересчет сопротивлений резисторов.

11 Вычислим емкости конденсаторов $C1$ и $C2$:

$$C1 = \frac{t_{н1}}{R_B \ln\left(2 + \frac{R''_K}{R'_K}\right)} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^3 \cdot \ln\left(2 + \frac{130}{130}\right)} = 3030 \text{ пФ};$$

$$C2 = \frac{T - t_{н1}}{R_B \ln\left(2 + \frac{R''_K}{R'_K}\right)} = \frac{(40 - 10) \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^3 \cdot \ln\left(2 + \frac{130}{130}\right)} = 9090 \text{ пФ}.$$

Выбираем $C1 = 3000$ пФ и $C2 = 9100$ пФ.

12 Проверим длительности среза импульса:

$$t_{c1} \approx 2,3(R'_K + R''_K)C1 = 2,3 \cdot (130 + 130) \cdot 3000 \cdot 10^{-12} = 1,8 \text{ мкс};$$

$$t_{c2} \approx 2,3(R'_K + R''_K)C2 = 2,3 \cdot (130 + 130) \cdot 9100 \cdot 10^{-12} = 5,5 \text{ мкс}.$$

13 Длительности фронта импульсов определяются так же, как и в схеме мультивибратора, приведенной на рисунке 82.

4.6 Устройство выборки и хранения (Save and Hold, S&H)

Пример 10 Структурная схема устройства выборки и хранения (УВХ) показана на рисунке 84. Сопротивление резистора R включает величины внутренних сопротивлений источника дискретного сигнала $s(kT)$ и электронных ключей ЭК1 и ЭК2 и составляет 20 Ом. Время срабатывания ЭК1 при включении и выключении не учитывается. При замыкании ключа ЭК2 время обнуления напряжения $u_C(t)$ на емкости C также не учитывается.

Отсчетный импульс $s(kT)$ запоминается в интегрирующей RC -цепи на время $T_{ср}$, необходимое для срабатывания АЦП. Это время должно быть менее длительности периода сигнала дискретизации, равной $T = 10$ мкс.

Рассчитать величину емкости, входящей в запоминающее устройство, обеспечивающее требуемую точность измерения сигнала $s(kT)$ за время $\tau_0 = 100$ нс (ошибка не более 1 %) и удержание измеренного напряжения в течение времени $T_{\text{ср}} = 8$ мкс на уровне не ниже 95 % от первоначального значения.

Оценить величину суммарного сопротивления R_{Σ} , обеспечивающего удержание измеренного напряжения.

Проиллюстрировать временными диаграммами процесс восстановления и хранения сигнала $s_{\text{ВЫХ}}(t)$ по его выборкам $s(kT)$.

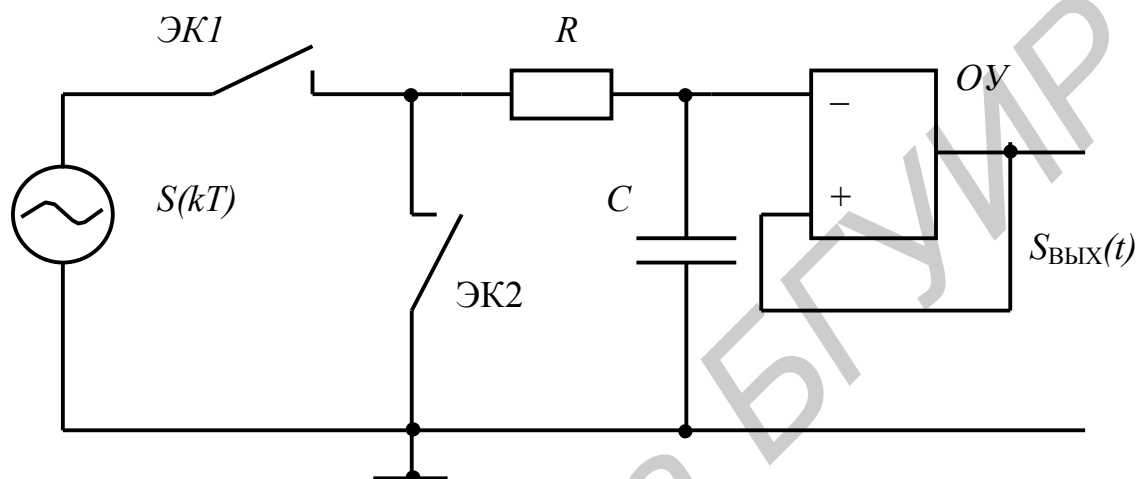


Рисунок 84 – Схема устройства выборки и хранения (S&H)

Решение. При замкнутом ЭК1 (ЭК2 при этом разомкнут) постоянная времени цепи заряда конденсатора

$$\tau_{\text{зар}} = RC$$

должна отвечать условию

$$1 - e^{-\frac{\tau_{\text{зар}}}{\tau_0}} \geq 0,99,$$

откуда

$$\frac{\tau_{\text{зар}}}{\tau_0} \leq \frac{1}{\ln 100} \approx 0,2.$$

Это условие позволяет получить для величины емкости C :

$$C \approx \frac{0,2 \cdot \tau_0}{R} = \frac{0,2 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{20} = 10^{-9} \text{ Ф} = 1,0 \text{ нФ}.$$

При размыкании электронного ключа ЭК1 (ЭК2 при этом также разомкнут) постоянная времени цепи разряда $\tau_{\text{разр}}$ конденсатора $C = 1$ нФ определяется суммарным сопротивлением R_{Σ} , состоящим из сопротивлений $R_{\text{ЭК1}}$ и $R_{\text{ЭК2}}$ разомкнутых электронных ключей ЭК1 и ЭК2 соответственно и входного сопротивления $R_{\text{вх.ОУ}}$ операционного усилителя:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{ЭК1}} // R_{\text{ЭК2}} // R_{\text{вх.ОУ}}$$

должна отвечать условию

$$e^{-\frac{T_{\text{cp}}}{\tau_{\text{разр}}}} \geq 0,95,$$

откуда следует

$$\frac{T_{\text{cp}}}{\tau_{\text{разр}}} \approx 0,05.$$

Следовательно, R_{Σ} должно отвечать неравенству

$$R_{\Sigma} \geq \tau_{\text{разр}} / C = \frac{T_{\text{cp}}}{0,05 \cdot C} \approx 160 \text{ кОм.}$$

Используя результаты проведенных расчетов, можно построить временные диаграммы напряжений, действующих в рассмотренной схеме выборки и хранения (рисунок 85).

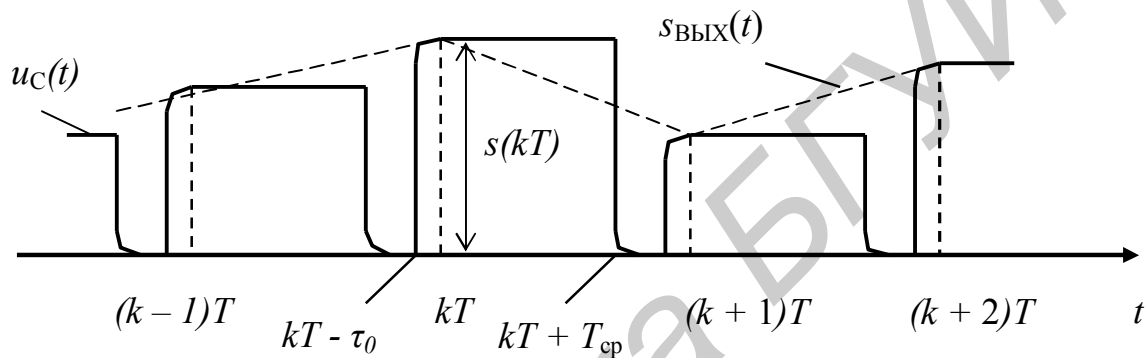


Рисунок 85 – Эпюры напряжений, действующих в устройстве выборки и хранения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Шатило, Н. И. Основы компьютерного проектирования / Н. И. Шатило, С. А. Рыбаков. – Минск : БГУИР, 2005. – 66 с.
- 2 Разевиг, В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью MicroCap-7 / В. Д. Разевиг. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2003. – 368 с.
- 3 Крушев, В. Т. Основы аналоговых электронных устройств / В. Т. Крушев, Э. Г. Попов. – Минск : БГУИР, 2004. – 58 с.
- 4 Першин, В. Т. Основы радиоэлектроники / В. Т. Першин. – Минск : Выш. шк. – 2006. – 399 с.

Библиотека БГУИР

СОДЕРЖАНИЕ

1 ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	3
2 КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	21
3 ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ПАКЕТЕ MICROCAP-8.....	30
3.1 Создание принципиальной схемы	31
3.2 Выполнение моделирования.....	39
3.3 Расчет частотных характеристик (AC Analysis)	44
Лабораторная работа №1	
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ	
И ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ... ..	49
Лабораторная работа №2	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА	
НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ	61
Лабораторная работа №3	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО И ИСТОКОВОГО	
ПОВТОРИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MICROCAP	78
Лабораторная работа №4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ	90
4 ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАЧ	97
4.1 Типовой расчет усилителя низкой частоты	97
4.2 Анализ работы усилителя при больших уровнях	
входного сигнала (нелинейное усиление)	103
4.3 Примерный расчет усилителя промежуточной частоты	107
4.4 Графическое определение стационарной амплитуды генерируемых	
колебаний. Устойчивость стационарной амплитуды.....	111
4.5 Примерный расчет мультивибратора	116
4.6 Устройство выборки и хранения (Save and Hold, S&H).....	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	123

Учебное издание

Першин Виктор Тихонович

СХЕМОТЕХНИКА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *И. В. Ничипор, М. А. Зайцева*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 24.04.2014. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 100 экз. Заказ 632.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6