

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники

Е.А. Корнев

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Оренбург

2016

УДК 621.375(076.5)
ББК 32.846я7
К67

Рецензент – профессор, доктор технических наук Н.А. Соловьев

Корнев Е.А.

К67 Измерение параметров и характеристик импульсного усилительного модуля на основе операционных усилителей: методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Схемо- и системотехника электронных средств» /Е.А. Корнев; Оренбургский гос.ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2016.- 44 с.

В методических указаниях изложены цели, задачи и методика проведения лабораторной работы с широкополосным импульсным двухкаскадным усилительным модулем на основе операционных усилителей. В приложении приведены также краткие сведения об основных параметрах и характеристиках усилительных устройств.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Схемо- и системотехника электронных средств» для студентов направлений подготовки 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.04 Электроника и наноэлектроника.

УДК 621.375 (076.5)
ББК 32.846я7

© Корнев Е.А., 2016
© ОГУ, 2016

Содержание

Список используемых сокращений и условных обозначений.....	4
Введение.....	6
1 Цель и задачи проведения лабораторной работы.....	7
1.1 Целью лабораторной работы.....	7
1.2 Задачи лабораторной работы.....	7
2 Описание УУ. Сборка и монтаж рабочего места.....	8
3 Измерение токов потребления, напряжений питания и потребляемой мощности.....	11
4 Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ).....	12
5 Измерение входного и выходного сопротивлений.....	13
6 Измерение динамической характеристики.....	14
7 Измерение переходной характеристики (ПХ).....	15
8 Измерение импульсной характеристики (ИХ).....	16
Список использованных источников.....	18
Приложение А Определения и краткие сведения о параметрах и характеристиках УУ в частотной и временной областях.....	20

Список используемых сокращений и условных обозначений

АЧХ –	Амплитудно-частотная характеристика
ИУ –	Импульсный усилитель
КПД –	Коэффициент полезного действия
ЛАЧХ –	Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
ООС –	Отрицательная обратная связь
ИУМ –	Импульсный усилительный модуль
ТЗ –	Техническое задание
ФЧХ –	Фазо-частотная характеристика
ШУ –	Широкополосный усилитель
$E_{\text{п}}$ –	Напряжение питания усилителя
K_{ε} –	Коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник)
$K_{\text{оос}}$ –	Коэффициент передачи усилителя с ООС
K_{U-U} –	Коэффициент передачи по напряжению
K_0 –	Коэффициент передачи усилителя в области средних частот
K_{P-P} –	Коэффициент передачи по мощности
K_{I-I} –	Коэффициент передачи по току
M_n –	Коэффициент частотных искажений в области нижних частот
M_v –	Коэффициент частотных искажений в области верхних частот
$R_{\text{вх}}$ –	Активная составляющая входного сопротивления
$R_{\text{вых}}$ –	Активная составляющая выходного сопротивления
$U_{\text{вых.мах}}$ –	Максимальное напряжение на эквивалентной нагрузке
e_{ε} –	Э.Д.С источника сигнала

$f_{\text{в}}$	Верхняя граничная частота полосы пропускания
$f_{\text{н}}$	Нижняя граничная частота полосы пропускания
f_T	Предельная частота усиления транзистора по току
f_{β}	Граничная частота усиления транзистора по току
Δf	Полоса пропускания
t_y	Время установления фронта сигнала
$\tau_{\text{н}}$	Постоянная времени цепи в области нижней граничной частоты
$\tau_{\text{в}}$	Постоянная времени цепи в области верхней граничной частоты
$Z_{\text{с}}$	Комплексное выходное сопротивление источника сигнала
$Z_{\text{н}}$	Комплексное сопротивление нагрузки
$Z_{\text{вх}}$	Комплексное входное сопротивление
$Z_{\text{вых}}$	Комплексное выходное сопротивление
Δ	Спад вершины импульса
δ	Выброс переходной характеристики

Введение

Усилительные устройства являются основой построения широкого многообразия электронных и радиоэлектронных средств. В процессе обучения в области электроники, радиотехники и систем связи студенту важно знать схемотехнические основы импульсных усилительных устройств с использованием быстродействующих операционных усилителей, уметь проектировать сравнительно несложные усилители и владеть методиками измерения параметров и характеристик этих устройств. Следовательно, студенту, приступая к экспериментальному изучению свойств усилителей, необходимо предварительно освоить теорию и схемотехнику усилителей, научиться проводить инженерные расчеты однокаскадных и многокаскадных усилителей, а затем переходить к экспериментальному изучению свойств реальных усилительных устройств. Одним из сложных этапов изучения усилительной техники является тестирование и измерение основных параметров и характеристик усилительных трактов с применением традиционных методик и аппаратных средств. Успех овладения приемами измерения параметров определяется знаниями и опытом в области схемотехники импульсных усилительных устройств, а также зависит от подготовки обучающегося к работе с измерительными приборами и методиками радиотехнических измерений.

В настоящие методические указания включены цели и задачи проведения лабораторной работы по измерению основных параметров и характеристик импульсного усилительного модуля (ИУМ), построенного на операционных усилителях среднего быстродействия. В разделах указаний представлены описание ИУМ и схема рабочего места, методики подготовки и измерения конкретного параметра или характеристики усилителя, порядок регистрации и обработки результатов измерений. Методические указания позволяют обучающемуся овладеть практическими навыками измерения основных параметров и характеристик импульсного усилительного модуля в процессе проведения лабораторной работы.

1 Цель и задачи проведения лабораторной работы

1.1 Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является овладение навыками работы с измерительной аппаратурой и приемами измерения основных параметров и характеристик ИУМ. Для достижения цели используются известные методы, методики и следующие средства измерений: генератор высокочастотных колебаний и генератор импульсных сигналов, цифровой двухканальный осциллограф, цифровой вольтметр, амперметр, измеритель амплитудно-частотных характеристик, источники питания.

1.2 Задачи лабораторной работы

В ходе проведения лабораторной работы решаются следующие задачи:

- а) сборка и монтаж рабочего места;
- б) подготовка, проверка работоспособности и калибровка измерительных приборов с применением соответствующих инструкций по эксплуатации;
- в) измерение токов потребления, напряжений питания и потребляемой мощности;
- г) определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) 1-го, 2-го каскадов и 2-х каскадов вместе; нормирование АЧХ и определение полосы пропускания 1-го, 2-го каскадов и 2-х каскадов вместе; построение ЛАЧХ каждого из каскадов и ЛАЧХ усилителя в целом по ЛАЧХ 1-го и 2-го каскадов; сравнение экспериментальной ЛАЧХ усилителя в целом с построенной ЛАЧХ; определение частотных искажений в полосе пропускания;
- д) измерение входного и выходного сопротивлений;
- е) определение динамической характеристики;
- ж) измерение коэффициентов передачи по напряжению, току и мощности;

з) измерение номинальной выходной мощности и расчет коэффициента полезного действия;

и) измерение переходной характеристики; определение аналитического выражения - аппроксимирующей функции; определение производной аппроксимирующей функции и ее сравнение с экспериментальной импульсной характеристикой;

к) измерение импульсной характеристики; определение аналитического выражения - аппроксимирующей функции; определение интеграла аппроксимирующей функции и сравнение интеграла с экспериментальной переходной характеристикой; преобразование Фурье импульсной характеристики и сравнение результатов с АЧХ.

В процессе выполнения лабораторной работы необходимо соблюдать правила электро- и пожаробезопасности.

Основные понятия о параметрах и характеристиках усилительных устройств представлены в приложении А.

2 Описание ИУМ. Сборка и монтаж рабочего места

2.1 На рисунке 1 представлена принципиальная электрическая схема тестируемого ИУМ, в таблицах 1, 2 приведены соответственно основные и предельно допустимые параметры отечественного операционного усилителя 140УД11 среднего быстродействия. Первый каскад усиления является инвертирующим усилителем с частотнозависимой параллельной ООС по напряжению. Второй каскад усиления представляет собой неинвертирующий усилитель также с частотнозависимой, но с последовательной ООС по напряжению. Каскады усиления могут соединяться последовательно посредством тумблера на панели усилительного модуля. Коэффициенты усиления переключаются ступенчато с шагом 2,5 в диапазоне 2,5...10 с помощью переключателей на передней панели модуля.

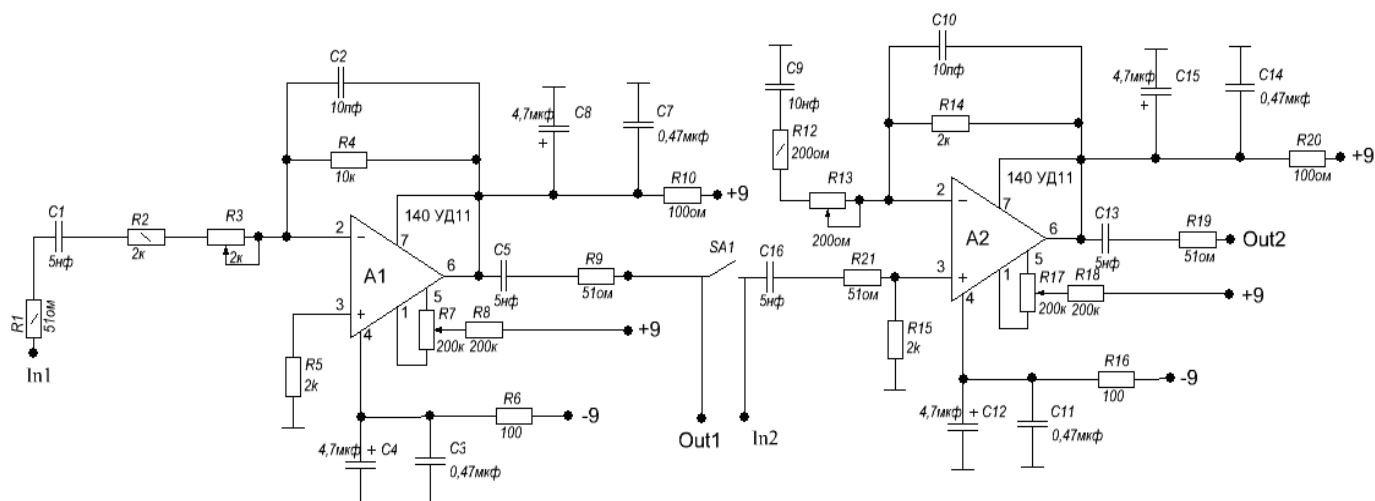


Рисунок 1 – Принципиальная схема двухкаскадного импульсного усилительного модуля на операционных усилителях 140УД11 среднего быстродействия

Таблица 1 – Параметры операционного усилителя 140УД11

Параметры	Значение параметра
1 Напряжение питания	$\pm(5 \dots 18)$ В
2 Максимальное выходное напряжение при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 2$ кОм	± 12 В
3 Напряжение смещения нуля при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 2$ кОм	10 мВ
4 Входной ток при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 2$ кОм	не более 500 нА
5 Разность входных токов при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 2$ кОм	не более 200 нА
6 Ток потребления при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В	не более 10 мА
7 Коэффициент усиления напряжения	не менее 25000
8 Скорость нарастания выходного напряжения при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 2$ кОм	(20...50) В/мкс
9 Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В	не менее 70 дБ

Таблица 2 – Предельно допустимые режимы эксплуатации

Параметр	Значение параметра
1 Напряжение питания (с учетом пульсаций)	± 20 В
2 Входное синфазное напряжение	не более ± 15 В
3 Температура окружающей среды	(минус 10...+70) °С

Фотографии усилительного устройства представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Лицевая панель и вид монтажа внутри корпуса импульсного усилительного модуля

2.2 На рабочем столе установите измерительные приборы и блок усилителей. Соберите рабочее место согласно схемы соединений рисунка 3.

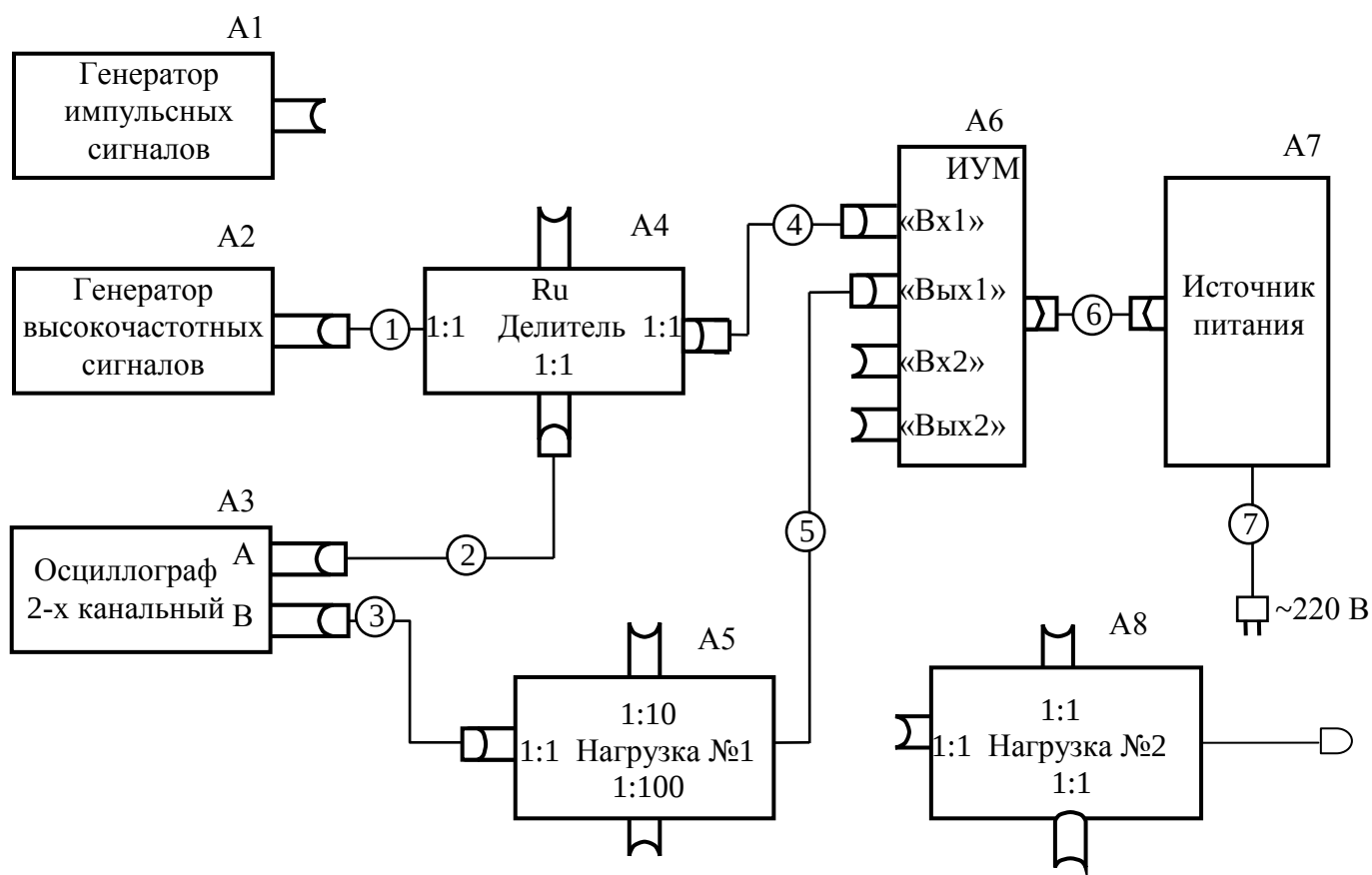


Рисунок 3 – Схема соединений ИУМ с источником питания, приспособлениями и приборами

Проверьте правильность подключения всех разъемов. Делитель № 1 содержит дополнительный резистор, который может подключаться последовательно с входом ИУМ. Нагрузка № 1 содержит нагрузочное сопротивление 1000 Ом, нагрузка № 2 - нагрузочное сопротивление 200 Ом.

2.3 Подключите приборы к сети, включите приборы и дайте им прогреться не менее 10 минут. Проверьте работоспособность приборов и при необходимости проведите калибровку измерительных приборов с применением соответствующих инструкций по эксплуатации. Выходы генераторов сигналов должны быть нагружены на нагрузочные сопротивления, соответствующие инструкции. Осциллограф должен иметь измерительные щупы и головки, прилагаемые к нему.

3 Измерение токов потребления, напряжений питания и потребляемой мощности

3.1 Включите мультиметр в режим измерения напряжений с соответствующим напряжению питания пределом. Включите кнопки питания источника питания и ИУМ. Измерьте вольтметром на клеммах источника питания относительно общей шины напряжения питания. Запишите результат в рабочую тетрадь. Выключите питание ИУМ.

3.2 Удалите перемычку в цепи питания «плюс» источника питания. Включите мультиметр в режим измерения тока и подключите щупы мультиметра вместо перемычек, соблюдая полярность включения. Установите предел измерения шкалы мультиметра не менее 100 мА. Включите кнопку питания и измерьте потребляемый ток. Запишите результат в рабочую тетрадь. Выключите питание ИУМ.

3.3 Повторите операции п. 3.2 в цепи питания «минус». Проведите расчет потребляемой ИУМ мощности.

4 Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ)

4.1 Установите коэффициент передачи 1-го каскада ИУМ равным 2,5 с помощью переключателя. Установите на выходе генератора ВЧ сигнал амплитудой 0,5 В и частотой 1 кГц с помощью осциллографа. Осциллограф установите в режим синхронизации «внутренний» от луча А с уровнем синхронизации, близком к нулю.

4.2 В области нижних частот, изменяя частоту сигнала с шагом 0,5 кГц и поддерживая одинаковой его амплитуду на каждой частоте, измеряйте 2-х канальным осциллографом амплитуду входного и выходного сигналов, а также временную задержку между выходным и входным сигналами, фиксируя одновременно результаты измерения в рабочей тетраде. Продолжайте измерения до области средних частот пока амплитуда выходного сигнала не будет изменяться.

4.3 В области средних частот увеличьте шаг изменения частоты до 100 кГц и проведите измерения аналогичные п.4.2 до момента уменьшения коэффициента передачи на (5...10) %, т.е. области верхних частот.

4.4 В области верхних частот полосы пропускания (0,5 – 6 МГц) проведите измерения, аналогичные п.4.2. с шагом изменения частоты 0,5 МГц .

4.5 Постройте АЧХ, ЛАЧХ и ФЧХ 1-го каскада ИУМ по данным п.п. 4.1- 4.4. Определите коэффициент усиления по напряжению, а также полосу пропускания и максимальный коэффициент частотных искажений в полосе пропускания.

4.6 Установите коэффициент передачи 1-го каскада ИУМ, равным 10, с помощью переключателя. Установите на выходе генератора ВЧ сигнал амплитудой 0,5 В и частотой 1 кГц с помощью осциллографа. Повторите измерения по п.п. 4.1-4.5.

4.7 Повторите измерения по п.п. 4.1- 4.6 для 2-го каскада ИУМ. Сравните результаты измерения АЧХ и ФЧХ 1-го и 2-го каскадов усиления.

4.8 Соедините последовательно 1-ый и 2-ой каскады усиления с помощью тумблера на лицевой панели ИУМ. Установите коэффициенты усиления 1-го и 2-го каскадов, равными 2,5. Подключите разъем кабеля 5 к выходу «Вых2» ИУМ.

Измерьте АЧХ и ФЧХ двухкаскадного ИУМ по методике п.п. 4.1- 4.6. Постройте результирующие АЧХ, ЛАЧХ и ФЧХ усилительного устройства в целом.

4.9 Постройте ЛАЧХ усилителя путем сложения ЛАЧХ 1-го и 2-го каскадов; сравните ее с экспериментальной ЛАЧХ усилителя в целом, определенной в п.4.8.

4.10 Изучите измеритель АЧХ по техническому описанию и инструкции по эксплуатации. Включите измеритель АЧХ, дайте прогреться не менее 10 минут и подготовьте его к измерениям согласно техническому описанию и инструкции по эксплуатации. Соедините последовательно 1-ый и 2-ой каскады усиления с помощью тумблера на лицевой панели ИУМ. Установите коэффициенты усиления 1-го и 2-го каскадов, равными 2,5. Подключите выход измерителя АЧХ к входу 1 ИУМ, а выход 2 ИУМ к входу измерителя. Проведите измерение АЧХ, зафиксируйте результаты, обработайте их и сравните с результатами п.4.8.

5 Измерение входного и выходного сопротивлений

5.1 Измерьте входное сопротивление в следующей последовательности:

а) установите с помощью переключателей коэффициенты передачи первого и второго каскадов ИУМ равными 2,5. Установите на выходе генератора ВЧ сигнал амплитудой 0,5 В и частотой, соответствующей нижней частоте среза $\omega_{сн}$ полосы пропускания ИУМ. Включите питание ИУМ и измерьте осциллографом амплитуду входного сигнала U_1 . Подключите тройник к выходу «R_и» делителя, а разъемы кабелей «2» и «4» отключите со стороны делителя и подключите к тройнику. Повторно измерьте осциллографом амплитудное значение сигнала U_2 . Запишите результаты и рассчитайте входное сопротивление по формуле

$$R_{вх} \omega_{сн} = \frac{U_{вх} \omega_{сн}}{I_{вх} \omega_{сн}} = \frac{U_2}{U_1 - U_2} R_D = \frac{U_2}{U_1 - U_2} 910 \text{ Ом.}$$

б) повторите операции п. 5.1 а) на средней частоте полосы пропускания ИУМ;

в) повторите операции п. 5.1 а) на верхней частоте среза $\omega_{св}$ полосы пропускания ИУМ.

5.2 Измерьте выходное сопротивление ИУМ в следующей последовательности:

а) установите минимальный коэффициент передачи ИУМ (2,5) с помощью переключателя. Установите на выходе генератора ВЧ сигнал амплитудой 0,1 В и частотой, соответствующей нижней частоте среза полосы пропускания ИУМ. Подключите разъем кабеля 5 к выходу «Вых2» ИУМ. Включите питание ИУМ и измерьте осциллографом амплитуду выходного сигнала $U_{вых1}$ на нагрузке №1. Подключите к выходу ИУМ нагрузку №2 вместо нагрузки №1. Измерьте осциллографом амплитуду выходного сигнала $U_{вых2}$ на нагрузке №2. Запишите результаты и рассчитайте выходное сопротивление ИУМ по формуле

$$Z_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} = \frac{U_{вых1} - U_{вых2}}{\left[\frac{U_{вых1}}{1000} - \frac{U_{вых2}}{200} \right]} \text{ Ом.}$$

б) повторите операции п. 5.2 а) на средней частоте полосы пропускания ИУМ;

в) повторите операции п. 5.2 а) на верхней частоте среза полосы пропускания ИУМ.

6 Измерение динамической характеристики

6.1 Измерьте динамическую (амплитудную) характеристику (ДХ) ИУМ в следующем порядке. Установите коэффициент усиления ИУМ равным 2,5. Подключите к выходу №2 сопротивление нагрузки №1.

В области середины диапазона полосы частот ИУМ установите входной сигнал ниже уровня шумовой дорожки. Изменяя амплитуду выходного сигнала генератора в начале и конце диапазона (на нелинейных участках) с шагом 0,05 В, а в

остальных точках с шагом 0,5 В, фиксируйте осциллографом ряд выходных напряжений ИУМ в диапазоне от уровня шума до максимального значения.

6.2 Постройте график ДХ. Определите на линейном участке ДХ динамические диапазоны входных и выходных сигналов.

6.3 На линейном участке ДХ по отношению приращений выходных и входных уровней сигналов определите коэффициент усиления по напряжению.

6.4 Определите коэффициент усиления по току. Для этого найдите приращение тока во входной цепи, разделив приращение входного напряжения на линейном участке ДХ на измеренное входное сопротивление ИУМ (см.п.5.1), затем приращение тока в выходной цепи, поделив приращение выходного напряжения на линейном участке ДХ, соответствующее входному приращению напряжения, на номинальное значение сопротивления нагрузки №1. Коэффициент усиления по току определяется отношением приращений выходного и входного токов.

6.5 Найдите коэффициент передачи мощности, умножив коэффициент усиления по напряжению на коэффициент усиления по току.

6.6 Рассчитайте действующие значения максимального напряжения выходного сигнала, номинальную выходную мощность и коэффициент полезного действия.

7 Измерение переходной характеристики (ПХ)

7.1 Отключите генератор ВЧ и подключите к ИУМ генератор импульсных сигналов. Органами управления генератора установите, контролируя 1-м каналом осциллографа, сформированную последовательность импульсов с параметрами : полярность положительная, амплитуда 0,5 В, частота следования импульсов 1 кГц, длительность импульсов 100 мкс, длительность фронта не более 50 нс.

7.2 Установите коэффициенты усиления обоих каскадов УИМ 2,5. Подключите второй канал осциллографа к выходу «Вых 2» ИУМ. Включите напряжения питания переключателями на источнике питания и ИУМ. Зарегистрируйте осцилограммы входного и выходного напряжений.

7.3 Произведите нормирование ПХ, разделив текущие значения уровня сигнала к установившемуся значению. Определите по нормированной ПХ не менее пяти значений уровня сигнала по фронту нарастания до амплитудного значения, а также уровень выброса сигнала относительно установившегося значения амплитуды. Измерьте временную задержку, фронт нарастания по уровням 0,1 и 0,9 от амплитудного значения, время установления сигнала.

7.4 Определите аналитическое выражение для ПХ (аппроксимированную функцию по пяти точкам), найдите производную этой функции и сравните производную с экспериментальной импульсной характеристикой (см.п. 8.4).

7.5 Повторите измерения по п.7.4 при коэффициенте усиления 1-го и 2-го каналов соответственно 2,5 и 5.

8 Измерение импульсной характеристики (ИХ)

8.1 Повторите п.7.1. Установите параметры импульса: полярность положительная, амплитуда 0,5 В, частота следования импульсов 10 кГц, длительность импульсов 0,05 мкс, длительность фронта не более 0,01 мкс.

8.2 Установите коэффициенты усиления обоих каскадов 2,5. Подключите второй канал осциллографа к выходу «Вых2» ИУМ. Включите напряжения питания переключателями на источнике питания и ИУМ. Зарегистрируйте осциллограммы входного и выходного напряжений.

8.3 Произведите нормирование ИХ, разделив текущие значения уровня сигнала к установившемуся значению. Определите по нормированной ИХ значения амплитуды, фронт нарастания и фронт спада на уровнях 0,1 и 0,9, длительность сигнала на уровнях 0,1 и 0,5 амплитудного значения сигнала. Также определите по нормированной ИХ не менее пяти значений уровня сигнала по фронту нарастания, затем не менее пяти значений уровня по фронту спада.

8.4 Определите аналитическое выражение для ИХ (аппроксимированную функцию по десяти точкам) и определите интеграл этой функции. Сравните интеграл с экспериментальной переходной характеристикой (см.п. 7.4). Проведите

прямое преобразование Фурье аппроксимирующей функции импульсной характеристики и сравните результаты с результирующей АЧХ (см.п.4.8).

8.5 Повторите измерения по п.8.4 при коэффициенте усиления 1-го и 2-го каналов соответственно 2,5 и 5.

Список использованных источников

- 1 Корнев, Е.А. Проектирование широкополосных и импульсных усилительных устройств: учебное пособие / Е.А Корнев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2011.- 141 с.
- 2 Опадчий, Ю.Ф., Аналоговая и цифровая электроника. /Полный курс/: учебник для вузов. под. ред. О.П. Глудкина – М.: Горячая линия – Телеком, 2002 – 768 с.
- 3 Степаненко, И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И.П. Степаненко 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1973. – 672с.
- 4 Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники / И.П. Степаненко - М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 488 с.
- 5 Нефедов, В. И. Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов.- М. Высшая школа, 2002. - 510 с.
- 6 Красько, А.С. Проектирование аналоговых устройств: методические указания к курсовому проектированию /А.С. Красько. – Томск: ТУСУР, 2000. – 38 с.
- 7 Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств/О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров, Г.Г. Чавка; под ред. О.В. Алексеева.- М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
- 8 Разевиг, В.Д. Применение программ P-CAD и PSpICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В.Д. Разевиг: Вып. 1: Общие сведения. Графический ввод схем. М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.
- 9 Разевиг, В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. / В.Д. Разевиг- М.:Солон-Р, 2001. –519 с.
- 10 Моделирование нелинейных цепей на ПЭВМ средствами ППП PSpICE: учеб. пособие / И.Г. Мироненко [и др.]. ГЭТУ. – СПб., 1999. – 56 с.
- 11 Ганский, П.Н. Машинный анализ и расчет электронных схем: учебное пособие / П.Н. Ганский - М.: АВС Паблиш, 1999 – 224 с.
- 12 Клочков, М.И. Расчет элементов и моделирование схем энергетической и информационной электроники / М.И. Клочков. – Хабаровск: Изд-во «ДВГУПС»,

2004. – 138 с.

13 Мамонкин, И.Г. Усилительные устройства / И.Г. Мамонкин. - М.: Связь, 1977. – 360 с.

14 Шарыгина, Л.И. Усилительные устройства / Л.И. Шарыгина. – Томск Изд-во Томского гос. университета, 1976. – 413 с.

15 Полупроводниковые приборы. Транзисторы /В.Л. Аронов [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. - М.: Энергоатомиздат, 1985.- 904 с.

16 Колесов, И.А. Стабилизация режима биполярных транзисторов методические указания для студентов специальностей 200700, 201600 /И.А. Колесов. – Томск: ТУСУР, 1999. - 30 с.

17 Жаркой, А.Г. Расчет нелинейных искажений гармонических сигналов в транзисторных усилителях: методические указания для студентов специальностей 200700, 201600 / А.Г. Жаркой. – Томск: ТИАСУР, 1987. – 54 с.

18 Зелингер, Дж. Основы матричного анализа и синтеза /Дж. Зелингер. – М.: Советское радио, 1970. - 240 с.

19 Панин, Н.М. Переменные аттенюаторы и их применение / Н.М. Панин. – М.: Энергия, 1971. – 40 с.

Приложение А

Определения и краткие сведения о параметрах и характеристиках ИУМ в частотной и временной областях

А.1 Основные параметры и характеристики усилительного устройства

А.1.1 Основными числовыми параметрами ИУМ являются: коэффициент передачи (усиления), рабочие диапазоны уровней входных и выходных напряжений и токов, среднеквадратичное значение шумов, значения входного и выходного сопротивлений, полоса пропускания (диапазон рабочих частот усилителя), выходная мощность, коэффициенты частотных и нелинейных искажений усиленного сигнала.

А.1.2 Характеристика усилителя отражает зависимость одной физической величины от другой. К характеристикам ИУМ относятся: амплитудно-фазовая (годограф), амплитудно-частотная (АЧХ), логарифмическая амплитудно-частотная (ЛАЧХ), фазо-частотная (ФЧХ), динамическая. Кроме этого, шумовые свойства ИУМ характеризуются спектральной плотностью мощности шумового сигнала и зависимостью среднеквадратичного уровня шума от частоты.

А.1.3 Коэффициент передачи по переменному току - это отношение установившихся уровней выходного сигнала к уровню входного сигнала усилителя при условии, что уровни сигналов находятся в пределах линейного участка динамической характеристики ИУМ. В зависимости от типа усиливаемой входной или выходной физических величин сигнала различают коэффициенты передачи:

-по напряжению (для усилителей напряжения)

$$K_{U-U} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}. \quad (\text{A.1})$$

-по току (для усилителей тока)

$$K_{I-I} = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}}. \quad (\text{A.2})$$

-по отношению выходного напряжения к входному току (для усилителей-преобразователей тока в напряжение)

$$K_{I-U} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} [\text{Ом}]. \quad (\text{A.3})$$

-по отношению выходного тока к входному напряжению (для усилителей-преобразователей напряжения в ток)

$$K_{I-U} = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} [\text{См}]. \quad (\text{A.4})$$

-по мощности (для всех типов усилителей)

$$K_{P-P} = \frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \cdot \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = K_{U-U} \cdot K_{I-I}, \quad (\text{A.5})$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$, $\Delta I_{\text{вх}}$, $\Delta U_{\text{вых}}$, $\Delta I_{\text{вых}}$, $\Delta P_{\text{вых}}$, $\Delta P_{\text{вх}}$ - соответственно изменения амплитудных или действующих значений напряжений, токов и мощностей на входе или выходе ИУМ в определенной точке рабочего диапазона динамической характеристики.

А.1.4 При каскадном соединении нескольких усилителей коэффициент усиления усилительного устройства в целом определяется произведением их коэффициентов усиления

$$K_{\text{ОБЩ}} = \prod_{j=1}^n K_j = K_1 K_2 \dots K_n. \quad (\text{A.6})$$

В общем случае коэффициенты усиления являются комплексными величинами, что отражает наличие частотных и фазовых искажений усиливаемого сигнала.

А.1.5 В процессе проектирования усилительных устройств широко

используют логарифмические единицы для коэффициентов усиления, который в этом случае выражается в децибелах. Тогда коэффициент усиления по мощности равен

$$K_{P-P}[\partial B] = 10 \lg \frac{P_{\partial B}}{P_{\partial X}}. \quad (A.7)$$

А.1.6 Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения, для коэффициентов усиления по току и напряжению можно соответственно записать

$$K_{U-U}[\partial B] = 20 \lg K_{U-U}, \quad (A.8)$$

$$K_{I-I}[\partial B] = 20 \lg K_{I-I}. \quad (A.9)$$

Логарифмическая мера оценки удобна при построении и анализе амплитудно-частотных характеристик многокаскадных усилителей. Действительно, общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя при переходе к логарифмическим единицам измерения определяется суммой коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$K_{ОБЩ}[\partial B] = \sum_{j=1}^n K_j = K_1[\partial B] + K_2[\partial B] + \dots K_n [\partial B]. \quad (A.10)$$

А.1.7 Входное сопротивление усилителя равно отношению входного напряжения к входному току при фиксированном значении сопротивления нагрузочного устройства. Если выходное сопротивление источника сигнала является чисто активным $Z_c = R_c$, то входное сопротивление определяется отношением приращений действующих или амплитудных значений тока и напряжения в полосе частот

$$Z_{ex} = \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_{ex}} \quad (A.11)$$

От отношения входного сопротивления и внутреннего сопротивления R_c источника сигнала E_c зависит степень уменьшения уровня сигнала непосредственно на входе усилителя. Чем больше значение R_{ex} по отношению к R_c , тем в меньшей степени ослабляется входной сигнал.

А.1.8 Выходное сопротивление усилителя для большинства практических случаев определяется выражением

$$Z_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} = \frac{U_{выхХХ} - U_{выхН}}{I_{выхН}}, \quad (A.12)$$

где $U_{выхХХ}$, $U_{выхН}$, $I_{выхН}$ - соответственно напряжение холостого хода, напряжение и ток в нагрузочной цепи усилителя, полученные в режиме холостого хода и при допустимом значении сопротивления нагрузки в пределах номинальной выходной мощности усилителя.

Измерение выходного сопротивления производят при условиях, что $Z_c = R_c$ и амплитуда входного напряжения поддерживается постоянной $U_{ex} = const$.

А.1.9 Номинальная выходная мощность усилителя — это часть мощности, которая может быть выделена в нагрузочном устройстве в пределах максимальных режимов и параметров усилителя

$$P_{выхН} = U_{выхН} I_{выхН} = I_{выхН}^2 R_H = U_{выхН}^2 G_H, \quad (A.13)$$

где G_H — проводимость нагрузочного устройства.

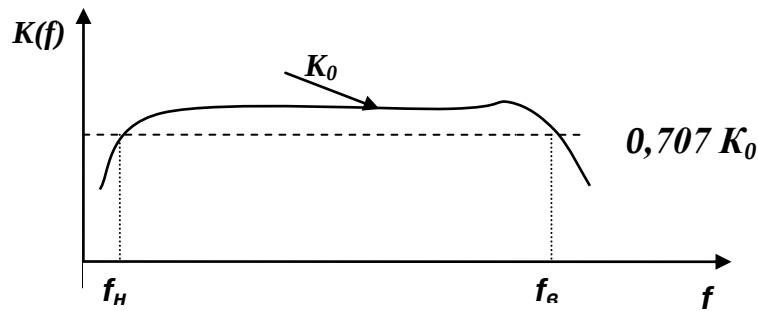


Рисунок А.1 – Амплитудно-частотная характеристика

А.1.10 Потребляемая усилителем мощность равна

$$P_{номр} = \sum_{i=1}^n I_{\Pi i} U_{\Pi i}, \quad (\text{A.14})$$

где $I_{\Pi i}$ – потребляемый ток от i -го источника питания;

$U_{\Pi i}$ – напряжение i -го источника питания.

А.1.11 Коэффициент полезного действия находят по формуле

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{номр}}. \quad (\text{A.15})$$

А.1.12 Зависимость коэффициента передачи от частоты усиливаемого сигнала называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя. Пример АЧХ показан на рисунке А.1.

А.1.13 Логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) – функциональная зависимость коэффициента передачи ИУМ от частоты гармонического сигнала, выраженная в децибелах, при условии, что входное напряжение остается величиной постоянной в диапазоне частот измерения АЧХ

$$K = 20 \lg K(f) \text{ [дБ]}. \quad (\text{A.16})$$

ЛАЧХ используются в процессе синтеза ИУМ и при анализе устойчивости усилителей к возбуждению, а также для определения ЛАЧХ многокаскадного усилителя путем сложения ЛАЧХ каскадов.

А.1.14 Для удобства взаимного сопоставления АЧХ усилителей с различными значениями максимального коэффициента передачи их обычно нормируют, представляя коэффициент усиления в виде относительной величины. Применительно к АЧХ, приведенной на графике рисунка А.1, можно записать

$$N_U(f) = \frac{K(f)}{K_0}, \quad (\text{А.17})$$

где $K(f)$ и K_0 – соответственно текущее и максимальное значение коэффициента усиления на средних частотах полосы пропускания.

Выполнив расчеты значений $N_U(f)$, соответствующих ряду значений $K(f)$, легко перейти от АЧХ нескольких видов к нормированным АЧХ (рисунок А.2).

В зависимости от области расположения полосы пропускания на оси частот различают усилители нижних частот (рисунок А.2, а), полосовые (рисунок А.2, б) и высоких частот (рисунок А.2, в).

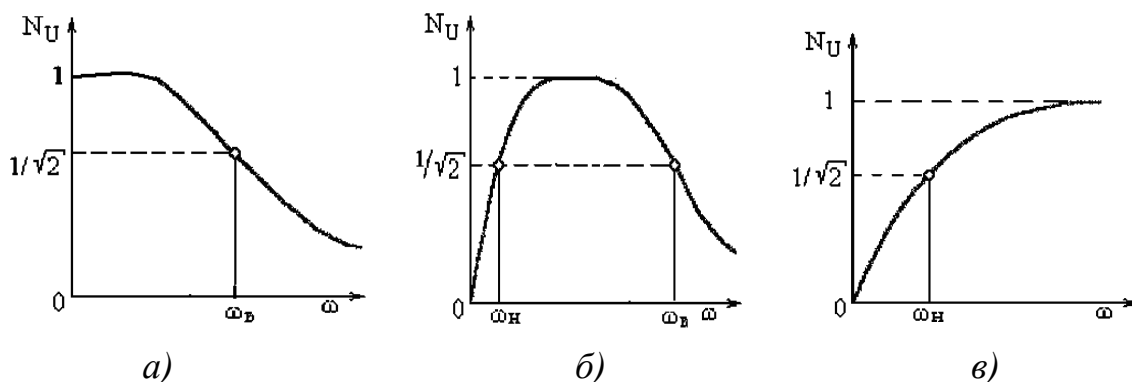


Рисунок А.2 – Нормированные АЧХ усилителя нижних частот (а),
полосового усилителя (б), усилителя верхних частот (в)

Если на нормированных АЧХ провести прямую, параллельную оси абсцисс, на уровне $1/\sqrt{2}=0,707$ (минус 3 дБ) и получить проекции точек пересечения этой прямой с АЧХ на ось абсцисс, то нетрудно графическим путем определить полосу пропускания усилителя.

Проекция на ось абсцисс первой точки пересечения соответствует нижней $f_n = \omega_n/2\pi$, а второй — верхней $f_v = \omega_v/2\pi$ граничным частотам полосы пропускания усилителя.

Полоса пропускания усилителя — это диапазон (разность) рабочих частот от верхней граничной частоты до нижней граничной частоты АЧХ, в пределах которой коэффициент передачи не снижается менее величины $1/\sqrt{2}=0,707$ (минус 3дБ) своего максимального значения K_0 на средних частотах.

$$\Delta f = f_v - f_n = (\omega_v - \omega_n) / 2\pi. \quad (A.18)$$

А.1.15 Нелинейные и частотные (линейные) искажения формы выходных сигналов в усилителе связаны соответственно:

а) с нелинейностью статических ВАХ применяемых активных компонент усилителя, которая проявляется нелинейной зависимостью уровня выходного от уровня входного сигналов.

б) с зависимостью амплитудных и фазовых характеристик пассивных и активных элементов от частоты сигнала, которая проявляется в изменении амплитуды и фазы усиленного выходного сигнала от частоты входного сигнала.

В связи с этим при анализе работы усилителей рассматривают соответственно два вида искажений выходного сигнала по отношению к входному: статические (нелинейные) и частотные (амплитудные и фазовые). В результате искажений изменяются частотный и фазовый спектры усиливаемого сигнала, приводящие к искажениям его формы.

А.1.16 Для количественной оценки нелинейных искажений усилителя служит

коэффициент нелинейных искажений, в основу расчета которого положена оценка относительной величины корня квадратного из суммы квадратов высших гармоник к основной (первой A_1) гармонике в выходном сигнале

$$K_n = \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots A_n^2} / A_1, \quad (\text{A.19})$$

где A_1 – действующее значение первой (основной) гармоники выходного сигнала;

$A_2 \dots A_n$ – действующие значения всех высших гармоник выходного сигнала.

А.1.17 Для количественной оценки частотных искажений усилителя служит коэффициент частотных искажений. Частотные (линейные) искажения обусловлены частотной зависимостью коэффициентов передачи пассивных цепей и активных элементов усилителя. Эти искажения проявляются зависимостью амплитуды усиленного выходного сигнала от частоты входного сигнала и характеризуются неравномерностью АЧХ, т.е. изменением коэффициента передачи усилителя на разных частотах (см. рисунки А.1, А.2).

Частотные искажения в идеальном ИУМ отсутствуют в бесконечной полосе частот, так что

$$AЧХ = K \text{ } \forall \text{ } \omega \text{ } \neq \text{ } const \quad (\text{A.20})$$

Частотные искажения у реальных ИУМ количественно оцениваются коэффициентом частотных искажений

$$M = \frac{K_0(\omega_{cp})}{K_{\Pi}(\omega)} \quad (\text{A.21})$$

где $K_0(\omega_{cp})$ – коэффициент передачи ИУМ на средних частотах АЧХ;

$K_{\Pi}(\omega)$ – коэффициент передачи ИУМ на заданной частоте АЧХ.

Обычно ИУМ характеризуется коэффициентом частотных искажений в

области нижних и верхних частот полосы пропускания ИУМ.

А.1.18 Фазовые искажения сигнала возникают из-за инерционности активных и пассивных элементов и характеризуются неравномерностью фазово-частотной характеристики, что вызывает также искажение формы выходного сигнала в сравнении с формой входного сигнала. В идеальном случае, если усилитель является частотннезависимым четырехполюсником, то фазовые искажения сигнала отсутствуют, тогда $\varphi(f) = const$, что в реальных цепях практически недостижимо.

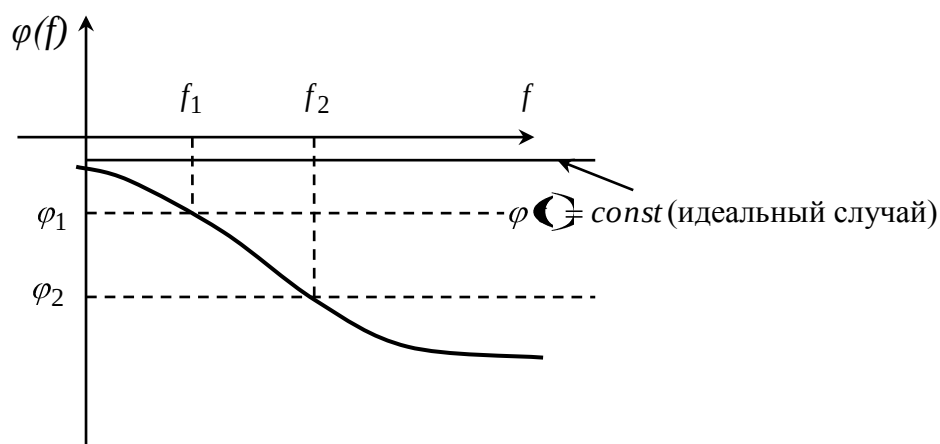


Рисунок А.3 – Фазо-частотная характеристика усилителя

А.1.19 Динамическая характеристика ИУМ – функциональная зависимость выходных уровней от значений входных уровней сигнала (рисунок А.4).

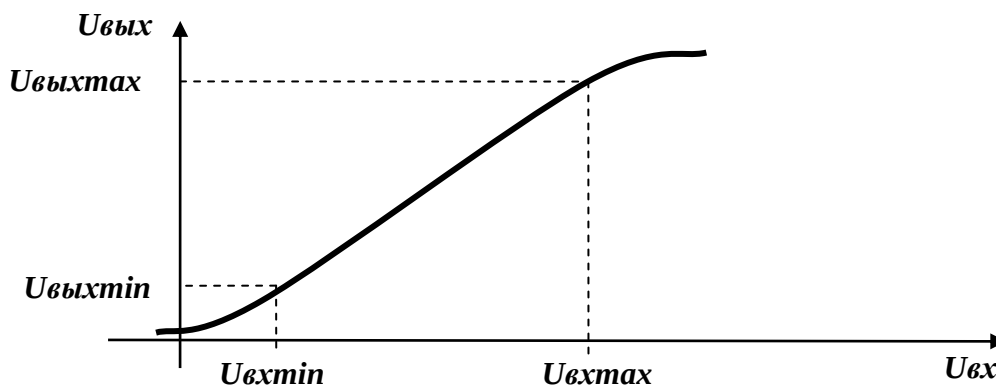


Рисунок А.4 – Динамическая (амплитудная) характеристика усилителя

На линейном участке динамической (амплитудной) характеристики усилителя можно определить:

-динамический диапазон по входным уровням сигнала

$$D_{ex} = U_{ex\max} - U_{ex\min}. \quad (\text{A.22})$$

-динамический диапазон по выходным уровням сигнала

$$D_{ex} = U_{ex\max} - U_{ex\min}. \quad (\text{A.23})$$

-примерное значение коэффициента усиления

$$K_0 = D_{ex} / D_{ex} = (U_{ex\max} - U_{ex\min}) / (U_{ex\max} - U_{ex\min}). \quad (\text{A.24})$$

А.1.20 Известно, что наряду с частотным коэффициентом передачи в частотной области свойства линейных усилителей можно оценить во временной области откликом в виде импульсной и переходной характеристик при воздействии некоторых элементарных (испытательных) сигналов.

В качестве элементарных испытательных сигналов используют дельта – сигналы, описываемые $\delta(t)$ – функцией, или ступенчатые сигналы, которые отображаются функцией включения $\sigma(t)$ (функцией Хевисайда). Выходной отклик линейного усилителя на входное воздействие в виде дельта функции представляет собой импульсную характеристику $h(t)$. При известных аналитических выражениях входного сигнала $U_{ex}(t)$ и импульсной характеристики $h(t)$ можно определить выходной сигнал усилителя операцией свертки (т.е. интегралом наложения или интегралом Дюамеля)

$$u_{ex} \Leftarrow \int_0^t u_{ex} \Leftarrow h \Leftarrow -\tau \rightleftharpoons \tau = \int_0^t u_{ex} \Leftarrow -\tau \rightleftharpoons h \Leftarrow \rightleftharpoons \tau. \quad (\text{A.25})$$

Следовательно, выходной сигнал $U_{вых}(t)$ усилителя в любой момент времени является результатом предельного суммирования множества произведений мгновенных значений входного сигнала $u_{вх}(\tau)$ в моменты времени (τ) и импульсной (весовой) характеристики усилителя $h(t-\tau)$, сдвинутой на (τ) , что является одним из условий физической реализуемости нахождения выходного отклика усилителя.

Выходной сигнал не может возникнуть до момента появления одного из множества мгновенных значений входного сигнала, какой бы ни был конкретный вид импульсной характеристики усилителя. Для реальных линейных ИУМ всегда $h(t) = 0$ при $t < 0$, поэтому свертку можно записать в более общей форме

$$u_{вых}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{вх}(\tau) h(t-\tau) d\tau. \quad (A.26)$$

A.1.21 Известно, что частотный коэффициент передачи можно определить по импульсной характеристике, используя прямое преобразование Фурье

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (A.27)$$

Если определен частотный коэффициент передачи $K(j\omega)$, то можно найти амплитудно-фазовую, амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики ИУМ. Для этого необходимо $K(j\omega)$ представить в виде комплексной функции, выделив действительную и мнимую части

$$K(j\omega) = P(\omega) + jG(\omega). \quad (A.28)$$

При этом амплитудно-фазовая характеристика определяется выражением

$$K(\omega) = |K(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}. \quad (A.29)$$

где $|K(j\omega)|$ – модуль частотного коэффициента передачи;

$\varphi(\omega)$ – фазо-частотная характеристика.

На комплексной плоскости амплитудно-фазовую характеристику изображают в виде годографа – кривой, которую пробегает модуль вектора $|K(j\omega)|$ в комплексной плоскости при изменении фазы $\varphi(\omega)$. По виду годографа можно судить о свойствах ИУМ (например, устойчивости к возбуждению).

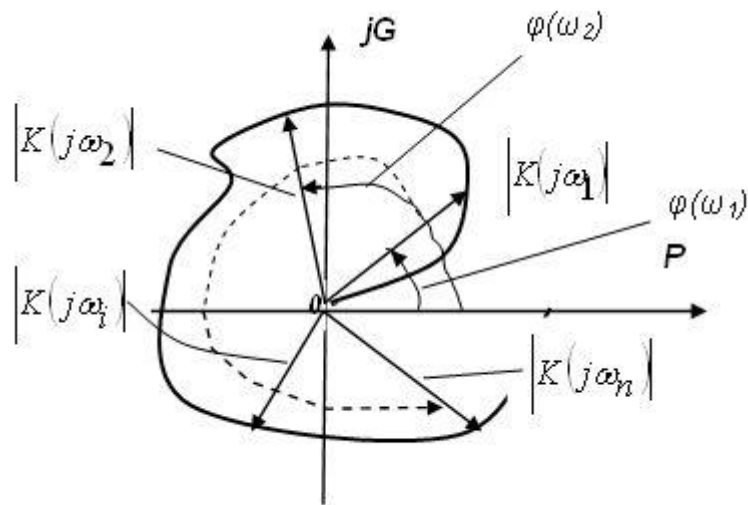


Рисунок А.5 – Амплитудно-фазовая характеристика

А.1.22 АЧХ является модулем частотного коэффициента передачи и находится из выражения

$$|K(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + G^2(\omega)}. \quad (\text{A.30})$$

А.1.23 ФЧХ находится по формуле

$$\varphi(\omega) = \arg K(j\omega) = \arctg \left[\frac{G(\omega)}{P(\omega)} \right]. \quad (\text{A.31})$$

На практике для оценки устойчивости ИУМ более часто используют ЛАЧХ и ФЧХ вместо годографа.

А.1.24 Очевидно и наличие обратного преобразования Фурье, с помощью которого можно определить импульсную характеристику усилителя по известному

частотному коэффициенту передачи

$$h(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau. \quad (A.32)$$

А.1.25 Выходной отклик линейного усилителя на входной сигнал, описываемый единичной функцией (функцией включения, функцией Хевисайда), является переходная характеристика $g(t)$. В этом случае отклик усилителя во временной области можно найти сверткой следующего вида

$$u_{вых}(t) = u_{вх}(t) * g(t) + \int_0^t \frac{du_{вх}(\tau)}{d\tau} g(t-\tau) d\tau. \quad (A.33)$$

Поскольку переходная характеристика цепи $g(t)$ есть отклик на единичную функцию $\sigma(t)$, которая в свою очередь формально представляет собой интеграл от дельта - функции $\delta(t)$, то между функциями $h(t)$ и $g(t)$ существуют интегро-дифференциальные соотношения

$$g(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau. \quad (A.34)$$

$$h(t) = \frac{dg(t)}{dt}. \quad (A.35)$$

А.1.26 Таким образом, АЧХ и ФЧХ позволяют оценивать свойства усилителей в частотной области, а соответствующие им импульсная и переходная характеристики исследовать свойства усилителей во временной области. Применение прямого и обратного преобразований Фурье позволяют проводить исследование свойств ИУМ как в частотной, так и во временной области. Важно, чтобы было известно аналитическое представление хотя бы одной из характеристик $h(t)$ или $g(t)$ или $K(j\omega)$.

А.2 Основные свойства усилительного устройства с отрицательной обратной связью

А.2.1 Одной из эффективных мер обеспечения заданных технических требований в ходе проектирования ИУМ является отрицательная обратная связь (ООС), вводимая в усилительные каскады.

ООС обеспечивает съём, передачу, сравнение части выходного сигнала с входным сигналом с целью стабилизации коэффициента передачи и достижения других заданных параметров ИУМ. Кроме того, введение частотнозависимой ООС, позволяет получить амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики необходимого вида.

А.2.2 Рассмотрим принцип действия ООС по функциональной схеме ИУМ, приведенной на рисунке А.6.

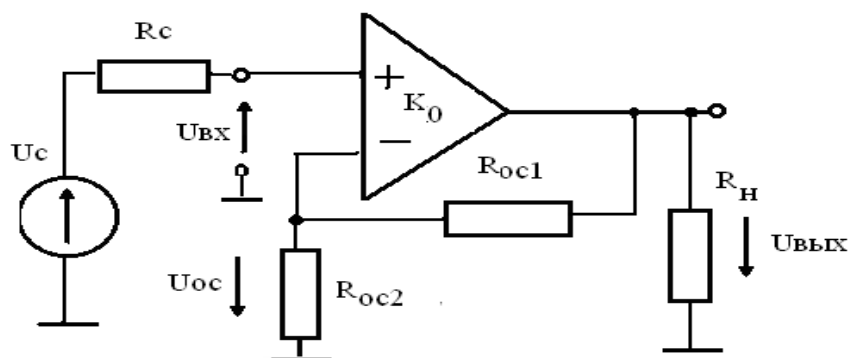


Рисунок А.6 – Функциональная схема усилителя с ООС

А.2.3 ИУМ с ООС включает: генератор сигнала U_c с выходным сопротивлением R_c , цепь прямой передачи сигнала – усилитель с инвертирующим и неинвертирующим входами, коэффициентом передачи K_0 и нагрузкой R_H , цепь обратной передачи с коэффициентом связи χ , который определяется резисторами R_{oc1} и R_{oc2} делителя выходного напряжения.

На неинвертирующий вход усилителя с ООС поступает сигнал U_{BX} , а на инвертирующий вход усилителя сигнал обратной связи U_{oc} . Следовательно, входной

сигнал и сигнал обратной связи поступают во входную цепь в противофазе.

А.2.4 Усилитель с коэффициентом передачи K_0 вместе с ООС можно представить как автоматическую систему стабилизации в виде структурной схемы, в которой опорным сигналом является усиливаемый сигнал $U_{\text{вх}}$ (рисунок А.7).

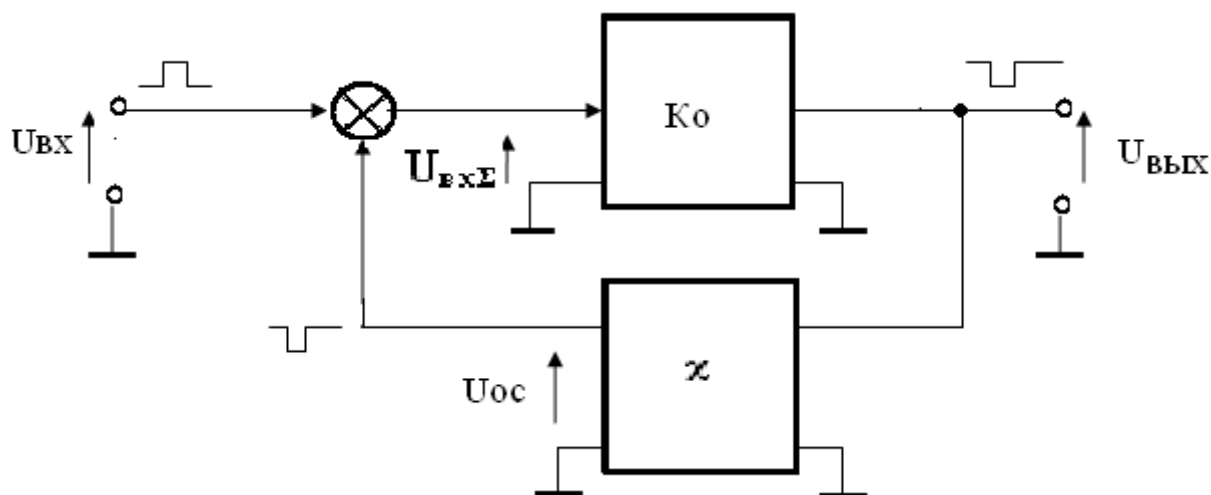


Рисунок А.7 – Структурная схема усилителя с отрицательной обратной связью

А.2.5 Противофазный сигнал обратной связи $U_{\text{ос}}$ сравнивается во входной цепи с опорным сигналом. В случае любых изменений выходного уровня сигнала, обусловленных воздействием непосредственно на усилитель дестабилизирующих факторов, цепь ООС воспринимает эти изменения и передает их во входную цепь для сравнения с опорным сигналом. В процессе сравнения вырабатывается определенного знака разность уровней входного сигнала и сигнала обратной связи, т.е. сигнал ошибки, который усиливается и возвращает смещение выходного уровня сигнала к исходному состоянию. Таким образом, стабилизируется выходной уровень сигнала, следовательно, и коэффициент передачи усилителя в целом.

А.2.6 Следуя обозначениям рисунка А.7 выведем основное соотношение для усилителя с ООС

$$U_{\text{вых}} = K_0 \cdot U_{\text{вх}\Sigma},$$

$$U_{BX\Sigma} = U_{BX} - \chi U_{BYX}.$$

Решая систему уравнений подстановкой второго уравнения в первое, получаем

$$U_{BYX} = K_0 (U_{BX} - \chi U_{BYX}) \Rightarrow K_0 U_{BX} - K_0 \chi U_{BYX},$$

$$U_{BYX} (1 + K_0 \chi) = K_0 U_{BX}.$$

Из последнего выражения коэффициент передачи $K_{оос}$ усилителя с ООС находится в виде

$$K_{оос} = \frac{U_{BYX}}{U_{BX}} = \frac{K_0}{1 + \chi K_0}, \quad (\text{A.36})$$

где $\chi K_0 = \frac{U_{OC}}{U_{BX\Sigma}}$ – фактор обратной связи (коэффициент передачи усилителя с разомкнутой петлей обратной связи;

$1 + \chi K_0$ – глубина обратной связи.

Если коэффициент передачи усилителя без обратной связи K_0 достаточно большой, то выражение (A.36) упростится и коэффициент передачи усилителя с ООС будет равен:

$$K_{ООС} = \frac{U_{BYX}}{U_{BX}} \cong \frac{1}{\chi}. \quad (\text{A.37})$$

Таким образом, при высоком значении K_0 коэффициент передачи усилителя с обратной связью $K_{оос}$ определяется величиной, зависящей только от коэффициента передачи цепи обратной связи. При этом нестабильность $K_{оос}$ определяется нестабильностью параметров пассивных элементов цепи обратной связи, которые существенно стабильнее параметров полупроводниковых усилительных приборов.

А.2.7 Определим относительную нестабильность коэффициента передачи

ИУМ с ООС. Для этого найдем полный дифференциал из выражения (А.41):

$$dK_{ООС} = K_{ООС} \frac{1}{1 + \chi K_0} dK_0 = \frac{1}{1 + \chi K_0} dK_0,$$

$$\frac{dK_{ООС}}{K_{ООС}} = \left(\frac{1}{1 + \chi K_0} dK_0 \right) / \frac{K_0}{1 + \chi K_0},$$

$$\frac{dK_{ООС}}{K_{ООС}} = \frac{dK_0/K_0}{1 + \chi K_0}. \quad (A.38)$$

Видно, что относительная нестабильность коэффициента передачи усилителя с ООС в $(1 + \chi K_0)$ раз меньше, чем относительная нестабильность коэффициента передачи усилителя без обратной связи.

А.2.8 Проиллюстрируем это важное свойство усилителя с ООС простым примером, приведенным в таблице А.1

Из таблицы видно, что с увеличением коэффициента передачи K_0 усилителя без ООС при одинаковом коэффициенте обратной связи χ :

-коэффициент передачи усилителя с ООС стремится к величине $1/\chi$;

-относительная нестабильность коэффициента передачи усилителя с ООС $dK_{ООС}/K_{ООС}$ становится значительно меньше

Таблица А.1 – Пример влияния отрицательной обратной связи на параметры усилителя в зависимости от K_0

K_0	χ	$K_{ООС}$	$1 + \chi K_0$	$dK_0/K_0, \%$	$dK_{ООС}/K_{ООС}, \%$
10	1/5	3,3	3	30	10
100	1/5	4,7	21	30	1,4
1000	1/5	5	201	30	0,15
10000	1/5	5	2001	30	0,015

В альтернативном случае, т.е. при известном и достаточно большом

коэффициенте передачи исходного усилителя K_0 , можно изменением глубины обратной связи варьировать величинами $K_{ООС}$ и $dK_{ООС}/K_{ООС}$ и достичь заданных значений. Однако, в любом из рассмотренных вариантов уменьшение неустойчивости происходит за счет снижения K_0 исходного усилителя до значения $K_{ООС}$.

А.2.9 Следовательно, при проектировании ИУМ необходимо обеспечивать достаточно высокий коэффициент передачи исходного усилителя для достижения стабильных параметров ИУМ, охваченного отрицательной обратной связью. В противном случае, при невысоком коэффициенте передачи исходного усилителя, следует вводить более глубокую обратную связь, уменьшая коэффициент передачи проектируемого усилительного каскада.

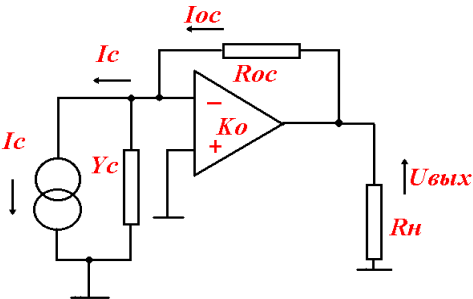
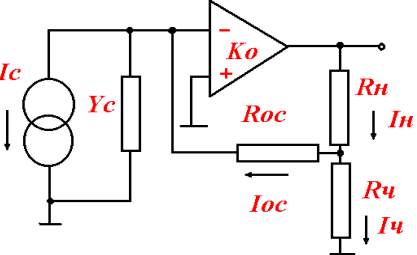
А.2.10 В таблице А.2 приведены структурные схемы усилителей с различными видами ООС и основные параметры в области средних частот. Качественная картина влияния различных видов ООС на основные параметры ИУМ показана в таблице А.3, из которой видно, что введение ООС любого вида расширяет полосу усиливаемых частот, но не изменяет практически площадь усиления. В зависимости от схемы включения цепи обратной по входу и выходу усилителя различают следующие виды ООС:

- последовательная связь по напряжению (усилитель напряжения);
- последовательная связь по току (преобразователь напряжения в ток - трансформатор проводимости);
- параллельная связь по напряжению (преобразователь тока в напряжение – трансформатор сопротивления);
- параллельная связь по току (усилитель тока).

Таблица А.2 – Виды и основные параметры усилителей с отрицательной обратной связью в области средних частот

Тип усилителя		Схема включения	Коэффициент передачи	Входное сопротивление	Выходное сопротивление
1		2	3	4	5
Неинвертирующий	Усилитель напряжения		$K_U = \frac{K_0}{1 + \chi K_0} = \frac{1}{\chi}$ $K_U = \left(1 + \frac{R_{oc}}{R}\right)$	$R_{ex} = R_{ex0} \left(1 + \chi K_0\right)$	$R_{вых} = \frac{R_{вых0}}{1 + \chi K_0}$
	Трансформатор проводимости преобразователь (U-I)		$G_{II} = \frac{G_{II0}}{1 + \chi G_{II0}} = \frac{1}{\chi} = \frac{1}{R_c}$	$R_{ex} = R_{ex0} \left(1 + \chi K_0\right)$	$R_{вых} = R_{вых0} + R_c \left(1 + \chi K_0\right)$

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4	5
Инвертирующий	Трансформатор сопротивления 	$R_{\Pi} = -R_{OC}$	$R_{вх} = \frac{R_{OC}}{1 + K_0}$	$R_{вых} = \frac{R_{вых_0}}{1 + \chi K_0}$
	Усилители тока 	$K_I = -\left(1 + \frac{R_{OC}}{R_{\chi}}\right)$	$R_{вх} = \frac{R_{OC}}{1 + K_0}$	$R_{вых} = R_{вых_0} + R_{\chi} \left(1 + \chi K_0\right)$

Обозначения: $R_{вх_0}$ - входное сопротивление усилителя без ООС; $R_{вых_0}$ - выходное сопротивление усилителя без ООС;

R_{Π} - сопротивление передачи усилителя с ООС; $G_{\Pi 0}$ - проводимость передачи усилителя без ООС; R_{χ} - измерительное (чувствительное) сопротивление цепи ООС.

Таблица А.3 – Влияние различных видов ООС на основные параметры усилителей

Вид ООС	Отношение K_{oc}/K_0	Входное сопротивление, $R_{вх}$	Выходное сопротивление, $R_{вых}$	Коэффициент гармоник, $K_{г}$	Площадь усиления, $K_{oc} \cdot \Delta F_{oc}$	Отношение площадей усиления $\frac{K_{oc} \cdot \Delta F_{oc}}{K \cdot \Delta F}$
Последовательная по напряжению	≤ 1	Увеличивается	Уменьшается	Уменьшается	Увеличивается	≈ 1
Последовательная по току	≤ 1	Увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	≈ 1
Параллельная по напряжению	≤ 1	Уменьшается	Уменьшается	Уменьшается	Увеличивается	≈ 1
Параллельная по току	≤ 1	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	≈ 1

Обозначения: ΔF_{oc} - полоса пропускания усилителя с ООС;

ΔF - полоса пропускания усилителя без ООС.

А.2.11 Для доказательства свойства расширения полосы усиливаемых частот с введением ООС представим, что усилитель состоит из последовательно включенных усилителя и фильтра нижних частот, охваченных общей ООС (ФНЧ - интегрирующее звено первого порядка с постоянной времени τ). Также условимся, что усилитель имеет полосу частот с бесконечно большой полосой пропускания. В этом случае коэффициент передачи усилителя с фильтром можно представить в операторной форме без ООС в виде

$$W_{\Phi} = \frac{K_O}{p\tau + 1}, \quad (\text{A.39})$$

где τ – постоянная времени фильтра.

Тогда коэффициент передачи усилителя с ООС будет определяться выражением

$$\begin{aligned} W_{oc} &= \frac{K_O / (p\tau + 1)}{1 + K_O \chi / (p\tau + 1)} = \frac{K_O}{(p\tau + 1) \chi K_O} = \\ &= \frac{K_O}{p\tau + 1 + \chi K_O} = \frac{K_O}{1 + \chi K_O} \cdot \frac{1}{p\tau / (1 + \chi K_O) + 1} \end{aligned}$$

$$W_{oc} = \frac{K_{ООС}}{p \frac{\tau}{1 + \chi K_O} + 1}. \quad (\text{A.40})$$

А.2.12 Таким образом, постоянная времени усилителя с ФНЧ и общей ООС уменьшается в $(1 + \chi K_O)$ раз. Следовательно, верхняя частота среза ФНЧ увеличилась в такое же число раз

$$\omega_{срООС} = \frac{1}{\tau / (1 + \chi K_O)} = (1 + \chi K_O) \frac{1}{\tau}. \quad (\text{A.41})$$

А.2.13 Для количественной оценки нелинейных искажений усилителя служит коэффициент нелинейных искажений, в основу расчета которого положена оценка в выходном сигнале величины среднеквадратичного значения уровня высших гармоник к уровню основной гармоники

$$K_H = \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_m^2} / A_1, \quad (A.42)$$

где A_1 – действующее значение первой (основной) гармоники выходного сигнала;

A_2, A_n – действующие значения всех высших гармоник выходного сигнала.

А.2.14 Определим влияние ООС на коэффициент гармоник ИУМ. Величина любой гармоники на выходе ИУМ с ООС будет равна

$$A_{iООС} = A_i - A_{iООС} K_o \chi.$$

А.2.15 Отсюда величина каждой гармоники определяется зависимостью:

$$A_{iООС} = A_i / (1 + K_o \chi),$$

а коэффициент нелинейных искажений соответственно

$$K_{HООС} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2}}{A_1} / (1 + K_o \chi).$$

Окончательно можно записать:

$$K_{HООС} = K_H / (1 + K_o \chi), \quad (A.43)$$

т.е. коэффициент нелинейных искажений уменьшается также на глубину ООС.

А.3 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение для ИУМ. Усилительное устройство представляет собой...?
- 2 Какие признаки используются для классификации электронных усилительных устройств?
- 3 Какие типы электронных усилителей применяются?
- 4 Назовите основные элементы усилительного каскада.
- 5 Какие используются режимы работы усилительных каскадов?
- 6 За счёт какого преобразования энергии повышается мощность сигнала в ИУМ?
- 7 Опишите процесс усиления электрических сигналов.
- 8 Каким законом определяется процесс преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала усилителя?
- 9 Какую роль выполняют усилительные элементы в ИУМ?
- 10 Что определяет коэффициент передачи?
- 11 Как определяется входное сопротивление?
- 12 Как определяется выходное сопротивление?
- 13 Полоса пропускания усилителя - это...?
- 14 Как называют часть мощности, выделяющейся в нагрузочном устройстве?
- 15 Как называют связь между выходными и входными цепями усилителя?
- 16 Какую связь называют отрицательной обратной связью?
- 17 Какую связь называют положительной обратной связью?
- 18 Сравните основные параметры усилительных каскадов с 4-мя видами обратных связей.
- 19 Что представляют собой каждая из характеристик: переходная, вольтамперная, фазо-частотная, амплитудно-частотная, амплитудно-фазовая?
- 20 Какие виды межкаскадных связей ИУМ известны?
- 21 Что понимают под устойчивостью ИУМ?
- 22 Назовите два условия возбуждения ИУМ?

23 Выполняется ли условие суперпозиции в ИУМ как в линейной системе?

24 В каких случаях используют частотно-зависимые обратные связи?