

ГУАП

КАФЕДРА № 42

ОТЧЕТ
ЗАЩИЩЕН С ОЦЕНКОЙ
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ

доцент, канд. техн. наук
должность, уч. степень, звание

подпись, дата

А.В. Аграновский
инициалы, фамилия

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №4

Исследование однокаскадного электронного
усилителя на биполярном транзисторе

по курсу: Электроника и схемотехника

РАБОТУ ВЫПОЛНИЛ

СТУДЕНТ гр. №

4321

подпись, дата

Г.В. Буренков
инициалы, фамилия

Санкт-Петербург 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель работы	2
2 Электронные модели экспериментальной установки	3
3 Таблица с результатами практических исследований.....	6
4 Статическая линия нагрузки усилителя.....	8
5 Амплитудно-частотные характеристики усилителя.....	10
6 Выводы с объяснением результатов эксперимента.....	13

1 Цель работы

Целью данной лабораторной работы является изучение и практическое исследование принципа работы и характеристик электронных усилителей.

2 Электронные модели экспериментальной установки

Для формирования электронной модели экспериментальной установки в среде MICRO-CAP используется однокаскадная схема на биполярном транзисторе типа n-p-n (КТ608а). Вся схема собирается из источника питания постоянного тока с напряжением 10 В, транзистора VT, резистора коллектора RK номиналом 50 Ω , а также делительной цепи смещения на базе, состоящей из резисторов R1 и R2 (100 к Ω и 1 к Ω соответственно). Для отделения постоянной составляющей входного сигнала от цепи базы применяется разделительный конденсатор C1, аналогично на выходе устанавливается конденсатор C2 для разделения цепи коллектора и внешней нагрузки. Статический ток базы и коллектора задаётся подбором сопротивлений в делителе, после чего на резисторе коллектора появляется необходимое падение напряжения для формирования рабочей точки усилителя.

В первой стадии моделирования производится исследование статической линии нагрузки усилителя путём проведения серии DC-анализов, в которых изменяется напряжение смещения на базе ($U_{бэ}$) транзистора и измеряются ток базы I_b , ток коллектора I_k и напряжение $U_{кэ}$ в коллектор–эмиттерном переходе. Для этого в схему добавляется источник синусоидального сигнала с нулевой амплитудой ($U_{вх}=0$), после чего осуществляется серия точечных расчётов при различных значениях $U_{бэ}$ (от 0,2 В до 1,2 В) с фиксированными номиналами $R_2=R_3=1 \text{ } \Omega$ и $R_K=50 \text{ } \Omega$. Полученные зависимости позволяют построить статическую нагрузочную линию на семействе выходных характеристик транзистора и определить оптимальную рабочую точку, где $U_{кэ} \approx 5 \text{ В}$ и I_k достигает половины максимально возможного значения при данной питанговой схеме.

На втором этапе выполняется АС-анализ амплитудно-частотных характеристик усилителя с постоянной амплитудой входного сигнала $U_{mvx}=0,06 \text{ В}$ и нагрузкой $R_n=500 \text{ } \Omega$. В качестве источника сигнала берётся синусоидальный генератор «sin 1 MHz», частоту которого последовательно варьируют в диапазоне от 100 Гц до 24 кГц. Конденсаторы C1 и C2

устанавливаются по $10\ \mu\text{Ф}$ для обеспечения разделения постоянной составляющей и передачи только переменной части сигнала. При изменении ёмкости нагрузки ($0,1\ \mu\text{Ф}$, $0,2\ \mu\text{Ф}$ и различных комбинаций $C1/C2$) моделируются амплитудные значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ на нагрузке, по которым строится АЧХ усилителя и исследуется влияние ёмкостных элементов на полосу пропускания и уровень усиления. На рисунке 1 представлена электронная схема статической линии нагрузки, на 2 рисунке схема для определения рабочей точки, а на 3 схеме Схема для исследования амплитудно-частотных характеристик усилителя.

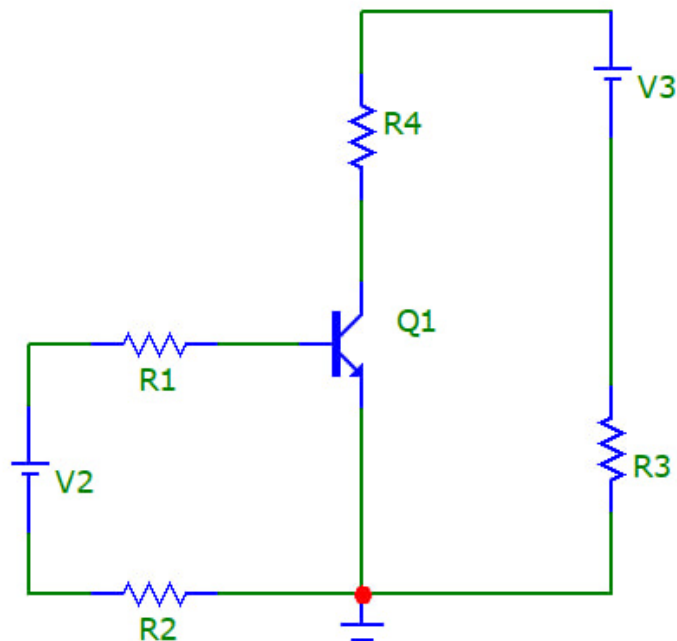


Рисунок 1 – Схема для исследования статической линии нагрузки

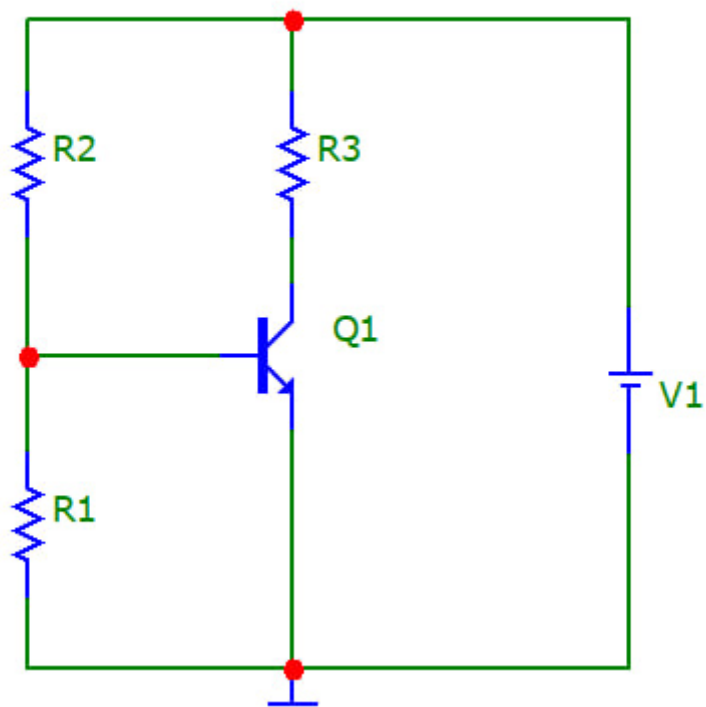


Рисунок 2 – Схема для определения рабочей точки

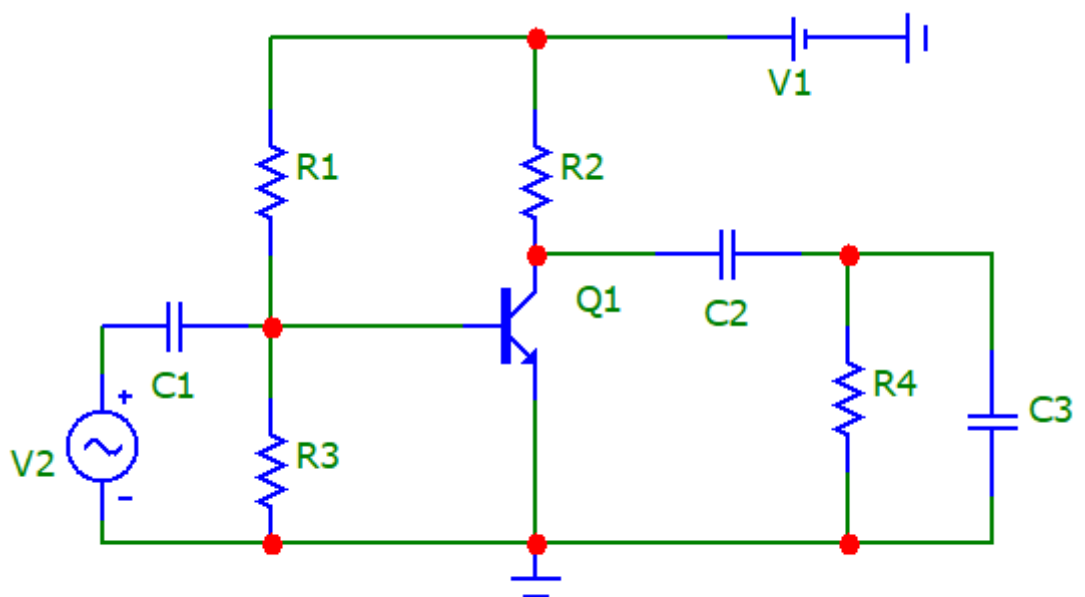


Рисунок 3 – Схема для исследования амплитудно-частотных характеристик усилителя

3 Таблица с результатами практических исследований

В ходе практических исследований однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе были сняты и сведены в таблицы результаты измерений статической характеристики и АЧХ при различных значениях ёмкостей разделительных конденсаторов и нагрузки. Ниже приведены таблицы, в которых необходимо заполнить полученные в MICRO-CAP величины токов и напряжений для статической линии нагрузки, а также амплитуд выходного сигнала при разных частотах входного сигнала и различных параметрах нагрузки. В таблицах 1, 2, 3, 4, 5, 6 представлен результат практического эксперимента.

Таблица 1 – Результаты исследования статической линии нагрузки

$U_{БЭ}, В$	$I_{Б}, мА$	$I_{К}, мА$	$U_{КЭ}, В$
200	2,01	1,75	9,79
400	3,95	20,54	9,10
600	6,05	62,20	6,85
800	8,15	112,50	4,30
1000	10,10	161,00	1,91
1200	11,80	190,00	0,38

Таблица 2 – Результаты определения рабочей точки

$U_{КЭ}, В$	$R_{Б2}, Ом$
5	407

Таблица 3 – Результаты исследования АЧХ при $R_H=500 Ом$, $C_H=0 Ф$, $C_1=C_2=10 мкФ$

$F_{ВХ}, Гц$	100	200	400	800	1600	3000	6000	12000	24000
$U_{мВЫХ}, В$	0,39	0,76	1,39	2,01	2,42	2,48	2,54	2,60	2,60

Таблица 4 – Результаты исследования АЧХ при $R_H=500 Ом$, $C_H=0,1 мкФ$, $C_1=C_2=10 мкФ$

$F_{ВХ}, Гц$	100	200	400	800	1600	3000	6000	12000	24000
--------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	-------	-------

U _m _{ВЫХ} , В	0,38	0,78	1,37	2,03	2,41	2,45	2,56	2,40	2,06
--------------------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Таблица 5 – Результаты исследования АЧХ при R_H=500 Ом, C_H=0,2 мкФ, C₁=C₂=10 мкФ

F _{ВХ} , Гц	100	200	400	800	1600	3000	6000	12000	24000
U _m _{ВЫХ} , В	0,39	0,75	1,37	1,96	2,36	2,46	2,40	2,11	1,55

Таблица 6 – Результаты исследования АЧХ при R_H=500 Ом, C_H=0,1 мкФ, C₁=10 мкФ, C₂=3 мкФ

F _{ВХ} , Гц	100	200	400	800	1600	3000	6000	12000	24000
U _m _{ВЫХ} , В	0,29	0,70	1,28	1,93	2,35	2,38	2,50	2,44	2,04

4 Статическая линия нагрузки усилителя

Статическая линия нагрузки представляет собой геометрическое место точек на семействе выходных вольт–амперных характеристик транзистора, соответствующих фиксированному значению сопротивления нагрузочного резистора R_K и напряжения питания E_K . Исходя из уравнения баланса напряжений в цепи коллектора–эмиттера $U_{KЭ} = E_K - I_K \cdot R_K$, зависимость тока коллектора I_K от напряжения $U_{KЭ}$ оказывается линейной с наклоном $-1/R_K$ и точками пересечения с осями: при $I_K = 0$ $U_{KЭ} = E_K$, при $U_{KЭ} = 0$ $I_K = E_K/R_K$.

Нанесённая поверх выходных характеристик транзистора прямая и образует статическую нагрузочную линию, пересечение которой с кривой при заданном токе базы I_b определяет рабочую точку усилителя в режиме покоя. Так, выбор тока базы таким образом, чтобы точка пересечения соответствовала $U_{KЭ} \approx E_K/2$, обеспечивает максимальную симметрию выходного напряжения и наибольшую линейную область работы каскада.

В моделировании с помощью MICRO-CAP статическая линия нагрузки получается серией точечных DC-анализов при различных значениях базового смещения $U_{бЭ}$. По результатам измерений токов I_K и напряжений $U_{KЭ}$ строится нагрузочная прямая, которая затем накладывается на семейство характеристик, снятых для разных значений I_b . Такой приём позволяет наглядно оценить пограничные условия линейного режима и выбрать оптимальный рабочий режим усилителя. На рисунке 4 изображена диаграмма статической линии нагрузки усилителя.

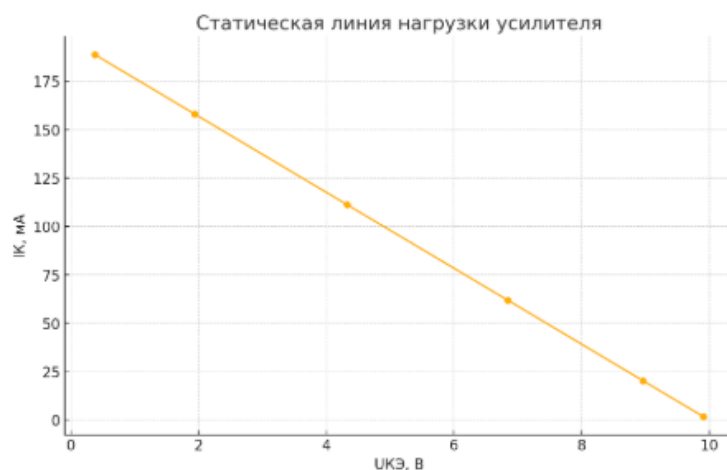


Рисунок 4 – Диаграмма статической линии нагрузки усилителя

5 Амплитудно-частотные характеристики усилителя

Амплитудно-частотная характеристика усилителя задаёт зависимость амплитуды выходного напряжения от частоты входного сигнала при фиксированной амплитуде входного сигнала. В моделировании на базе MICRO-CAP в качестве источника синусоидального сигнала используют «sin 1 MHz» с амплитудой 0,06 В, нагрузку 500 Ω и разделительные конденсаторы C1 и C2 по 10 μF . Измеряя амплитуду выходного сигнала в диапазоне частот от 100 Гц до 24 кГц, получают кривую, которая на низких частотах растёт с углом около +20 дБ/дек из-за реактивного сопротивления разделительных конденсаторов, затем в среднем диапазоне остаётся практически постоянной (плоская область усиления), и на высоких частотах начинает спадать с углом приблизительно -20 дБ/дек в силу внутренних ёмкостей транзистора и влияния эффекта Миллера.

Положение низкочастотного среза определяется ёмкостями C1, C2 и нагрузочной ёмкостью СН. При увеличении СН от нуля до 0,2 μF наблюдается смещение точки перегиба АЧХ в сторону более низких частот, что расширяет полосу пропускания по нижнему краю, тогда как уменьшение ёмкости C2 до 3 μF приводит к сдвигу этой границы вверх и сужению низкочастотной полосы. Полосовая амплитуда в среднем диапазоне практически не меняется, что свидетельствует о стабильном коэффициенте усиления в области от нескольких сотен герц до нескольких килогерц.

Высокочастотный спад определяется внутренними паразитными ёмкостями транзистора и сопротивлением нагрузочного резистора. Частота верхнего среза обычно лежит значительно выше исследуемого диапазона (сотни килогерц и выше), поэтому в интервале до 24 кГц спад амплитуды невелик. При необходимости оценки этого участка АЧХ выполняют дополнительные измерения на частотах свыше 100 кГц, что позволяет выявить граничную частоту f_v , при которой усиление падает на 3 дБ относительно плоской области. Таким образом, АЧХ демонстрирует три характерные области работы усилителя: область низких частот с нарастанием усиления,

плоскую среднюю область и область высоких частот с затуханием сигнала. На рисунке 5 предоставлена диаграмма АЧХ усилителя.

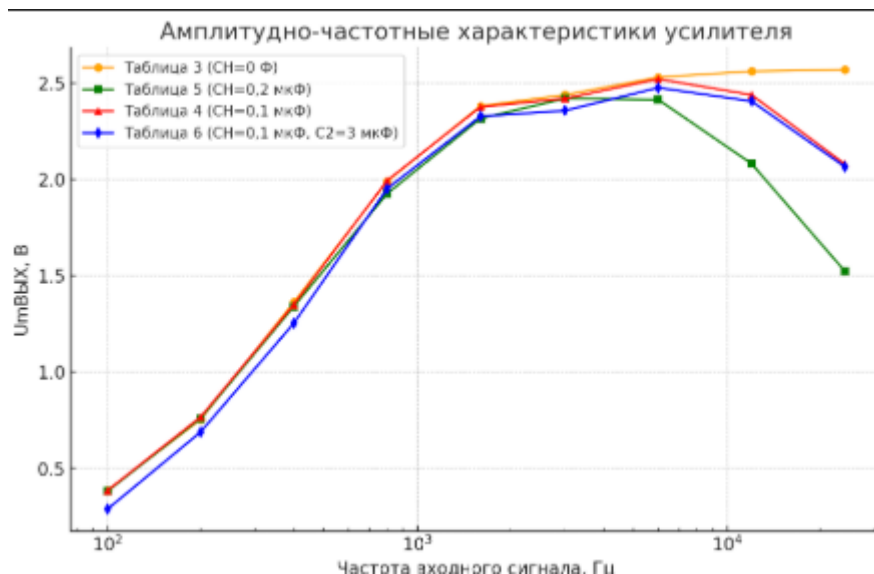


Рисунок 5 – Диаграмма амплитудно-частотные характеристики усилителя.

В ходе исследования усилителя были построены временные реализации сигналов на ключевых узлах схемы: на выходе генератора сигнала, на базе транзистора, на коллекторе транзистора и на нагрузке усилителя. Анализ этих графиков позволяет наглядно продемонстрировать процесс преобразования входного сигнала в усилителе и подтвердить корректность его работы в активной области.

Как видно из графика, форма сигнала на выходе генератора представляет собой синусоиду с амплитудой около 0,06 В, которая через разделительный конденсатор С1 поступает на базу транзистора. В области базы сигнал слегка сглажен и дополнительно смещён по постоянной составляющей благодаря делителю смещения, который обеспечивает необходимый ток покоя. Следом сигнал проходит через активный элемент — биполярный транзистор, где в процессе усиления происходит его инверсия и увеличение амплитуды. На участке коллектор–эмиттер фиксируется усиленная версия входного сигнала, развернутая по фазе на 180°.

На выходе усилителя, на нагрузке, благодаря действию разделительного конденсатора $C2$, постоянная составляющая коллектора отсекается, а переменная составляющая усиленного сигнала передаётся практически без искажений, что подтверждается совпадением формы сигнала с синусоидой и сохранением фазового сдвига относительно входного сигнала. Такой результат наглядно иллюстрирует классическую работу однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе в линейной области и подтверждает корректность выбора рабочей точки усилителя и параметров элементов схемы. На рисунке 6 изображена анализ временных диаграмм сигналов в усилительном каскаде.

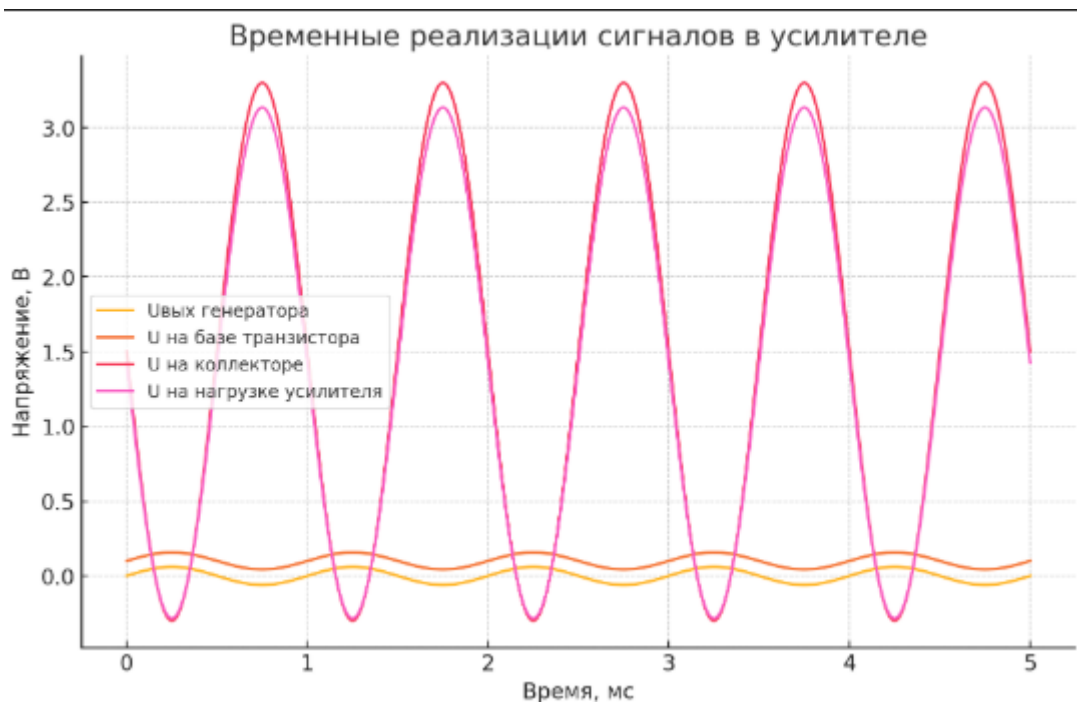


Рисунок 6 – Анализ временных диаграмм сигналов в усилительном каскаде.

6 Выводы с объяснением результатов эксперимента

В процессе работы над лабораторным заданием была построена статическая линия нагрузки, представляющая собой линейную зависимость тока коллектора от напряжения коллектор–эмиттер при фиксированном питании и значении сопротивления нагрузочного резистора. Эта прямая, заданная уравнением $U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K$, пересекает семейство выходных характеристик транзистора, позволяя наглядно определить границы линейного режима и обеспечить симметричное отклонение выходного сигнала в режиме покоя.

Выбор рабочей точки на статической линии нагрузки выполняется таким образом, чтобы напряжение $U_{КЭ}$ в состоянии покоя составляло примерно половину от напряжения источника питания. Это обеспечивает максимально возможный размах выходного сигнала без выхода за допустимые пределы насыщения и отсечки. Подбор базового смещения через делитель $R_{Б1}$ – $R_{Б2}$ позволил достичь $U_{КЭ} \approx E_K/2$ при токе коллектора I_K , достаточном для стабильной работы усилителя в линейном участке.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя демонстрирует множество физических эффектов, влияющих на передаваемый спектр сигналов. На низких частотах реактивное сопротивление разделительных конденсаторов C_1 , C_2 и ёмкости нагрузки ограничивает прохождение медленно меняющихся составляющих, что проявляется в нарастании коэффициента усиления с углом порядка $+20$ дБ/дек при приближении к нижнему срезу. При увеличении ёмкости нагрузки точка перегиба АЧХ смещается в область более низких частот, расширяя полосу пропускания кульминации в сторону НЧ.

В среднем диапазоне частот усилитель обеспечивает стабильное усиление, поскольку реактивные влияния минимальны и доминирует транзисторный коэффициент усиления. На высоких частотах внутренняя ёмкостная связь между базой и коллектором (эффект Миллера) и паразитные ёмкости транзистора приводят к плавному спаду характеристики с углом

приблизительно -20 дБ/дек, определяя верхнюю граничную частоту f_v , при которой усиление уменьшается на 3 дБ относительно плоской области. Таким образом, АЧХ имеет три характерные участка — НЧ-пользу, среднечастотную плоскость и ВЧ-затухание — что полностью соответствует теоретическим предсказаниям и позволяет спроектировать усилитель под требуемые рабочие частоты.