

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Кафедра радиоэлектроники и систем связи

Б.И. Авдоченко

В.Г. Романова

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические указания по курсовой работе по дисциплине «Схемотехника»
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2026

УДК 621.3
ББК 32.85
А18

Рецензент:

Трубачев А.А., доцент кафедры радиоэлектроники
и систем связи ТУСУР, канд.техн. наук

Авдоченко, Борис Иванович

А18 Схемотехническое проектирование электронных устройств:
Методические указания по курсовой работе/ Б.И. Авдоченко, В.Г. Романова.
– Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026. – 62 с.

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы по дисциплинам касающимся схемотехники электронных устройств. Содержат требования и рекомендации по оформлению защите работы, а также приводится последовательность выполнения курсовой работы.

Предназначено для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено протоколом на заседании кафедры протокол № 1 от 29.08.2025 г.

УДК 621.3
ББК 32.85

© Авдоченко Б.И., Романова В.Г.,
2026
© Томск: гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение.....	5
1 Задачи курсовой работы.....	6
2 Содержание занятий	7
2.1 План теоретических занятий.....	8
2.2 Трудоемкость работ	8
3 Рекомендации по выбору принципиальной схемы устройства	10
3.1 Обратные связи в ОУ.....	10
3.2 Входной усилительный каскад.....	12
3.3 Регулировка усиления	13
3.4 Промежуточные усилительные каскады	14
3.5 Выходные каскады.....	15
3.6 Активные фильтры	17
3.6.1 Активные фильтры нижних частот.....	18
3.6.2 Активные фильтры верхних частот	20
3.6.3 Активные полосовые и режекторные фильтры	23
3.6.4 Активные фильтры второго порядка	25
3.6.5 Селективные фильтры	27
3.7 Интегрирующее устройство.....	30
3.8. Дифференцирующее устройство.....	31
3.9 Гираторы	33
3.9.1 Электронные эквиваленты индуктивности	33
3.9.2 Электронные эквиваленты конденсаторов.....	35
3.10 Трансимпедансные усилители.....	36
3.11 Сумматоры сигналов	37
3.12 Компараторы	39
3.13. Источники опорного напряжения на ОУ.....	42
3.14. Однополярное питание ОУ	43
4. Содержание пояснительной записки	44
4.1 Структурная схема	44

4.2 Электрическая схема	45
4.3. Моделирование устройства.....	46
4.4. Экспериментальные исследования разработанного устройства.....	47
Рекомендуемая литература	52
Приложение А. (обязательное) Шаблон содержания КР.....	53
Приложение Б. (обязательное) Титульный лист.....	55
Приложение В. (обязательное) Образец Технического задания.....	56
Вопросы для самоконтроля.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Целью курсовой работы (КР) по дисциплине «Схемотехника» является углубленное изучение основ проектирования, моделирования и изготовления типовых радиотехнических устройств. В данном методическом пособии рассматриваются типовые устройства, которые могут широко применяться на практике: усилители различного назначения, полосовые и селективные фильтры, устройства радиоавтоматики, аналоговые электронные устройства.

Важным этапом КР является выбор схемотехнических решений, при котором рассматриваются различные варианты выполнения технического задания (ТЗ) с учетом характеристик устройств и особенностей их работы. Для реализации заданных характеристик проводится выбор активных и пассивных элементов, выполняются расчеты их значений.

Этап компьютерного моделирования проектируемого устройства позволяет не только проверить работоспособность, но и выявить возможные ошибки или недостатки разработанного устройства, что значительно снижает вероятность появления проблем на стадии изготовления.

КР завершает изучение курса «Схемотехника» и является важным шагом в профессиональной подготовке специалистов в области радиотехники, она позволяет объединить теоретические знания с практическими навыками. После выполнения работы считается, что студенты познакомились с необходимыми теоретическими сведениями, имеют практические навыки по расчету типовых схем, научились изготавливать макеты спроектированных устройств и снимать их экспериментальные характеристики.

1 ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

При выполнении курсовой работы решаются следующие задачи:

- Анализ технического задания и выбор грамотного инженерного решения;
- Развитие навыков анализа и расчета аналоговых электронных устройств с использованием компьютерной техники;
- Знакомство с практическими приемами решения инженерных задач;
- Систематизация знаний изученного предмета с учетом связей и зависимостей между разделами дисциплины.

В соответствии с рабочей программой, основная работа выполняется студентом самостоятельно. Курсовая работа предполагает в основном индивидуальную работу преподавателя с каждым студентом в виде консультации.

Рекомендуется следующая организация работы.

Все записи в ходе выполнения КР проводятся на компьютере. На рабочем столе создается файл, из Приложения А скачивается шаблон содержания КР, которое может быть в дальнейшем скорректирована по ходу выполнения работы. В шаблон вносится титульный лист из Приложения Б и вносится индивидуальное задание, оформленное в соответствии с Приложением В.

Этапы выполняемой КР вносятся в соответствующие разделы шаблона, в которые вносятся все записи: варианты схем, результаты расчетов, данные по моделированию, результаты экспериментов, черновые наброски. Нужно стараться все записи делать в расчете на чистовой вариант, без пропусков и сокращений. После окончания работы над пояснительной запиской (ПЗ) к КР ненужные записи удаляются. Таким образом, ПЗ пишется с самого начала, а не в конце курсовой работы

С целью экономии времени работы над КР необходимо как можно раньше выяснять все возникшие вопросы у руководителя.

2 СОДЕРЖАНИЕ ЗАНЯТИЙ

Теоретическая часть. При изучении теоретических материалов предполагается, что студенты уже знакомы со «Схемотехникой». В начале курса, на первом занятии, до выдачи задания, дается выборочный объем информации из курса «Схемотехники», с упором на практическое применение при разработке различных устройств.

Самостоятельная работа является основным видом работы. Направлена на осмысленное применение теоретических материалов в КР, и при любом индивидуальном задании состоит из следующих этапов:

- анализ ТЗ и выбор оптимального решения;
- расчет структурной схемы устройства;
- выбор электрической схемы устройства;
- расчет элементов схемы;
- моделирование разработанного устройства и расчет результирующих характеристик;
- изготовление разработанного устройства и снятие характеристик в соответствии с ТЗ;
- оформление пояснительной записки **по ОС ТУСУР в соответствии с этапом эскизного проектирования.**

*После выдачи задания на курсовую работу и знакомства с требованиями по содержанию и оформлению КР, каждый студент начинает проектировать свое устройство и основные занятия проводятся в виде консультации, в ходе которой будет контролироваться ход выполнения КР, выставляться контрольные точки, а, главное, **решаются возникающие при выполнении индивидуальных заданий вопросы.***

Для проверки КР и исправлений по замечаниям преподавателя электронная версия ПЗ выкладывается в электронный журнал. Для исправлений замечаний ПЗ должна быть сдана за неделю до срока защиты.

Твердая копия ПЗ со всеми подписями перед защитой представляется на кафедру. Выполненная КР должна публично защищаться перед комиссией, для чего готовится краткая (5-10 мин) презентация.

2.1 План теоретических занятий

Всего планируются девять занятий на следующие темы:

1. Теория. Транзисторы и области их применения, операционные усилители и устройства на их основе;
2. Индивидуальные задания, особенности их проектирования.

Пояснительная записка:

- Составление структурной и принципиальной схемы;
- Выбор элементной базы и расчет значений элементов.

3. Моделирование устройства и расчет характеристик;

4. Оформление полученных результатов в виде черновика ПЗ.

Знакомство с ОС ТУСУР;

5. Сборка устройства на плате;

6. Снятие экспериментальных характеристик;

7. Оформление ПЗ и сдача на проверку;

8. По результатам проверки работы: исправление ошибок в ПЗ.

Подготовка презентации;

9. Защита КР.

Посещение всех занятий и последовательное выполнение всех операций гарантирует выполнение и защиту в срок КР.

2.2 Трудоемкость работ

Для контроля выполнения этапов КР проводится оценки трудоемкости работ в процентах с нарастающим итогом:

- Знакомство с заданием на курсовой проект – 5%;

- Анализ возможных вариантов выполнения задания – 10%;
 - Составление структурной схемы устройства – 15%;
 - Выбор элементной базы – 20%;
 - Составление принципиальной электрической схемы устройства – 25%;
 - Расчет электрической схемы устройства – 30%;
 - Моделирование устройства. Снятие теоретических характеристик.
- Проверка выполнения задания, подтверждение выполнения заданных характеристик – 40%;
- Сборка устройства на плате. Исследование характеристик устройства – 50%;
 - Оформление пояснительной записки в соответствии с требованиями ОС ТУСУР – 60%;
 - Сдача на проверку, коррекция по итогам, исправления по замечаниям – 70%;
 - Защита – 100%.

3 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

Рекомендуется выполнение КП на основе операционных усилителей, что значительно упрощает расчет устройства из-за характеристик ОУ, близких к идеальным: $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$, $K_o \rightarrow \infty$, $C_{вх} \rightarrow 0$, т.е. собственные параметры ОУ при правильном его выборе в расчетах можно не учитывать. Все параметры устройства определяются обратными связями.

В пособии приводятся схемы без подключения источников питания. В реальной электрической схеме их необходимо указывать и обозначать номера выводов ОУ.

3.1 Обратные связи в ОУ

Цепь обратной связи образуется посредством включения двухполюсника обратной связи Z_2 между инвертирующим входом и выходом операционного усилителя, рисунок 3.1.

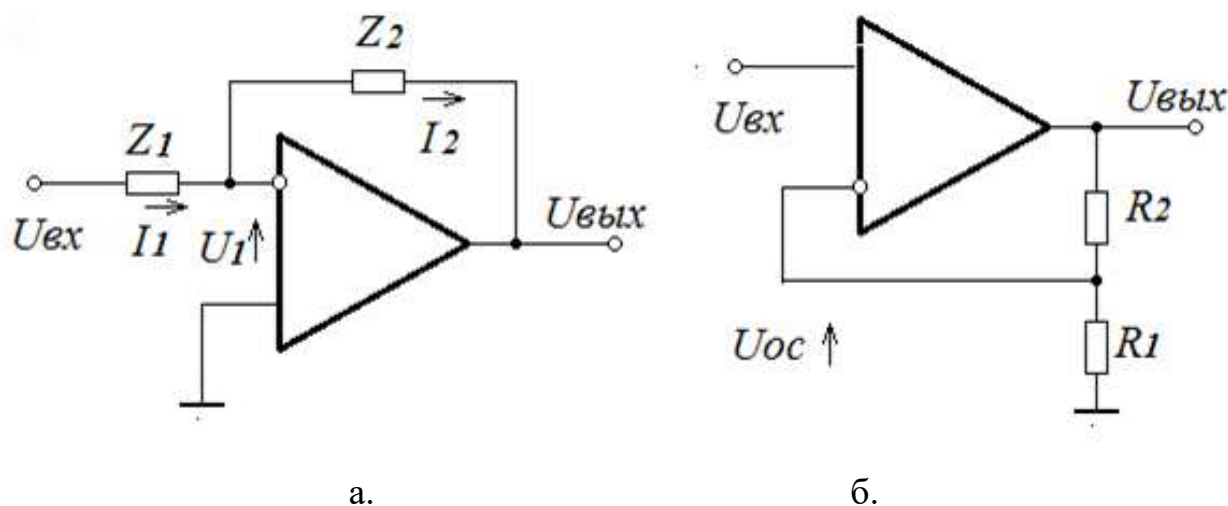


Рисунок 3.1 – Инвертирующий усилитель с цепями комплексной обратной связи (а), неинвертирующий усилитель (б)

Входное сопротивление усилителя, по сравнению с выходным сопротивлением источника сигнала, бесконечно велико (для ОУ с ПТ на

входе это допущение практически всегда выполняется); выходное сопротивление равно нулю. При этих условиях:

$$I_1 = I_2.$$

Значения токов, протекающих по резисторам входной цепи Z_1 и по резистору цепи обратной связи Z_2 , определяются по формулам:

$$I_1 = \frac{U_{BX} - U_1}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{U_1 - U_{ВЫХ}}{Z_2}$$

где, U_1 – напряжение между входами ОУ.

С учетом того, что выходное напряжение усилителя $U_{вых} = -KU_1$ получим:

$$U_{ВЫХ} = \frac{Z_2}{Z_1} U_{BX} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_U} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)}$$

При условии $K_u \rightarrow \infty$, получим значение коэффициента передачи ОУ, охваченного обратной связью:

$$K_{oc} = U_{вых}/U_{вх} = -Z_2/Z_1$$

Коэффициент передачи ОУ, охваченного внешней ОС, прямо пропорционален сопротивлению двухполюсника Z_2 , включенного между выходом и инвертирующим входом операционного усилителя и обратно пропорционален сопротивлению двухполюсника Z_1 , включенного между входом и источником сигнала.

Из формулы следует, что коэффициент передачи ОУ, охваченного внешней ОС, при условии $K_u \rightarrow \infty$, не зависит от коэффициента усиления ОУ.

В качестве элементов Z_1 и Z_2 могут применяться различные двухполюсники, линейные и нелинейные, частотно-независимые и частотно-зависимые. В зависимости от выполнения цепей обратной связи операционный усилитель реализует различные математические операции и широко применяется в аналоговых устройствах.

3.2 Входной усилительный каскад

Рекомендованные схемы входного каскада показаны на рисунке 3.2. Наиболее часто используется схема с инверсным включением, показанная на рисунке 3.2, а. Основной ее **недостаток** – включение на входе последовательно с источником сигнала резистора R_1 , увеличивающего общий коэффициент шума устройства, поэтому схема не используется в малошумящих устройствах, например, в микрофонных усилителях. Ее **преимущество** – входное сопротивление равно R_1 , что позволяет согласовывать устройство с источником сигнала. **Если задано входное сопротивление устройства, то используется эта схема.**

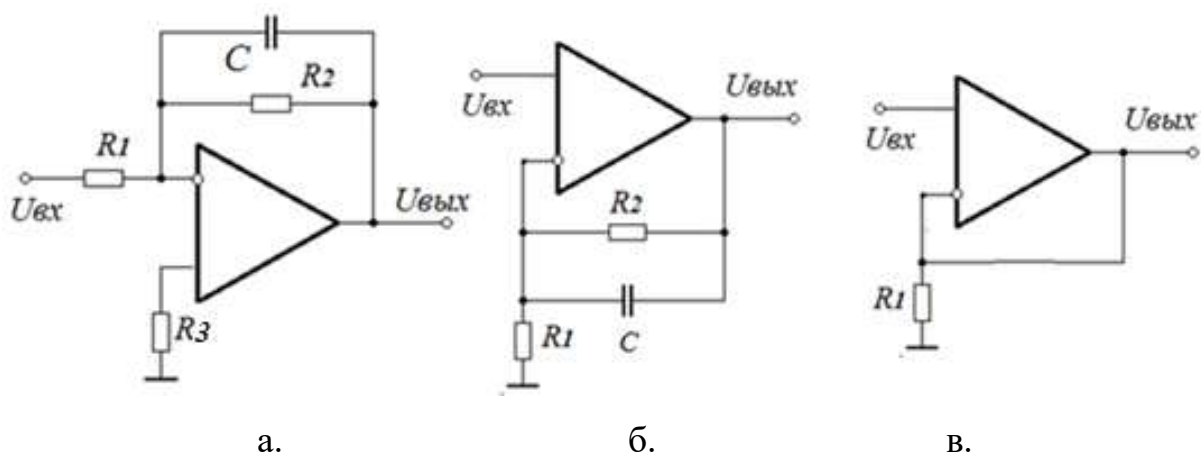


Рисунок 3.2 – Рекомендуемые схемы входных каскадов

Входное сопротивление схемы с неинвертирующим включением, показанной на рисунке 3.2, б, значительно, в глубину обратной связи, превышает входное сопротивление ОУ из-за последовательной ОС. Подобный каскад дает преимущество при работе устройства от источника тока.

Максимальное входное сопротивление и минимальное выходное сопротивление обеспечивает повторитель, схема которого показана на рисунке 3.2, в. Этот каскад также широко используется в качестве буферного каскада, когда требуется максимальная развязка между источником питания и нагрузкой.

С целью уменьшения шума устройства, в малошумящих устройствах рекомендуется применять включение в цепь параллельной ООС конденсатора C , ограничивающего шумовую полосу.

3.3 Регулировка усиления

Регулировка усиления в основном производится изменением глубины ОС. Рекомендуемые схемы регулировки показаны на рисунок 3.3.

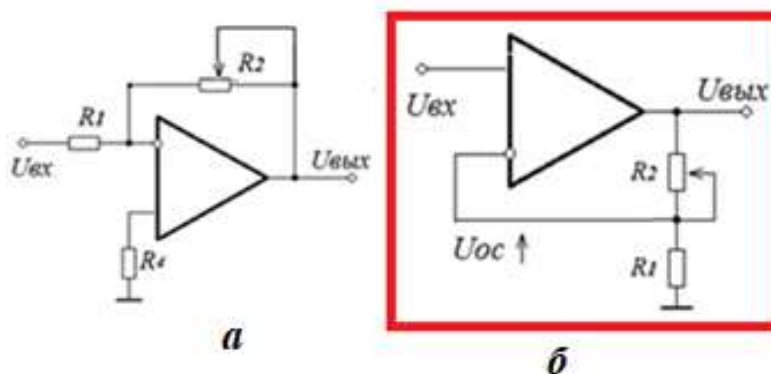


Рисунок 3.3 – Регулировка усиления изменением глубины ОС

Схема с инвертирующим включением, рисунок 3.3, а, применяется при необходимости обеспечения нужного входного сопротивления, равного R_1 . Коэффициент усиления инвертирующего включения

$$K_{ОС\text{ ин}} = -R_2/R_1,$$

для неинвертирующего включения, показанного на рисунке 3.3, б,

$$K_{ОС\text{ не}} = 1 + R_2/R_1.$$

Схема имеет входное сопротивление, значительно превышающее справочное значение входного сопротивления ОУ благодаря последовательной ООС.

Подбором R_2 в обеих схемах нужно обеспечить заданный диапазон регулировки. Для ограничения минимального коэффициента усиления используется последовательное с R_2 включение добавочного резистора.

С целью сохранения частотной характеристики проектируемого устройства в процессе регулировки усиления, полоса пропускания

схемы регулировки усиления должна значительно перекрывать требуемую по ТЗ полосу пропускания устройства.

3.4 Промежуточные усилительные каскады

Промежуточные каскады обеспечивают основное усиление и форму частотной характеристики. Типовые схемы промежуточных каскадов, представляющие собой полосовые фильтры, показаны на рисунке 3.4.

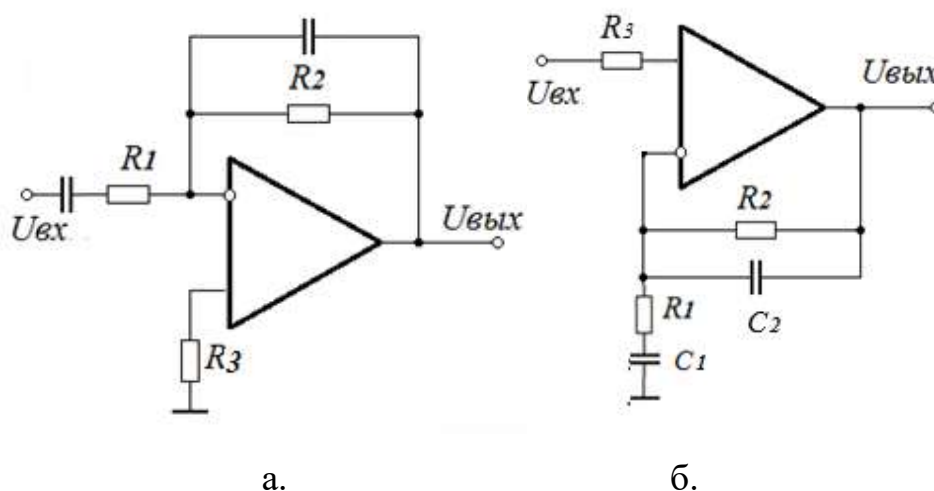


Рисунок 3.4 – Схемы полосовых фильтров первого порядка: а – инвертирующего, б – неинвертирующего

Значение коэффициента усиления определяется для средних частот, на которых влиянием конденсаторов цепи ОС можно пренебречь. Для инвертирующего включения, рисунок 3.4, а, коэффициент усиления

$$K_{ОС\text{ ИИ}} = -R_2/R_1,$$

для неинвертирующего включения, рисунок 3.4, б,

$$K_{ОС\text{ НЕ}} = 1 + R_2/R_1.$$

Расчет величин емкостей, обеспечивающих заданные значения f_H и f_B производится после выбора резисторов!

Из-за большой разницы постоянных времени τ_B и τ_H расчет цепочек R_1C_1 и R_2C_2 можно проводить независимо, по значениям верхней и нижней частоты

$$\tau_H = R_1C_1 = 1/2\pi f_H,$$

$$\tau_B = R_2 C_2 = 1/2\pi f_6,$$

$$C_1 = 1/2\pi R_1 f_6,$$

$$C_2 = 1/2\pi R_2 f_6.$$

Рекомендуется остальные каскады делать значительно более широкополосными, тогда АЧХ устройства определяется промежуточным каскадом, выполненным по схеме полосового фильтра.

Более подробно АЧХ промежуточных каскадов см. в разделе «Активные полосовые и режекторные фильтры».

3.5 Выходные каскады

Если операционный усилитель не может обеспечить на нагрузке заданные токи, напряжения или мощность, необходимо использовать выходной каскад. Выходной каскад обеспечивает необходимые токи и напряжения на заданной нагрузке, выходную мощность. КПД устройства в основном определяется схемой выходного каскада.

Основным критерием выбора схемы выходного каскада служит мощность, отдаваемая в нагрузку или выходной ток каскада.

При выходном токе более 100 мА рекомендуется использование двухтактного выходного каскада на транзисторах разной проводимости, работающий в режиме АВ. Рекомендуемая схема каскада показана на рисунке 3.5, а.

В этой схеме начальное смещение U_{60} , необходимое для ликвидации нелинейных искажений, обеспечивается с помощью диодов VD_1, VD_2 . Регулировка напряжения смещения производится изменением прямого тока через диоды с помощью резисторов R_1, R_2 .

Транзисторы включены по схеме с общим коллектором, поэтому коэффициент усиления по напряжению $K_U \approx 1$, каскад усиливает по току, $K_i \approx R_{ex}/R_n$ и, соответственно, по мощности.

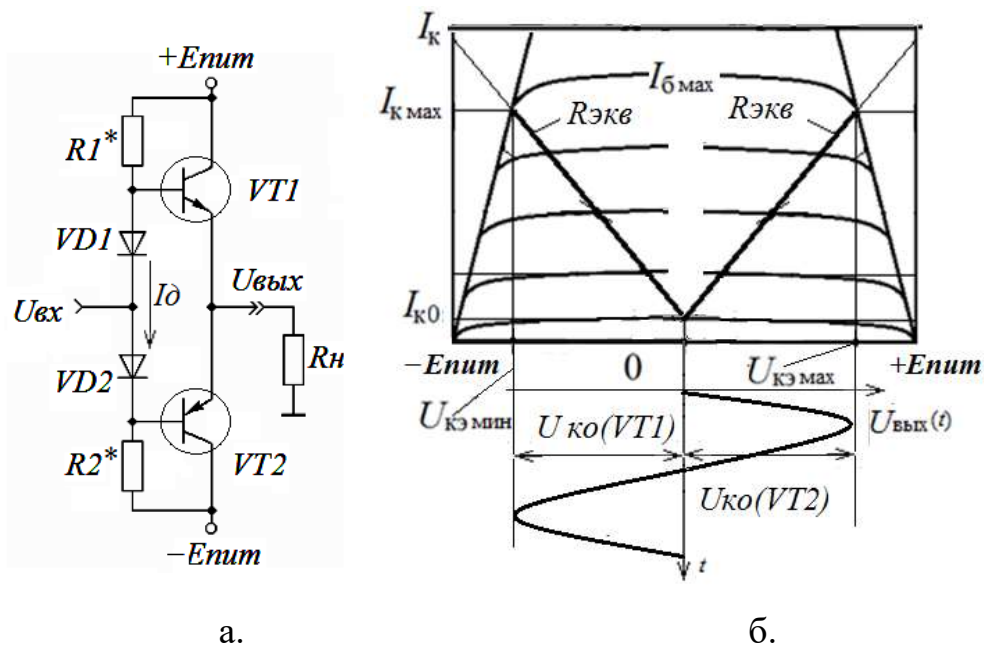


Рисунок 3.5 – Схема двухтактного выходного каскада (а), ВАХ каскада (б)

Расчет каскада производится для одной половины схемы, т.к. схема симметричная. Для получения нужного уровня выходного напряжения необходимо правильно выбрать напряжение питания, $E_{пит} = U_{вых} + U_{нас}$, рисунок 3.5, б.

Следует учесть, что для раскачки выходного каскада необходим достаточный ток от промежуточного каскада или достаточно большой коэффициент передачи тока коллектора выходного транзистора. Для этого в выходном каскаде **используются составные транзисторы**, например, КТ972 – КТ973 или им подобные, а также используются ОУ с достаточным выходным током

Рекомендуется включение общей обратной связи с выхода устройства на инверсный вход предоконечного каскада, выполненного по схеме полосового фильтра.

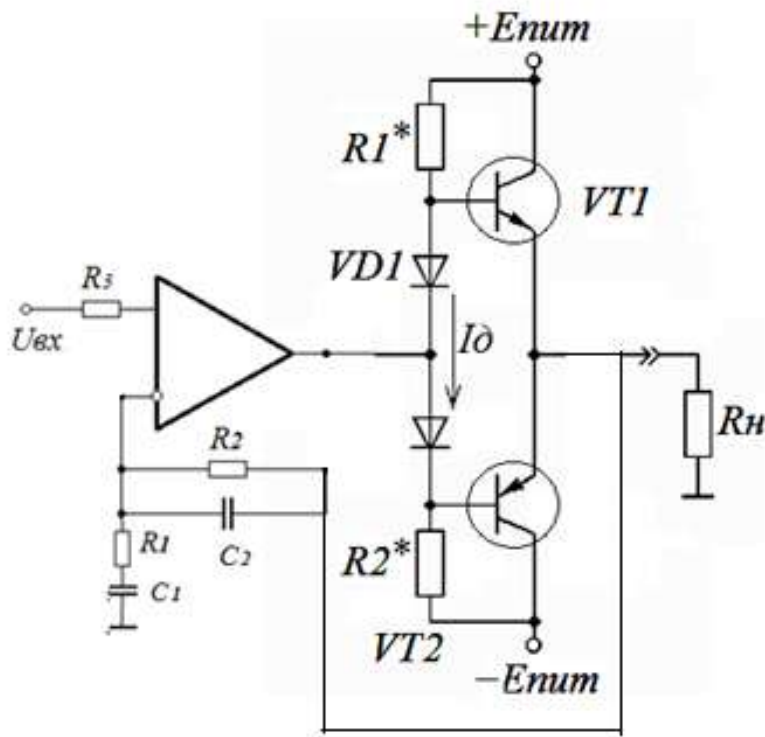


Рисунок 3.6 – Схема включения выходного каскада на транзисторах

В зависимости от задания, **возможны совмещения нескольких функций в одном каскаде**: полосового фильтра с выходным каскадом, **входного** каскада с регулировкой напряжения.

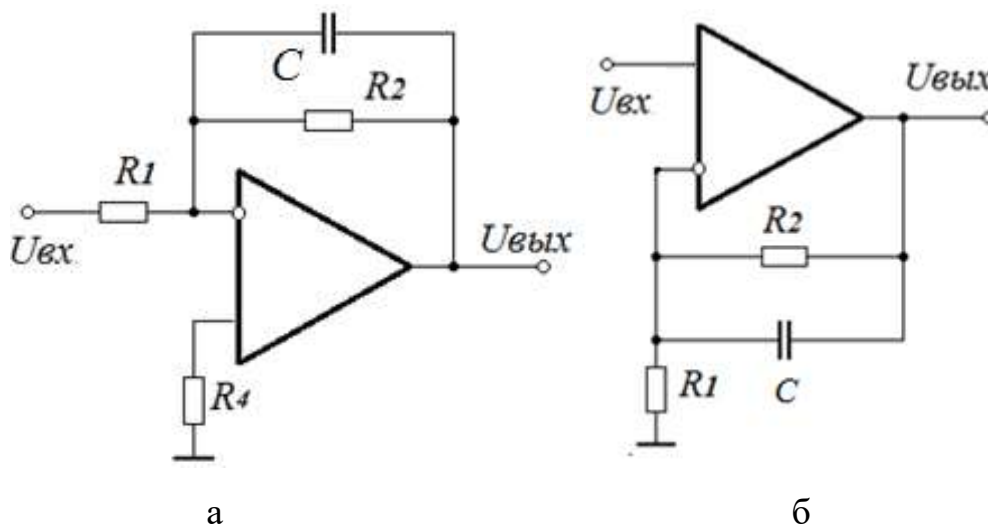
3.6 Активные фильтры

Как было показано выше, с помощью цепей ОС на ОУ можно осуществлять различные операции с входными сигналами и получать устройства с различными функциями.

Фильтры, устройства с частотно-зависимыми ОС, принято разделять на следующие типы: фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые фильтры (ПФ), заграждающие (режекторные) фильтры (РФ), избирательные (селективные) фильтры (СФ).

3.6.1 Активные фильтры нижних частот

Схемы активного ФНЧ первого порядка показаны на рисунке 3.7. В зависимости от схемы, возможно включение фильтра с инверсией или без инверсии входного сигнала. В любом случае, для реализации отрицательной ОС, обратная связь включается между выходом и инвертирующим входом.



а – инвертирующего, б - неинвертирующего

Рисунок 3.7 – Схемы активного ФНЧ первого порядка

Из-за наличия в цепи ОС конденсатора C действие ОС на верхних частотах ослабляется с постоянной времени $\tau = R_2 C$.

Частотная характеристика инвертирующего ФНЧ описывается выражением

$$K(jf) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j2\pi f \tau_s} \quad |K(jf)| = K_{oc} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + j2\pi f \tau_s}}$$

В этом выражении $K_{oc} = -R_2/R_1$ – коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности, $\tau_s = R_2 C$ – постоянная времени цепи ОС.

Для удобства построения частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе. В логарифмических частотных характеристиках (ЛАЧХ) по горизонтальной оси откладываются частоты в

логарифмическом масштабе, по вертикальной оси – коэффициент передачи в децибелах (дБ), $A=20\lg|K(f)|$.

Основные преимущества ЛАЧХ:

- замена операции перемножения АЧХ отдельных каскадов операцией сложения,
- простая аппроксимация частотных зависимостей любого порядка прямыми линиями с наклонами $\pm n \cdot 20\text{дБ}$, где n – порядок передаточной функции устройства, рисунок 3.8.

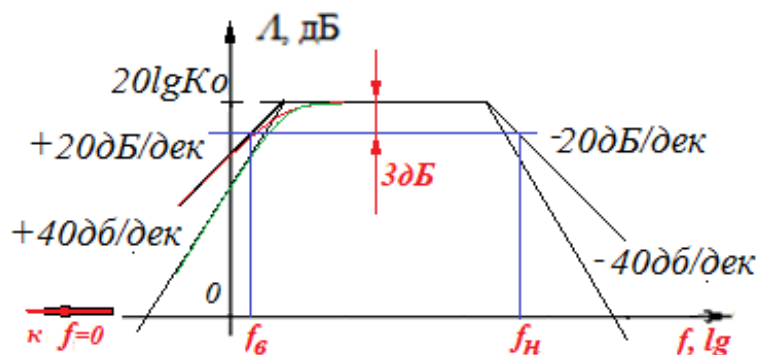


Рисунок 3.8 – ЛАЧХ, аппроксимирующая частотные характеристики первого и второго порядка

Логарифмическая форма АЧХ ФНЧ $A(f)$ показана на рисунке 3.9а, форма фазовой характеристики $\varphi(f) = -\arctg 2\pi f \tau_e$ – на рисунке 3.9б.

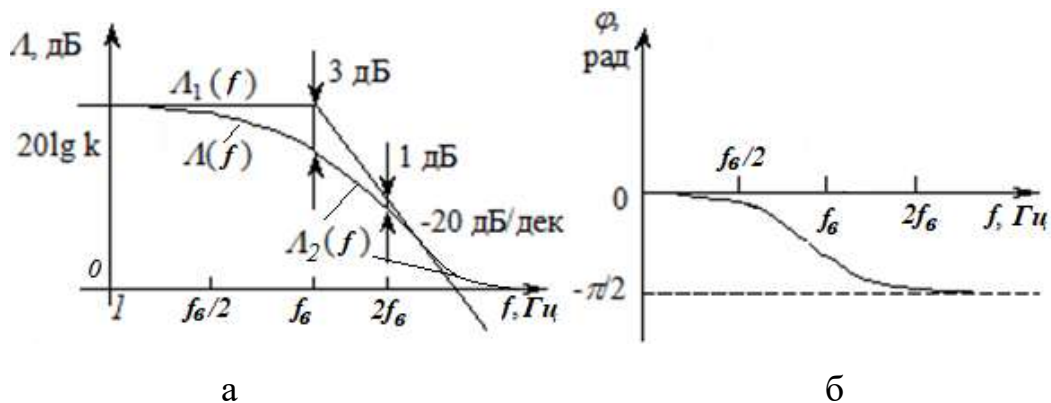


Рисунок 3.9 – Логарифмические АЧХ фильтров нижних частот: а: $A(f)$ – ЛАЧХ, $A_1(f)$ асимптотическая ЛАЧХ, б – фазовая характеристика ФНЧ

Схема **неинвертирующего ФНЧ** первого порядка используется чаще по причине более высокого входного сопротивления и большей развязки между источником сигнала и нагрузкой. Схема неинвертирующего ФНЧ с

коэффициентом усиления $K_{OC} = 1 + R_2/R_1$ показана на рисунке.3.7б, а его ЛАЧХ Λ_2 – на рисунке 3.9а.

Как следует из рассмотренных выражений, **формы ЛАЧХ, постоянные времени цепи ОС и расчетные формулы для инвертирующего и неинвертирующего ФНЧ одинаковы**, различие только в коэффициенте передачи.

Расчет элементов фильтра.

Значение коэффициента усиления определяется для средних частот, на которых влиянием конденсатора в цепи ОС можно пренебречь. Для инвертирующего включения коэффициент усиления

$$K_{ОС\ ИИ} = -R_2/R_1,$$

для неинвертирующего включения – $K_{ОС\ НИ} = 1 + R_2/R_1$.

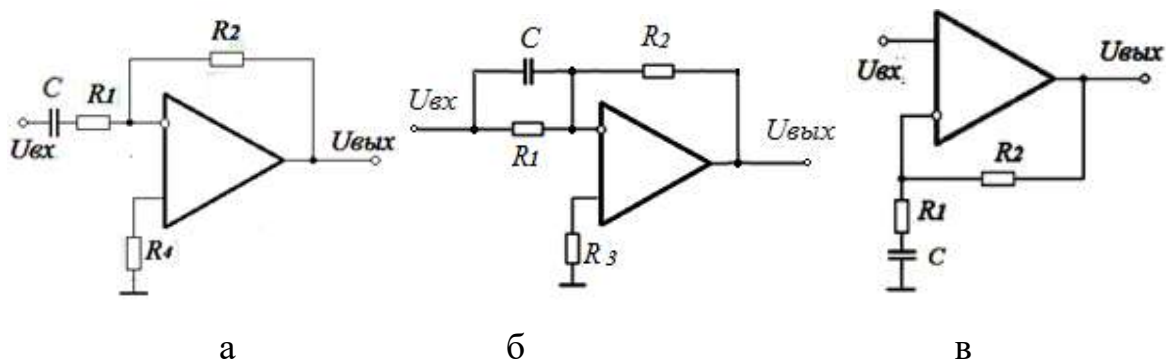
Расчет величины емкости для заданного значения $f_в$ производится после расчета резисторов!

$$C = 1/1/2\pi R_2 f_в$$

3.6.2 Активные фильтры верхних частот

Первая схема активного **ФВЧ первого порядка** с инвертирующим включением ОУ показана на рисунке 10а. Коэффициент передачи этого фильтра высоких частот:

$$K(jf) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{j2\pi f \cdot R_1 C}{1 + j2\pi f \cdot R_1 C}, \quad |K(jf)| = K_{OC} \cdot \frac{2\pi f \cdot \tau}{\sqrt{1 + (2\pi f)^2 \tau^2}}.$$

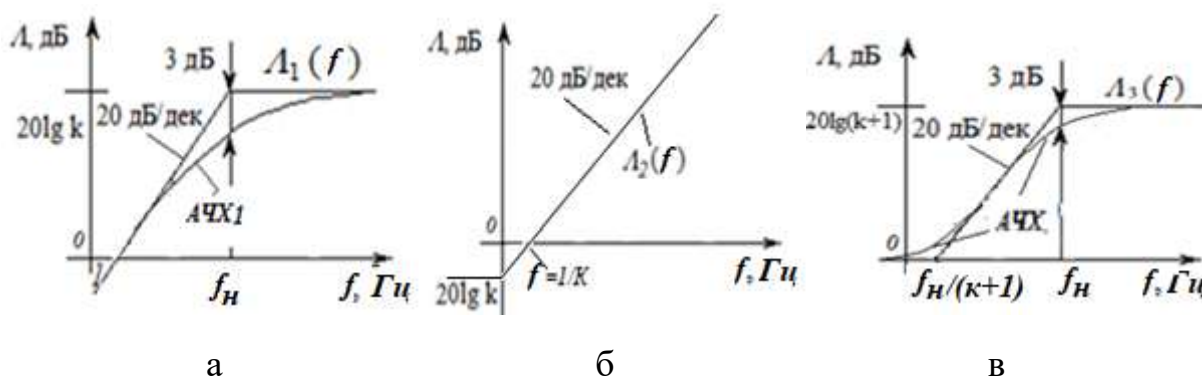


а,б – инвертирующий, в – неинвертирующий
 Рисунок 3.10 – Схемы активного ФВЧ первого порядка

В этом выражении $K_{OC} = -R_2/R_1$ - коэффициент усиления с учетом обратной связи и изменения полярности, $\tau = R_1 C$ – постоянная времени цепи ОС.

Моделью ФВЧ является асимптотическая ЛАЧХ $\Lambda_1(f)$, показанная на рисунке 3.11а, которая строится отрезками прямой линии с частотой сопряжения f_8 :

$$\Lambda_1(f) = \frac{20 \lg |K| \cdot 2\pi f \tau_n}{\sqrt{1 + (2\pi f)^2 \tau_n^2}}, \quad \varphi(\omega) = \arctg 2\pi f \cdot \tau_n.$$



а – по схеме 10а, б – по схеме 10б, в – по схеме 10в
 Рисунок 3.11 – Логарифмические частотные характеристики ФВЧ

Вторая схема активного **ФВЧ первого порядка** с инвертирующим включением ОУ показана на рис. 10б. Коэффициент передачи этого фильтра высоких частот:

$$\Lambda_2(f) = 20 \lg |K| \cdot (1 + 2\pi \cdot f \tau_n),$$

где $k = -R_2/R_1$ – коэффициент передачи фильтра на низких частотах до частоты сопряжения $f_n = 1/2\pi RC$.

На верхних частотах коэффициент передачи возрастает со скоростью 20дб/декаду и при $f \rightarrow \infty$, $k \rightarrow \infty$.

Схема **неинвертирующего ФВЧ первого порядка** имеет более высокое входное сопротивление и большую развязку между источником сигнала и нагрузкой. Схема неинвертирующего ФВЧ показана на рисунке 10в, а его ЛАЧХ – на рисунке 3.11в.

Моделью этого ФВЧ является асимптотическая ЛАЧХ:

$$\Lambda_3(f) = 1 + \frac{20 \lg |K| \cdot 2\pi f \tau_n}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_n)^2}},$$

показанная на рисунке 3.11в, которая строится отрезками прямой линии с частотами сопряжения:

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi(k+1)\tau_n} \quad \text{и} \quad f_{c2} = f_n = \frac{1}{2\pi\tau_n}.$$

По известным значениям RC элементов легко построить асимптотическую ЛАЧХ любого фильтра и определить коэффициент передачи и его верхнюю частоту.

Расчет элементов ФВЧ.

Значение коэффициента усиления определяется для средних частот, на которых влиянием конденсатора в цепи ОС можно пренебречь. Для инвертирующего включения, рисунок 3.4а, коэффициент усиления

$$K_{ОС\text{ ИИ}} = -R_2/R_1,$$

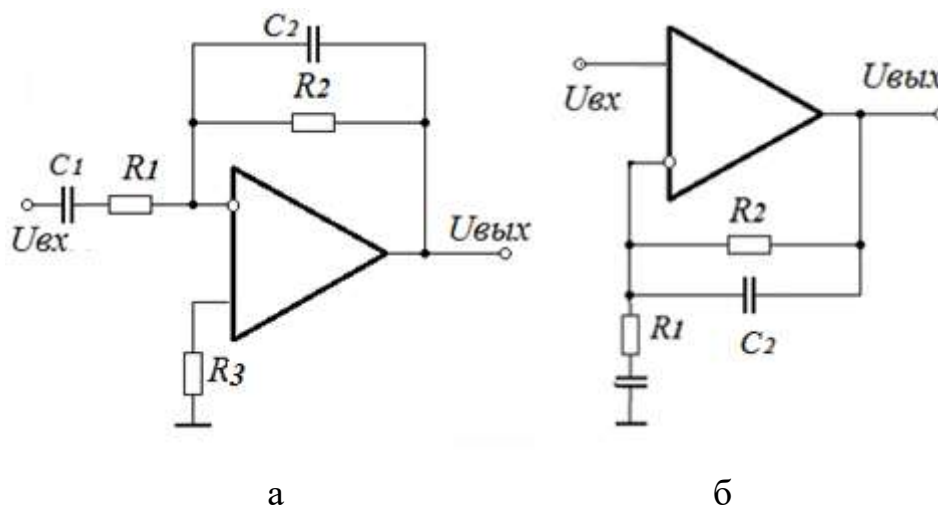
для неинвертирующего включения – $K_{ОС\text{ НЕ}} = 1 + R_2/R_1$.

Расчет величины емкости, обеспечивающей заданное значения f_n производится после расчета резисторов!

$$C = 1/1/2\pi R_1 f_n$$

3.6.3 Активные полосовые и режекторные фильтры

Полосовые фильтры, схемы которых показаны на рисунке 3.12 получают при объединении цепей ОС фильтров низких и высоких частот.



а – инвертирующего, б - неинвертирующего

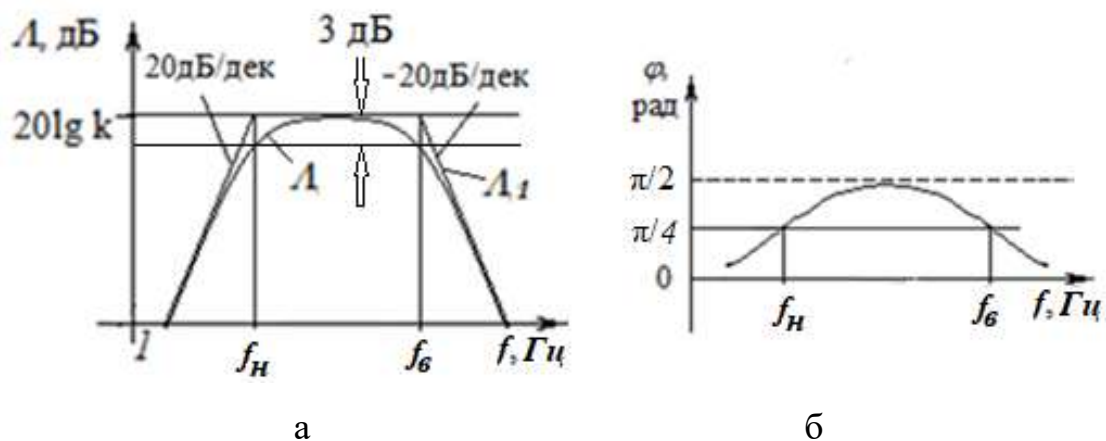
Рисунок 3.12 – Схемы полосовых фильтров первого порядка

Для исключения взаимного влияния параллельной и последовательной цепей ОС, что позволит применить принцип перемножения характеристик ФВЧ и ФНЧ, необходимо, чтобы постоянные времени для верхних и нижних частот существенно отличались. В этом случае расчет цепочек R_1C_1 и R_2C_2 можно проводить независимо по значениям верхней и нижней частоты:

$$R_1C_1 = \tau_n = 1/2\pi f_n, \quad R_2C_2 = \tau_v = 1/2\pi f_v.$$

Значение коэффициента усиления определяется для средних частот, на которых влиянием конденсаторов цепи ОС можно пренебречь и зависит от схемы включения ОУ. Для инвертирующего включения $K_{ОС\text{ин}} = -R_2/R_1$, для неинвертирующего – $K_{ОС\text{не}} = 1 + R_2/R_1$.

Логарифмическая форма АЧХ полосового фильтра $L(f)$ показана на рисунке 3.13а, форма фазовой характеристики – на рисунке 3.13б, на этом же рисунке изображены асимптотические ЛАЧХ с частотами сопряжения $f_n = 1/2\pi\tau_n$ и $f_v = 1/2\pi\tau_v$.



а – ЛАЧХ, б – ФЧХ

Рисунок 3.13 – Форма частотных характеристик полосового фильтра

Режекторные фильтры строятся на основе **параллельного соединения** ФНЧ и ФВЧ в неинвертирующем или инвертирующем включении. Отличие в частотной характеристике режекторного фильтра в том, что **действие ФНЧ проявляется на нижних частотах, а ФВЧ – на верхних частотах**, что обеспечивается соответствующим выбором постоянных времени фильтров. В результате получим частотные характеристики режекторного фильтра, приведенные на рисунке 3.14.

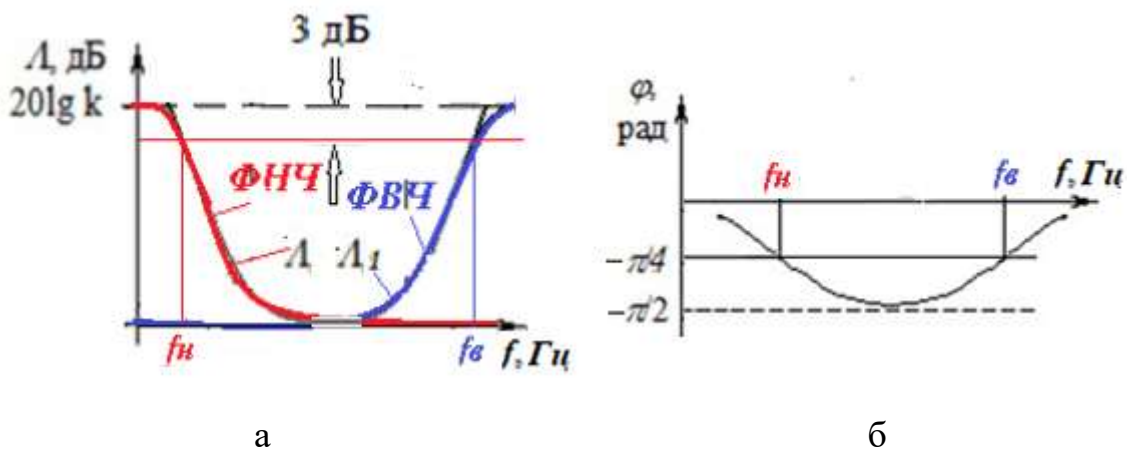


Рисунок 3.14 – Форма частотных характеристик режекторного фильтра: а – ЛАЧХ, б – ФЧХ

Коэффициенты передачи ФВЧ и ФНЧ и схемы включения ОУ (инвертирующие или нет) выбираются одинаковыми. Расчет цепочек R1C1 и R2C2 можно проводить независимо по значениям верхней и нижней частоты,

для ФНЧ, рисунок 3.7: $R_2C_2=\tau_n= 1/2\pi f_n$, для ФВЧ, рисунок 3.10а,в: $R_1C_1=\tau_b=1/2\pi f_b$.

3.6.4 Активные фильтры второго порядка

Фильтры первого порядка имеют малую крутизну спада ЛАЧХ. Для увеличения крутизны спада можно использовать последовательного включения нескольких активных фильтров первого порядка или изменение цепей ОС, работа которых описывается уравнениями второго порядка.

Применение цепей обратной связи выше второго порядка в одном ОУ невозможно из-за требований по устойчивости!

Схема ФНЧ второго порядка и ее ЛАЧХ показаны на рисунке 3.15а.

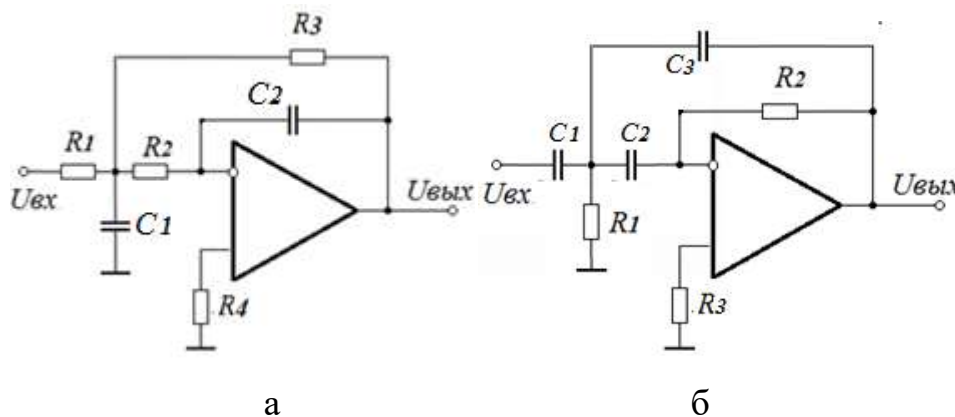


Рисунок 3.15 – Схемы: а – ФНЧ второго порядка, б - ФВЧ второго порядка

Получение ЛАЧХ второго порядка достигается применением двух апериодических цепей, входного делителя с постоянной времени $\tau_1=R_1C_1$ и цепи ООС $\tau_2=R_2C_2$. При равенстве постоянных времени получаем одну частоту сопряжения $f_с$, после которой происходит спад ЛАЧХ со скоростью 40 дБ на декаду. Частотные характеристики ФНЧ второго порядка показаны на рисунке 3.16.

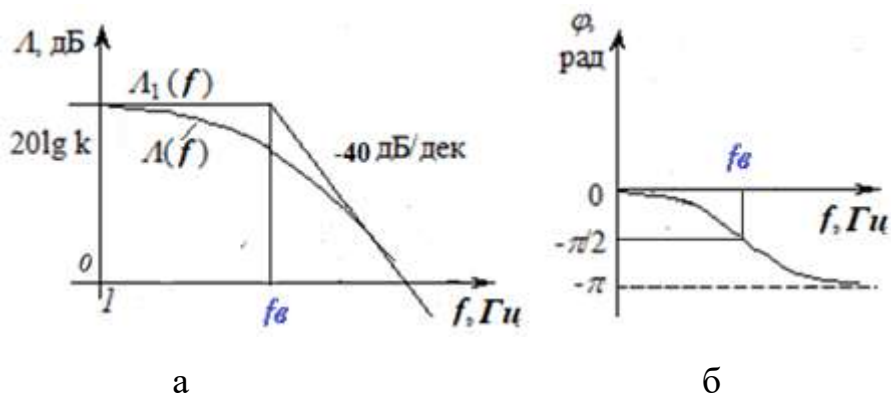


Рисунок 3.16 – Частотные характеристики ФНЧ второго порядка

Максимальный фазовый сдвиг ФНЧ второго порядка на верхних частотах увеличивается до 180° .

Значение коэффициента усиления определяется для средних частот, на которых влиянием конденсаторов цепи ОС можно пренебречь и зависит от схемы включения ОУ. Для инвертирующего включения ОУ $K_{ОС\text{ ин}} = -R_3/R_1$.

При условии $R_1=R_2$, частота сопряжения для ФНЧ определяется по выражению: $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau_1\tau_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_3C_1C_2}}$

Схема ФВЧ второго порядка показана на рисунке 3.15б. Как следует из рисунка, при переходе от схемы ФНЧ произошла замена элементов цепи обратной связи, сопротивлений – на конденсаторы, конденсаторов – на сопротивления. Частотные характеристики ФВЧ второго порядка показаны на рисунке 3.17.

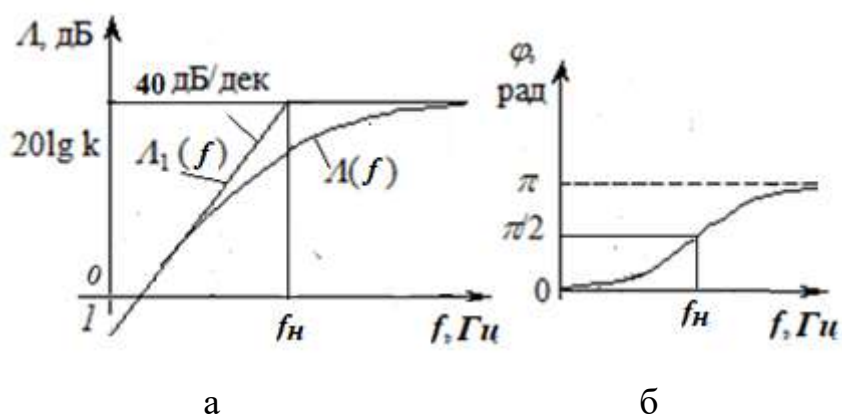


Рисунок 3.17 – Частотные характеристики ФВЧ второго порядка

При условии $C_1=C_2$ и равенстве $\tau_1=\tau_2$, где $\tau_1=R_1C_1$, $\tau_2=R_2C_2$ для ФВЧ частота сопряжения определяется по выражению:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau_1\tau_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_1C_1C_2}}.$$

3.6.5 Селективные фильтры

Назначение селективных фильтров – выделение сигналов в более узкой полосе рабочих частот, чем в полосовых фильтрах. В рассмотренных ранее полосовых фильтрах элементы ФВЧ и ФНЧ действовали независимо на своих частотах, и их действие рассматривалось по отдельности. При сближении f_n и f_b элементы фильтров начинают влиять друг на друга, что необходимо учитывать при расчетах.

Схема селективного фильтра приведена на рисунке 3.18а, его ЛАЧХ – на рисунке 3.18б.

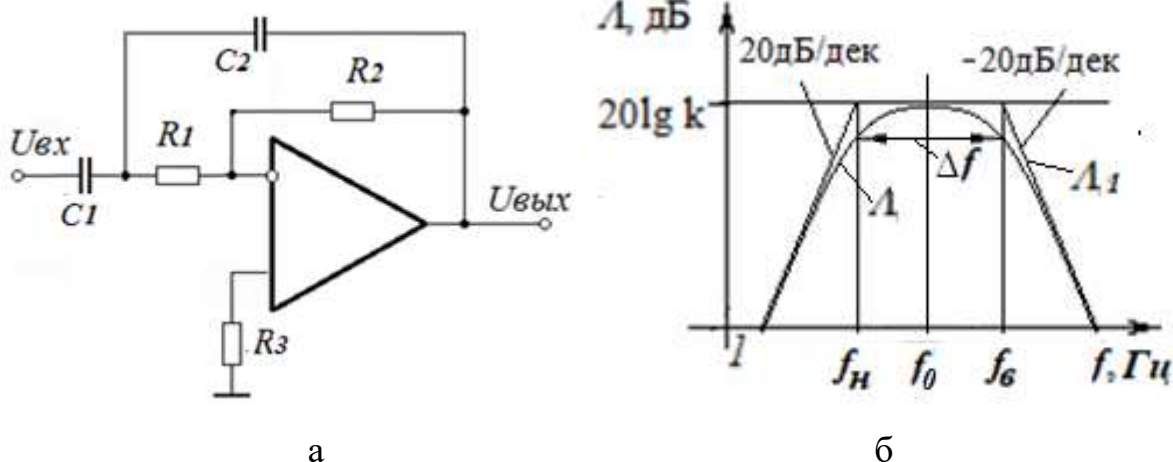


Рисунок 3.18 – Узкополосный фильтр: а – схема узкополосного фильтра, б – его ЛАЧХ

Анализ работы схемы показывает, что цепи ОС взаимодействуют входная дифференцирующая цепь с постоянной времени $\tau_1=R_1C_1$ (аналог ФВЧ) и цепь отрицательной ОС с $\tau_2=R_2C_2$ (аналог ФНЧ).

Этот полосовой фильтр имеет АЧХ с максимумом на определенной, квазирезонансной, частоте, определяемой постоянными времени τ_1 и τ_2 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau_1\tau_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1R_2C_2}}.$$

Максимальный коэффициент усиления на частоте квазирезонанса оказывается равным:

$$K_0 = -\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{R_2C_2}{R_1C_1}.$$

Относительная полоса пропускания на уровне -3 дБ:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_s - f_n}{f_0} = \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} = \sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}}.$$

Обратите внимание, в отличие от полосовых фильтров, в формуле для коэффициента усиления используются не резисторы, а постоянные времени для верхних и нижних частот.

Селективные фильтры с высокой добротностью строятся на основе моста Вина, схема которого приведена на рисунке 3.19.

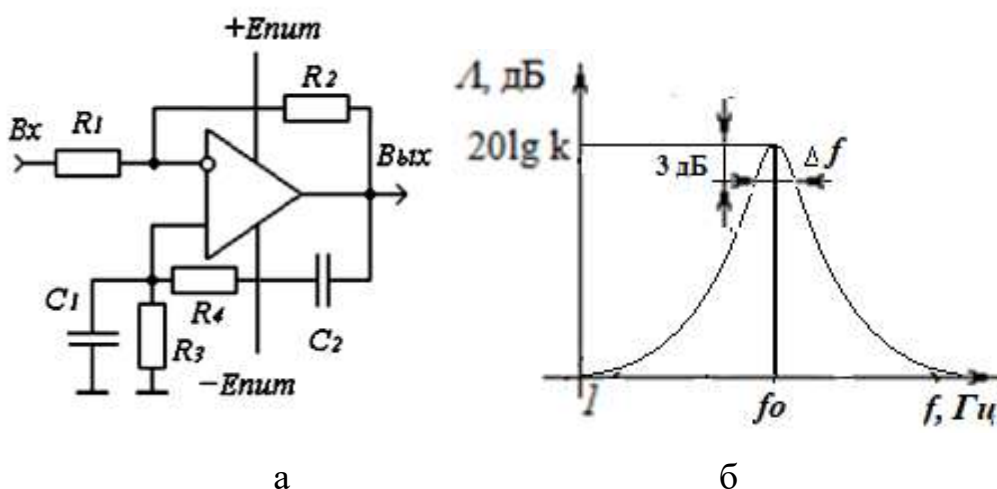


Рисунок 3.19 – Мост Вина: а – схема, б – ЛАЧХ

Особенностью рассматриваемого резонансного фильтра на мосте Вина является использование одновременно положительной и отрицательной обратных связей. Основная идея, заложенная в схему, заключается в компенсации на частоте резонанса действия отрицательной ОС действием положительной ОС (ПОС). При полной компенсации ОС в устройстве отсутствует и коэффициент усиления должен равняться коэффициенту усиления ОУ без ОС на частоте резонанса в соответствии с диаграммой Боде

на частоте резонанса. При увеличении глубины ПОС коэффициент усиления $0 \rightarrow \infty$, этом добротность резонансного усилителя $Q \rightarrow \infty$ и усилитель превращается в генератор.

Из практических соображений (сохранения добротности при изменении внешних условий) коэффициент усиления обычно ограничивается величиной 60-70 дБ, а добротность – величиной 100-200.

Основные расчетные соотношения. Цепь отрицательной частотно-независимой ОС образуется резистивным делителем $R_1 - R_2$, цепь положительной ОС – частотно-зависимая, по структуре сходная с рассмотренным выше полосовым фильтром. На нижней частоте глубина ПОС определяется цепью $R_4 C_2$, на верхней частоте – $R_3 C_1$. Максимальная глубина ПОС и, соответственно, максимальный коэффициент усиления (резонанс) возникает при равенстве постоянных времени $R_3 C_1 = R_4 C_2$.

При выборе одинаковых резисторов, $R_3 = R_4 = R$ и одинаковых конденсаторах, $C_1 = C_2 = C$ частота резонанса

$$f_0 = 1/2\pi RC.$$

Коэффициент передачи положительной ОС на частоте резонанса при $R_3 = R_4$ и равенстве реактивных сопротивлений C_1 и C_2 ,

$$\beta_{noc} = 1/3,$$

глубина частотно-независимой отрицательной ОС

$$\beta_{оос} = R_1 / (R_1 + R_2).$$

Из условия равенства глубины обратных связей на частоте резонанса, $\beta_{noc} = \beta_{оос}$ получаем выражение для расчета граничных значений резисторов ООС, соответствующих границе устойчивости устройства:

$$(R_1 + R_2) / R_1 \leq 3.$$

Для получения формы АЧХ с заданной добротностью $Q = \omega_0 / \Delta\omega$ необходимо уменьшать потери, вносимые резисторами R_3 и R_4 в цепь ПОС, выполнив соотношения между активными и реактивными составляющими на частоте резонанса

$$R \geq Q / \omega_0 C.$$

Кроме того, на добротность влияет входное сопротивление самих ОУ. Соответственно, необходимо применять ОУ с высоким входным сопротивлением, чтобы выполнялось условие:

$$R_{вх\ оу} \gg R.$$

Добротность резонансного усилителя определяется соотношениями между глубиной ПОС и ООС. При условии равенства резисторов ПОС, $R_3=R_4$ добротность определяется величиной резистора R_2 :

$$Q = \frac{R_1}{2R_1 - R_2}.$$

При $R_2 > 2R_1$ не выполняется условие устойчивости, и схема превращается в автогенератор на мосте Вина.

Максимальный коэффициент усиления (при резонансе) при указанных ограничениях и частоте единичного усиления ОУ $f_l \rightarrow \infty$, $K_{рез} \approx 3Q$.

На частотах $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$, глубина ПОС $\rightarrow 0$ из-за наличия конденсаторов в параллельной или последовательной цепях коэффициент усиления определяется глубиной ООС

$$K_0 = K_\infty = -R_2/R_1.$$

3.7 Интегрирующее устройство

Интегрирующие устройства применяются в различных устройствах обработки и преобразования сигналов, в радиоавтоматике. В устройстве производится интегрирование входного сигнала, сигнал на выходе является интегралом входного сигнала. Простая схема интегратора получается при включении в цепь ОС конденсатора, рисунок 3.20.

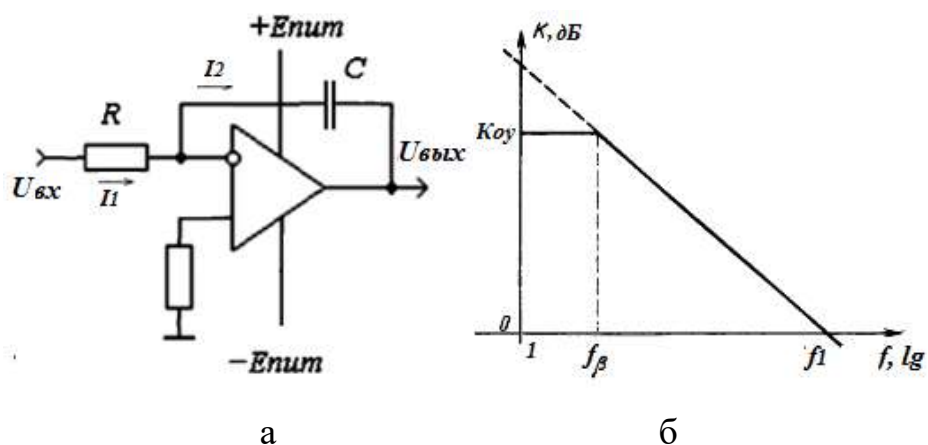


Рисунок 3.20 – Интегратор: а – схема, б – логарифмическая АЧХ

Из равенства токов I_1 и I_2 следует, что $U_{вх}/R = -C \cdot dU_{вых}/dt$, или

$$U_{вых}(t) = -\frac{1}{RC} \int U_{вх}(t) dt.$$

В результате интегрирования входного сигнала, вычисляется площадь подинтегральной функции.

Подставив $Z_{oc} = 1/j\omega C$ вместо R_{oc} в выражение для коэффициента передачи инвертирующего усилителя, получим коэффициент передачи интегратора:

$$K_u(jf) = 1/j2\pi RC, |K_u(f)| = 1/2\pi RC.$$

Нормированная логарифмическая АЧХ интегратора показана на рисунке 20б. По форме она совпадает с диаграммой Бode для ОУ, но с другой постоянной времени, $\tau_{инт} = RC$ вместо $\tau_{оу} = 1/2\pi f_1$, где f_1 – частота единичного усиления ОУ.

Фазовый сдвиг интегратора от частоты не зависит и равен минус 90° .

3.8. Дифференцирующее устройство

Поменяв местами резистор R и конденсатор C , получим дифференцирующее устройство (не путать с дифференциальным усилителем!).

Схема устройства показана на рисунке 3.21а.

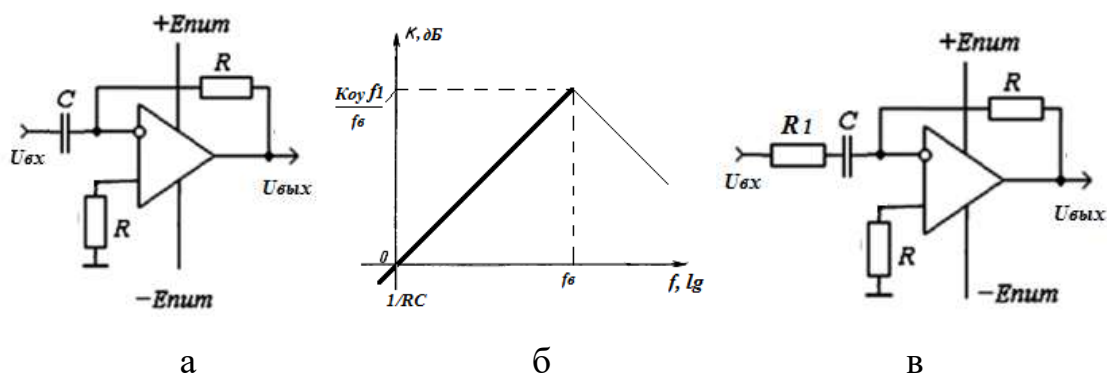


Рисунок 3.21 – Дифференцирующее устройство, а – схема, б – логарифмическая АЧХ, в – схема с высоким входным сопротивлением

В соответствии с первым законом Кирхгофа связь между входным и выходным сигналами:

$$C \frac{dU_{вх}}{dt} + \frac{U_{вых}}{R} = 0,$$

откуда

$$U_{вых} = -RC \frac{dU_{вх}}{dt}.$$

Коэффициент передачи дифференцирующего устройства

$$K(jf) = -j2\pi fRC.$$

Модуль коэффициента передачи, $|K(jf)| = 2\pi fRC$, прямо пропорционален частоте, рисунок 3.21б.

Свойство дифференцирования устройства ограничено частотой $fв$, с которой, в соответствии с диаграммой Боде, уменьшается коэффициент усиления ОУ.

Рассмотренная схема практически не используется по причине малого входного сопротивления на верхних частотах и большой величины входной емкости, ограничивающей устойчивость устройства. Для ликвидации отмеченных недостатков в схему вводится дополнительный резистор R_1 , показанный на рисунке 3.21в. Введение небольшого резистора снижает максимальный коэффициент усиления на верхних частотах и соответственно $fв$, но практически не влияет на свойство дифференцирования.

3.9 Гираторы

Гиратором называют электрическую цепь, которая осуществляет преобразование импеданса. Наиболее часто используется преобразование ёмкостных цепей в индуктивные, путем изменения знака комплексного сопротивления цепи.

3.9.1 Электронные эквиваленты индуктивности

На основе ОУ разработаны электронные аналоги индуктивности большой величины, в основном применяемые в интегральных микросхемах.

Аналогом индуктивности можно считать устройство, напряжение на котором изменяется пропорционально частоте сигнала. Такое устройство может применяться вместо катушки индуктивности, с учетом того, что электронный аналог не накапливает энергию.

Простая схема электронного аналога индуктивности приведена на рисунке 3.22а.

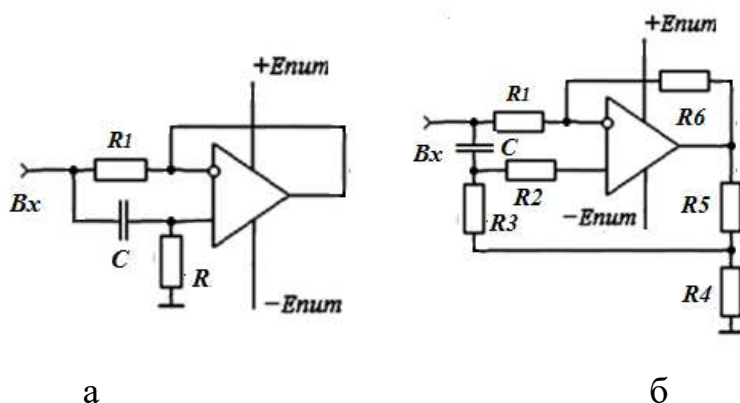


Рисунок 3.22 – Схемы электронного аналога индуктивности, а – простая, б – с высокой добротностью

С увеличением частоты сигнала емкостное сопротивление конденсатора C_1 уменьшается и напряжение на резисторе R возрастет, в результате возрастает напряжение на выходе ОУ. Увеличенное напряжение с выхода через резистор ОС R_1 поступает на конденсатор C , что приводит к

дальнейшему росту напряжения на резисторе R . Чем выше частота, тем большее напряжение на входе устройства.

Входной импеданс электронного аналога индуктивности описывается последовательным соединением индуктивности L и сопротивления R_1

$$Z_L = R_1 + j2\pi fL,$$

величина эквивалентной индуктивности $L = R_1 RC$.

Недостатком схемы является низкая добротность, ограниченная влиянием резистора R_1 . Добротность эквивалента индуктивности определяется выражением

$$Q = 0,5 \sqrt{\frac{R_1}{R}}.$$

Получить очень высокую добротность (вплоть до отрицательной) и превратить устройство в автогенератор позволяет подключение цепи положительной ОС. Схема электронного эквивалента индуктивности с компенсированными потерями и высокой добротностью приведена на рисунке 3.22б.

Обратите внимание, что аналог индуктивности подключен между входом устройства и общим проводом.

При необходимости получить аналог катушки индуктивности, у которого ни один из выводов не соединен с общим проводом, можно использовать две схемы, включенные навстречу друг другу. При этом важно обеспечить идентичность параметров ОУ и номиналов используемых конденсаторов и резисторов.

Электронный аналог индуктивности используется в датчиках, преобразующих частоту сигнала в напряжение. Для линейного преобразования частоты в напряжение необходимо обеспечение достаточно большого коэффициента усиления ОУ на верхней частоте, что ограничивает частотный диапазон гиратора.

3.9.2 Электронные эквиваленты конденсаторов

Для обработки сигналов на сверхнизких частотах, используемых, например, в исследованиях биологических объектов, в медицине, требуются фильтры с большими постоянными времени, на основе конденсаторов большой емкости. Электронный аналог конденсаторов большой емкости малых размеров может быть реализован на ОУ на основе эффекта Миллера.

Подключением конденсатора небольшой емкости в цепь ООС усилителя, как показано на рисунке 3.23а, можно изменить входную (эквивалентную) емкость конденсатора

$$C_{\text{экв}} = C(1+K),$$

где K – модуль коэффициента передачи в полосе рабочих частот устройства.

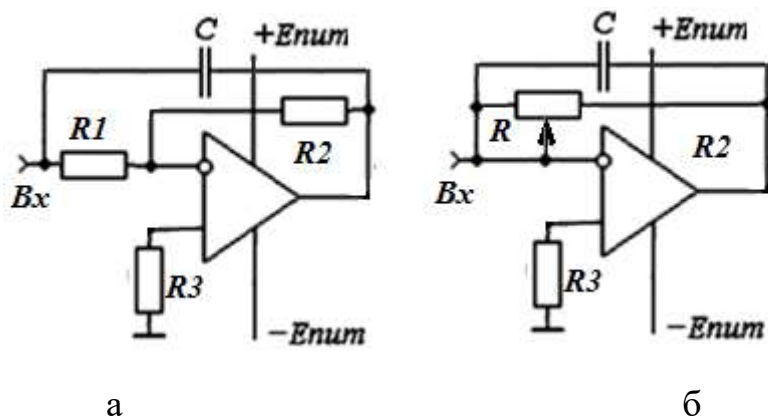


Рисунок 3.23 – Схемы электронного аналога конденсатора, а – постоянного, б – переменного

Большое входное сопротивление ОУ сводит к минимуму токи утечки и минимизирует потери электронного конденсатора. Величина конденсатора зависит от коэффициента усиления усилителя с ОС, определяемого резисторами ОС,

$$C_{\text{экв}} = C \cdot (1 + R_2/R_1).$$

При введении переменного резистора R в цепь ОС, как показано на рисунке 3.23б, коэффициентом усиления ОУ можно управлять, в результате получаем **переменный конденсатор большой емкости.**

Обратите внимание, что схема эквивалента конденсатора совпадает со схемой ФНЧ. Отличие в том, что эквивалент конденсатора - двухполюсник подключен между входом устройства и общим проводом.

При использовании электронного аналога конденсатора необходимо учитывать, что запас энергии определяется емкостью конденсатора C . **Электронный аналог нельзя использовать в качестве источника энергии или фильтра в источниках питания**, его основное назначение – использование в малосигнальном режиме, в устройствах предварительной обработки сигнала. Изменение емкости электронного конденсатора происходит за счет потребления энергии источника питания.

3.10 Трансимпедансные усилители

Часто источник сигнала имеет большое выходное сопротивление, значительно превышающее сопротивление нагрузки, т.е. является источником тока. Типичный пример – фотодиод, используемый в системах радиоавтоматики для освещения, ток которого необходимо преобразовать в напряжение управлением устройством коммутации.

При любом конечном входном сопротивлении усилителя образуется делитель входного напряжения, уменьшающий коэффициент передачи устройства и уменьшающий ток от источника. Для получения максимального тока от датчика можно применить схему усилителя тока, показанную на рисунке 3.24.

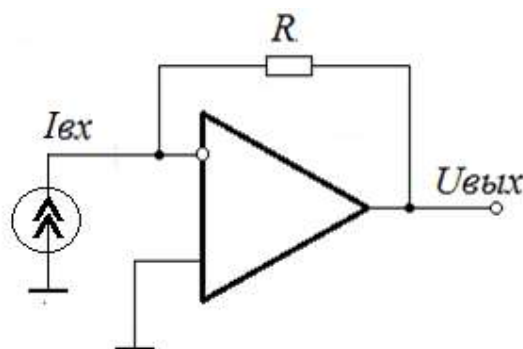


Рисунок 3.24 – Схема преобразователя тока в напряжение

В этой схеме весь ток источника проходит через резистор ОС R , и образует выходной сигнал $U_{вых} = -I_{вх}R$.

Учитывая, что при выполнении условия $R_{уст} \rightarrow \infty$ величина резистора ОС может быть значительной, единицы-десятки МОм, **схема имеет большой коэффициент усиления по току**. Благодаря низкому выходному сопротивлению ОУ с отрицательной ОС по напряжению, входной ток преобразуется в выходное напряжение с коэффициентом передачи

$$K_{тр} = U_{вых}/I_{вх} = R.$$

Подобные схемы с преобразованием входного сопротивления называются **транsimpедансными усилителями**.

Малое входное сопротивление ОУ с глубокой ОС позволяет существенно уменьшить постоянную времени входной цепи и применить достаточно длинные провода между датчиком и устройством.

3.11 Сумматоры сигналов

При работе от нескольких источников возникают задачи создания устройства суммирования или вычитания сигналов на нагрузке.

Схема сумматора сигналов приведена на рисунке 3.25а.

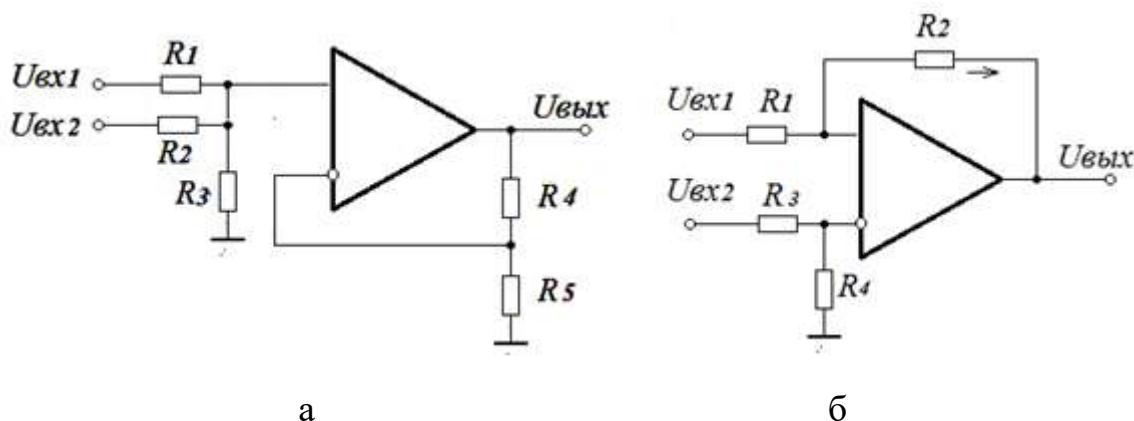


Рисунок 3.25 – Схемы: а – сумматора сигналов, б – дифференциального усилителя

При $R_1 = R_2$ и равенстве коэффициентов передачи и входного делителя напряжения $K_{ОС} = R_4/R_5 = R_3/(R_1 + R_3) = R_3/(R_2 + R_3)$, получаем выражение для

выходного напряжения сумматора:

$$U_{вых} = U_{вх1} + U_{вх2}.$$

Изменяя коэффициенты усиления усилителя с ОС $K_{ос} = 1 + R_4/R_5$ и коэффициенты передачи входных делителей $K_1 = R_3/(R_1 + R_3)$ и $K_2 = R_3/(R_2 + R_3)$, можно в соответствии с уровнями входных сигналов изменять масштабные коэффициенты в соответствии с выражением:

$$U_{вых} = (K_1 U_{вх1} + K_2 U_{вх2}) K_{ос}.$$

На рисунке 3.25б показана схема **дифференциального усилителя**, являющаяся комбинацией инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ.

Используя принцип суперпозиции сигналов в линейном устройстве, можно определить выходной сигнал:

$$U_{ВЫХ} = U_1 K_{ИНВ} + U_2 K_{НЕИНВ} \cdot R_4 / (R_3 + R_4).$$

При условии равенства резисторов, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, получим

$$U_{ВЫХ} = U_2 - U_1.$$

На основании полученного выражения, схему дифференциального каскада рассматривать как **схему вычитания сигналов**, поступающих на входы.

На основе схемы вычитания и схемы сумматора работает схема сложения-вычитания, приведенная на рисунке 3.26.

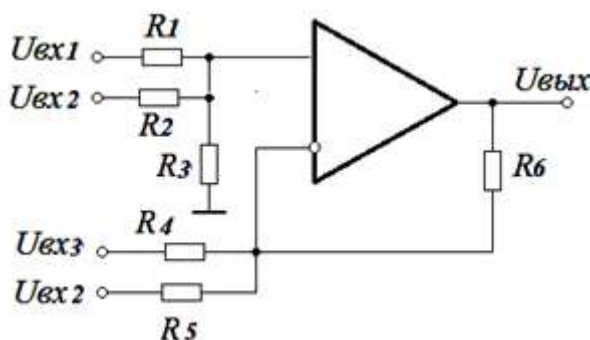


Рисунок 3.26 – Схема сложения-вычитания сигналов

На основании принципа суперпозиции можно записать выражение для определения выходного напряжения:

$$U_{вых} = U_{вх1} R_3 / (R_1 + R_3) + U_{вх2} R_3 / (R_2 + R_3) - U_{вх3} R_6 / R_4 - U_{вх4} R_6 / R_5.$$

Изменяя соотношения между, можно, в соответствии с уровнями входных сигналов, изменять масштабные коэффициенты передачи от каждого источника сигнала.

3.12 Компараторы

Большой коэффициент усиления ОУ без обратной связи позволяет с большой точностью сравнивать уровни напряжений на входах и создавать **устройства сравнения уровней аналоговых сигналов – компараторы**. Компараторы широко используются в радиоавтоматике для сравнения уровня опорного напряжения с напряжением, снимаемым с датчика.

Напоминание. ОУ управляется разницей напряжений на прямом и инверсном входах (противофазными сигналами). Подача синфазного напряжения, одинакового по амплитуде относительно «земли», не приводит к изменению выходного напряжения, т. к. ОУ имеет значительный коэффициент ослабления синфазного сигнала.

Компаратор работает как усилитель в режиме ограничения, на выходе компаратора формируются два возможных напряжения разной полярности, близкие к значениям напряжений питания, либо положительного, либо отрицательного.

Рассмотрим работу ОУ, схема которого изображена на рисунке 3.27а.

Переключение полярности выходного сигнала происходит в момент равенства входных напряжений, независимо от их уровня. Полярность выходного напряжения определяется тем, к какому входу устройства подается напряжение большей амплитуды.

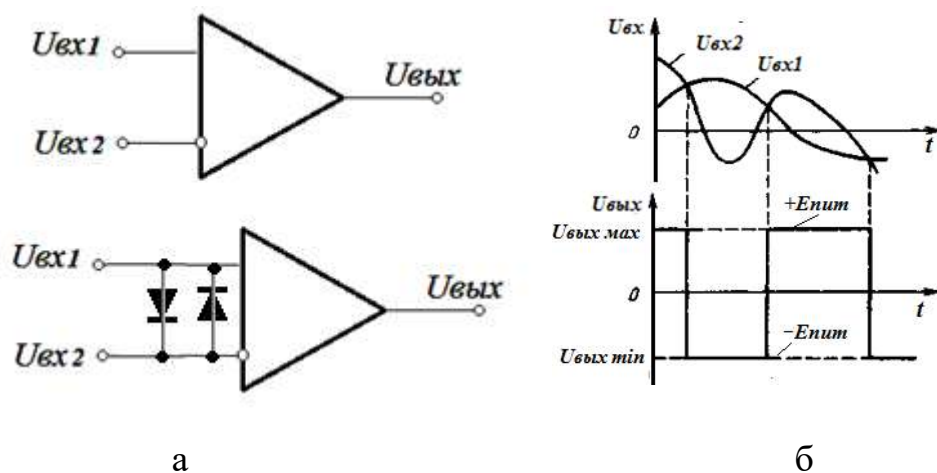


Рисунок 3.27 – Схема ОУ и диаграммы работы

При подаче напряжения большей амплитуды на неинвертирующий вход – полярность на выходе положительная, при подаче на большего напряжения на инвертирующий вход – полярность отрицательная. В результате на выходе компаратора получается выходное напряжение прямоугольной формы, полярность которого является информацией, на каком входе напряжение выше по амплитуде.

Для защиты ОУ от большого дифференциального входного напряжения, которое может превышать предельно допустимое, между входами включаются встречно-параллельно шунтирующие диоды, рисунок 3.27а. Диоды работают на прямой ветви ВАХ и ограничивают максимальное дифференциальное напряжение на уровне 0,7В.

В различных устройствах автоматики широко используются **специализированные микросхемы ОУ - компараторы**, отличающиеся наличием защиты и большим коэффициентом усиления, до 140 дБ.

Из-за большой чувствительности компаратора в момент равенства входных напряжений возможны многократные срабатывания, которые нарушают работу исполнительных устройств. Для ликвидации этого эффекта в ОУ вводится положительная обратная связь. Схема такого компаратора, называемого **триггером Шмидта**, показана на рисунке 3.28а.

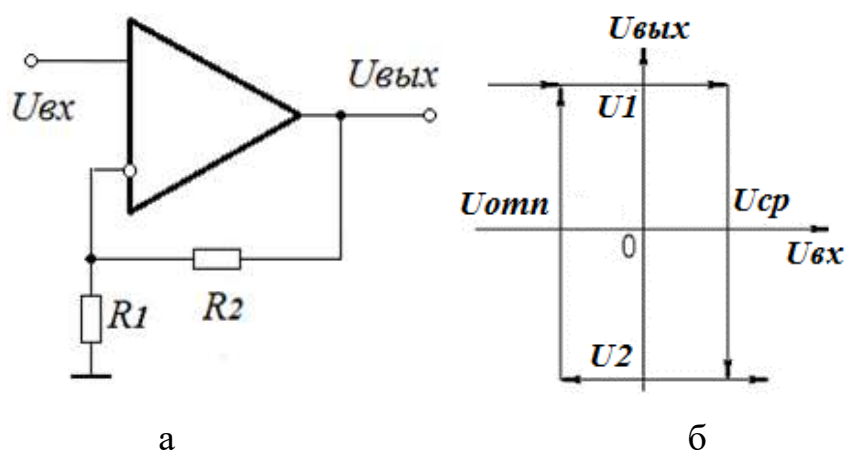


Рисунок 3.28 – Триггер Шмидта: а – схема, б – диаграмма работы

В качестве опорного напряжения, подаваемого на положительный вход ОУ, используется часть выходного напряжения, определяемого делителем R_2, R_1 . Переключение схемы происходит в моменты равенства входного и опорного напряжения. Диаграммы работы триггера Шмидта показаны на рисунке 3.28б. При напряжении на инверсном входе меньше напряжения отпирания $U_{ср}$ на выходе триггера положительное напряжение с уровнем U_1 , часть которого ($U_{ср}$) является опорным напряжением. При $U_{вх} > U_{ср}$, благодаря положительной ОС, происходит **лавинообразное переключение триггера**. Полярность выходного напряжения U_2 меняется на отрицательную, часть которого с величиной напряжения отпускания $U_{отп}$ становится опорной.

Переключение схемы произойдет после снижения входного сигнала до уровня $U_{вх} < U_{отп}$. Таким образом, на интервале входного напряжения между $U_{ср} \div U_{отп}$ схема нечувствительна к изменениям входного напряжения. Этот интервал называется зоной гистерезиса (диапазон напряжений, в которых компаратор нечувствителен к изменениям входных напряжений).

Значения пороговых напряжений и зона гистерезиса определяются напряжениями питания и величинами резисторов ОС: $U_{ср} = U_1 R_1 / (R_1 + R_2)$, $U_{отп} = U_2 R_1 / (R_1 + R_2)$, $U_{гис} = U_{ср} - U_{отп} = R_1 (U_2 - U_1) / (R_1 + R_2)$.

Триггер Шмидта отличается высоким быстродействием благодаря

лавиному процессу переключения триггера, время переключения из одного состояния в другое минимально. Триггеры Шмидта выпускаются в виде специализированных микросхем и находят широкое применение.

3.13. Источники опорного напряжения на ОУ

Высокостабильные источники напряжения широко используются в измерительной технике, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях, радиоавтоматике и многих других устройствах. Применение ОУ позволяет существенно повысить стабильность опорного напряжения и снизить выходное сопротивление устройства. Простейший метод получения стабильного выходного напряжения состоит в использовании компараторов, сравнивающих выходное напряжение устройства с опорным напряжением. Схема источника стабильного опорного напряжения показана на рисунке 3.29.

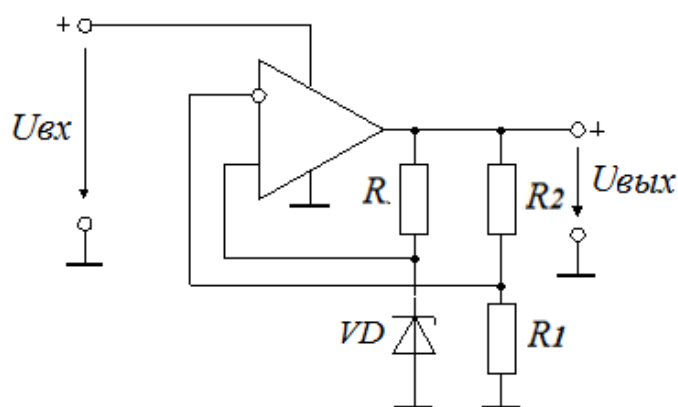


Рисунок 3.29 – Схема источника стабильного опорного напряжения

Выходное напряжение в схеме соответствует выражению:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{он}}(1 + R_2/R_1).$$

В данной схеме величина опорного напряжения $U_{\text{он}}$ задается стабилитроном VD .

Значительно, на порядок, повысить стабильность опорного напряжения можно при использовании вместо резистора R источников тока на БТ или ПТ.

Схема широко используется в качестве **стабилизированных источников питания**. Для повышения максимального выходного тока обычно к выходу ОУ подключаются составные транзисторы.

3.14. Однополярное питание ОУ

Напряжения питания, входной и выходной сигнал в устройствах на ОУ измеряются относительно общего корпуса («земли»). Фактически в схеме есть только одна общая точка – земля, относительно которой протекают внутренние токи ОУ. Эта особенность позволяет применить для питания ОУ однополярное напряжение, подав с помощью делителя напряжения половину напряжения источника питания на положительный вход, создавая искусственную «землю».

Схема ОУ с однополярным питанием показана на рисунке 3.30.

Благодаря глубокой, 100% ООС по постоянному току из-за наличия разделительного конденсатора C схема является повторителем постоянного напряжения, напряжение на инвертирующем входе устанавливается равным выходному, обычно равному половине напряжения питания.

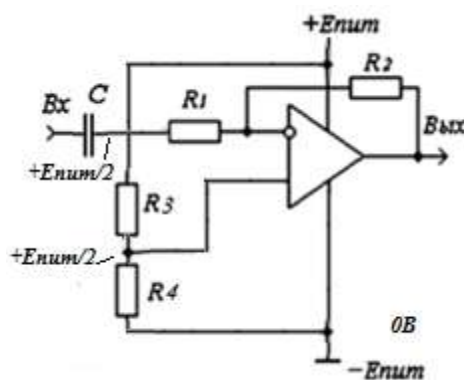


Рисунок 3.30 – Схема ОУ с однополярным питанием

При однополярном питании необходимо учитывать, что на входах и выходах имеется постоянное напряжение, для ликвидации которого необходимо использовать разделительные конденсаторы.

Схема однополярного питания в усилителях постоянного тока не используется.

4. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Введение.

Во введении необходимо кратко изложить **свое** представление о целях КР и ее месте в процессе обучения.

4.1 Структурная схема

Анализ задания показывает, как студент понял поставленную задачу, выяснил цели и назначения разработанного устройства

Выбор варианта исполнения с обоснованием. Критерием выбора является наиболее простой вариант реализации устройства, необходимо обосновать применение ОУ и выбор схемы устройства. Желательно сравнить между собой различные варианты схемы, например схемы регулировки усиления, выбор схемы включения ОУ.

Необходимое число каскадов определяется требованиями ТЗ. Число усилительных каскадов зависит от полосы пропускания, при широкой полосе рекомендуется коэффициент усиления 20дБ/каскад, при узкой полосе, например в усилителях звуковых частот коэффициент усиления может быть повышен до 40дБ на каскад.

Составление структурной схемы. При составлении структурной схемы следует учесть особенности ТЗ. При наличии регулировки усиления, с целью сохранения частотной характеристики, необходимо использовать отдельный, более широкополосный каскад регулировки усиления. При выходных мощности или токе, превышающих паспортные для характеристики для ОУ, необходимо введение дополнительного каскада усилителя мощности.

4.2 Электрическая схема

Выбор электрической схемы проводится в соответствии со структурной схемой и рекомендациями раздела 3.

Выбор ОУ проводится на основании справочных данных и требований ТЗ по трем параметрам:

1. По частоте единичного усиления f_1 . При заданной верхней рабочей частоте усилителя $f_в$ для обеспечения расчётного коэффициента усиления каскада K_0 , независящего от характеристик ОУ, необходима частота единичного усиления

$$f_1 \geq (3-10)K_0 f_в;$$

2. По максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ V_{max} при максимальном выходном напряжении $U_{вых}(f)$ на верхней частоте каскада $f_в$. Для обеспечения линейного режима ОУ необходимо выполнение неравенства:

$$V_{max} \geq 2\pi \cdot f_в \cdot U_{вых}(f);$$

3. По максимальному выходному напряжению:

$$U_{выхmax} \geq \sqrt{2}U_{вых}(f).$$

Выбор пассивных элементов (тип, мощность, напряжение) производится по усмотрению разработчика. Необходимо, чтобы выбранные резисторы соответствовали мощности, а электролитические конденсаторы) – полярности и напряжению питания.

Расчет электрической схемы. Расчет элементов электрической схемы производится по выражениям раздела 3, приведенным в данном пособии. Расчет начинается с выбора резисторов, обеспечивающих нужный режим работы и термостабильность работы устройства. Следует учитывать ограничения на максимальную величину используемых резисторов, при которых можно пренебречь влиянием ОУ:

$$R_{max} \ll R_{вх ОУ} \approx 1 \text{ МОм}.$$

При расчете каскада регулировки усиления учитывается необходимая глубина регулировки, которая обеспечивается введением в схему переменного резистора.

Далее рассчитываются величину конденсаторов, необходимые для обеспечения нижней и верхней частот устройства или получения нужной реактивности устройства.

После расчетов составляется электрическая схема устройства в соответствии с ОС ТУСУР, которая дублируется в приложении к ПЗ.

4.3. Моделирование устройства

Моделирование проводится с целью подтверждение правильности проведенных расчетов и проверки соответствия характеристик разработанного устройства требованиям ТЗ. Для этого необходимо в выбранной программе (рекомендуются Multisim или Qucs) собрать разработанную схему – модель устройства.

Пример схемы в программе Multisim показан на рисунке 4.1.

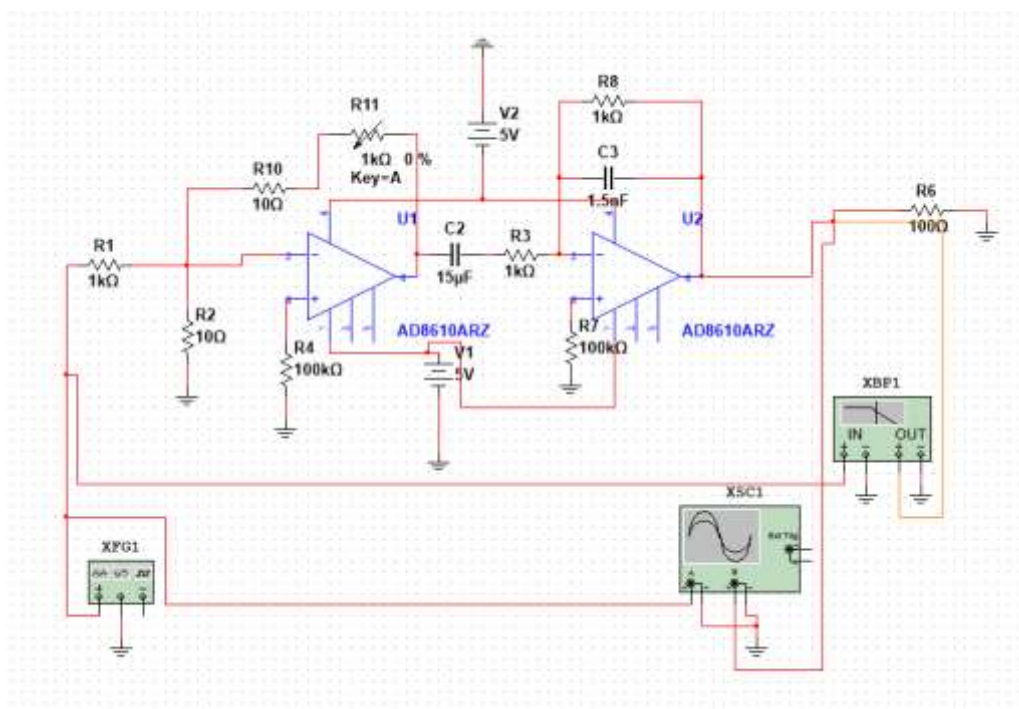


Рисунок 4.1 – Модель схемы усилителя с регулировкой усиления

Задавая параметры входного сигнала, необходимо получить характеристики устройства, заданные в ТЗ. Моделирование заканчивается сравнением результатов расчета и моделирования. В случае большого расхождения результатов расчета и моделирования (более 10%) выяснить причину расхождения результатов.

4.4. Экспериментальные исследования разработанного устройства

Цели экспериментального исследования:

1. Экспериментальное подтверждение соответствия характеристик разработанного устройства требованиям ТЗ.
2. Обучение сборке разработанного устройства на тестовой плате, алгоритму поиска ошибок в сборке устройства.
3. Освоение применения панорамных измерителей для измерений основных характеристик устройства.

Составление топологии элементов с соединениями.

В качестве сборочной платы используется основание с отверстиями для установки элементов, соединенными в группы. Конструкция узлов соединений обеспечивает надежную коммутацию с выводами элементов, в том числе микросхем. Сборочная плата с соединениями показана на рисунке 4.2.

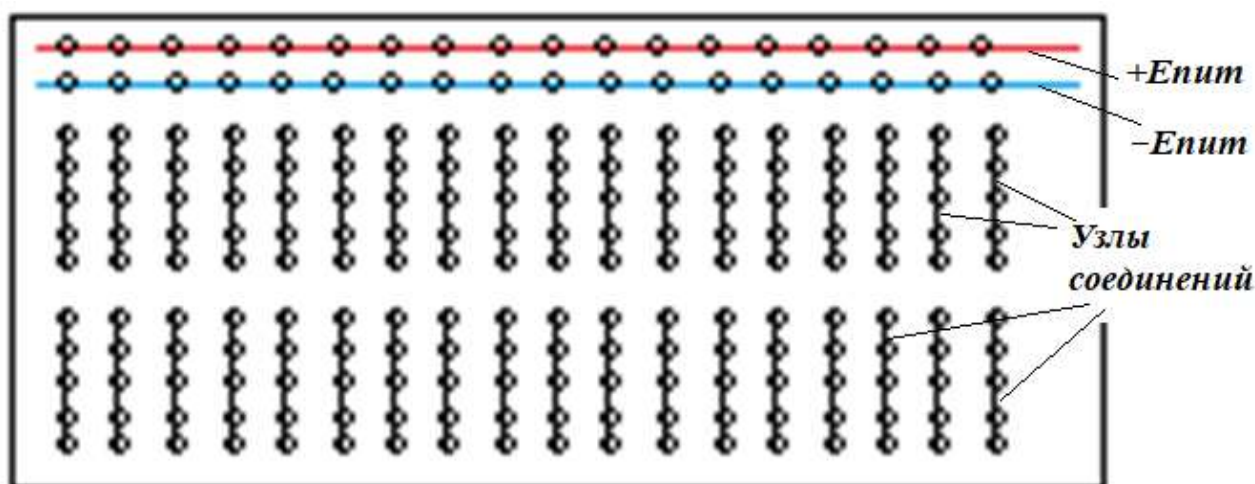


Рисунок 4.2 – Сборочная плата с соединениями, вид снизу

Рекомендуется использовать принятые в инженерной практике цвета проводников и клемм:

- **Красный цвет – плюс питания (+Епит);**
- **Синий цвет — минус питания (-Епит);**
- **Черный цвет — общий провод (корпус, земля);**
- **Белый цвет – выход устройства;**
- **Зеленый цвет – вход устройства.**

Внутри устройства провода произвольного цвета. В случае отсутствия проводов нужного цвета, обычно самый темный соединяется с корпусом. **Все измерения напряжений производятся относительно этого проводника.**

При расположении элементов схемы желательно выбирать местоположение каждого элемента, чтобы оно по конфигурации максимально повторяло электрическую схему. Это позволяет значительно уменьшить ошибки монтажа.

Основным критерием удачно разработанной топологии устройства является минимизация количества и длины дополнительных проводников.

Рекомендуемый порядок сборки.

Первым устанавливается ОУ, желательно выводы питания ОУ устанавливать в сторону шины питания. Сборка проводится последовательно, по пути прохождения сигнала в соответствии с электрической схемой.

Последовательно подключить элементы ко всем узлам. После установки каждого элемента схемы убедиться, что они соединены с нужными выводами микросхемы, узлами соединения соответствующих элементов и что количество подключенных элементов соответствует схеме устройства.

Подсоединить провода питания с соблюдением полярности и уровней напряжения. Включить питание.

Проверить режим работы ОУ. Ток потребления должен соответствовать паспортным данным ОУ, обычно не более 5 мА, выходное и входные

напряжения близки к нулю. В случае значительного отличия режима от расчетного обнаружить причину несоответствия. **Примечание: желательно определить причину на основе анализа, по результатам проведенных измерений, без отключения элементов.**

После устранения причин несоответствия можно подавать входной сигнал и снимать характеристики.

Пример сборки полосового фильтра.

В схеме ПФ используется ОУ *LM358P* - двухканальный операционный усилитель, поэтому используется один, первый канал ОУ. Схема полосового фильтра с обозначениями выводов ОУ показана на рисунке 4.3а, расположение выводов ОУ *LM358P* – на рисунке 4.3б.

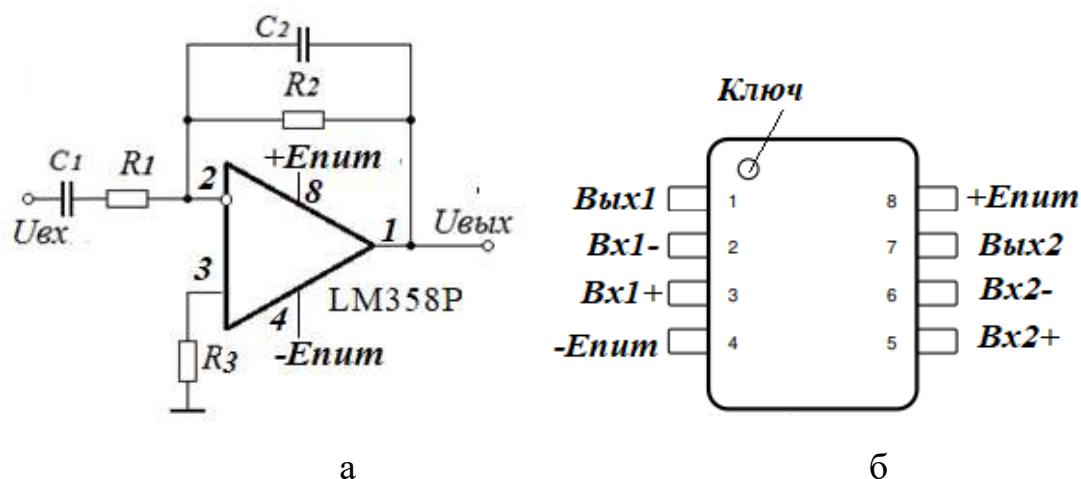


Рисунок 4.3 –Схема полосового фильтра (а); цоколевка ОУ (б)

Вариант расположения и соединения элементов схемы показан на сборочном чертеже, рисунок 4.4.

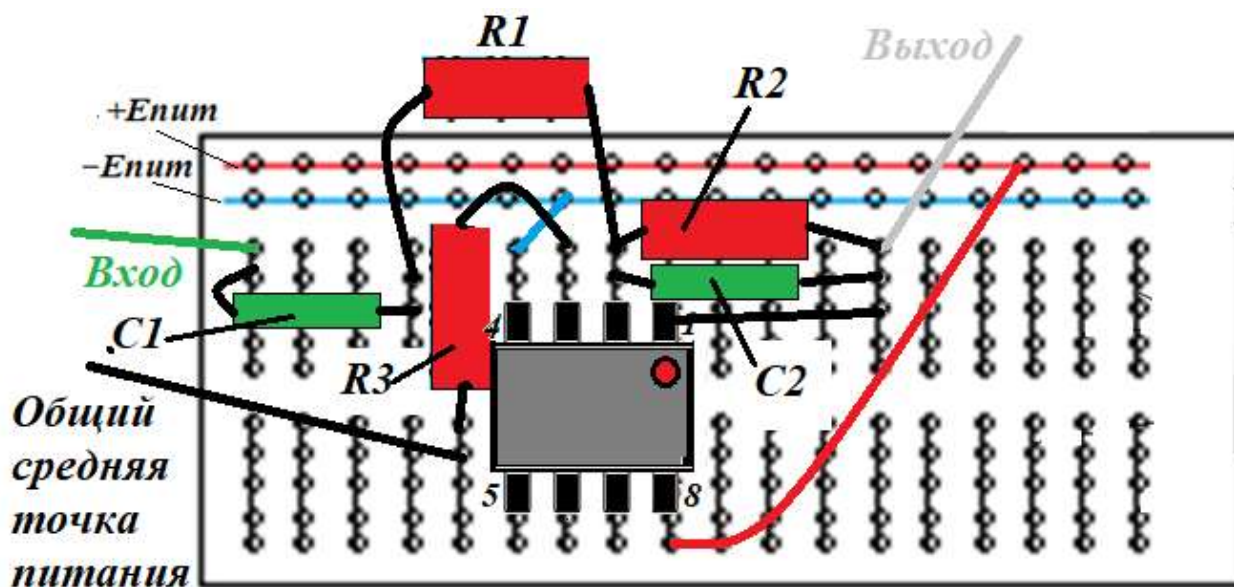


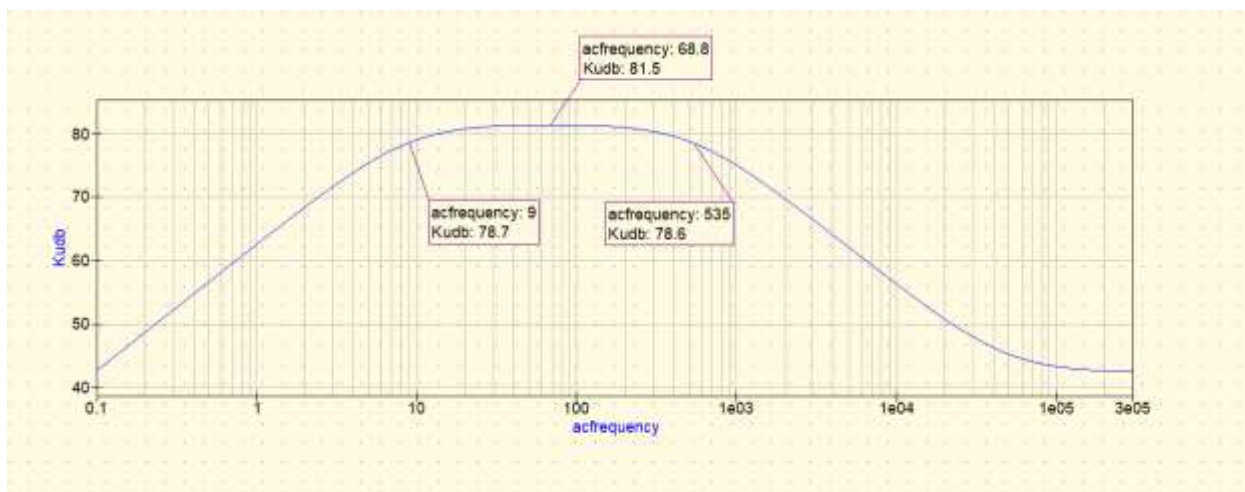
Рисунок 4.4 – Сборочный чертеж устройства

Допускается вместо сборочного чертежа в ПЗ приводить четкую фотографию устройства с обозначениями элементов.

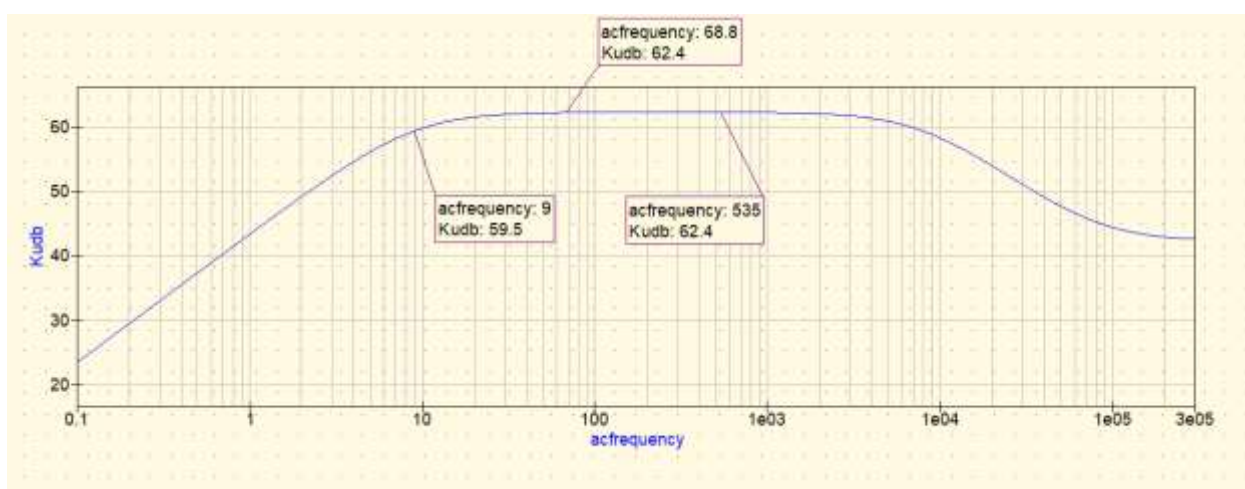
Снятие характеристик, указанных в ТЗ.

Снятие характеристик устройства производится на лабораторном оборудовании, позволяющем получить характеристики в панорамном режиме работы. Измерения проводятся в соответствии с инструкциями к прибору. Измерения должны показать соответствие с пунктами ТЗ по основным характеристикам, коэффициенту усиления, верхней и нижней частоте, глубине регулировки усиления и другим, в соответствии с ТЗ. Обратите внимание на сохранение верхней и нижней частот в процессе регулировки.

Пример минимального набора экспериментальных характеристик показан на рисунке 4.5.



а



б

Рисунок 4.5 – ЛАЧХ усилителя: а – при максимальном усилении,
б – при минимальном усилении

В заключении нужно сделать краткие выводы по результатам выполненной работы, сопоставить результаты расчета, моделирования и эксперимента. В случае расхождения результатов необходимо дать логичное объяснение расхождений, оценку полноты решения поставленных в задании задач.

В выводах объяснить пользу КР в освоении курса «Схемотехника», дать рекомендации по использованию результатов работы, оценить экономическую целесообразность проведенных исследований.

Рекомендуемая литература

1. Дуркин, В. В. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Общие вопросы проектирования импульсных усилителей : учебно-методическое пособие / В. В. Дуркин, С. В. Тырыкин. — Новосибирск: НГТУ, 2023. — 67 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/404339> (дата обращения: 25.06.2025).

2. Колесов, И. А. Проектирование аналоговых устройств: Методические указания по курсовому проектированию / И. А. Колесов. — Томск: ТУСУР, 2011. — 208 с. — URL: <https://edu.tusur.ru/publications/2260> (дата обращения: 25.06.2025).

3. Джонсон, Д. Справочник по активным фильтрам: Пер. с англ. / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 128 с.

4. Авдоченко Б. И., Схемотехника аналоговых электронных устройств: Методические указания к самостоятельной работе / Авдоченко Б. И. — Томск: ТУСУР, 2016. — 27 с. — URL: <https://edu.tusur.ru/publications/6393> (дата обращения: 27.06.2025).

5. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. — 4-е, изд. — Москва: ДМК Пресс, 2018. — 636 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107891> (дата обращения: 30.06.2025).

**Приложение А.
(обязательное)
Шаблон содержания КР**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Цели и задачи КР

2. Структурная схема

- *Анализ задания (как понял, сфера применения и т.д.)*
- *Выбор варианта исполнения с обоснованием (обосновать применение ОУ и схему)*

- *Необходимое число каскадов*

- *Составление структурной схемы*

3 Электрическая схема

- *Выбор ОУ (на основании справочных данных)*
- *Выбор пассивных элементов, (тип, мощность, напряжение)*
- *Электрическая схема в соответствии с ОС ТУСУР(дублируется в приложении)*

3.1. Расчет электрической схемы

- *Резисторы*
- *Конденсаторы*
- *Расчет отношения сигнал/шум или коэффициента гармоник, в соответствии с заданием*

3.2. Моделирование устройства

- *Модель устройства в выбранной программе*
- *Получение характеристик*
- *Сравнение результатов расчета и моделирования (в случае большого расхождения обоснованное объяснение)*

3.3. Исследование образца устройства

- *Составление топологии элементов с соединениями (минимизация дополнительных проводников)*
- *Сборка устройства на монтажной плате (топология элементов с соединениями)*
- *Внешний вид устройства (фотография с указанием положения элементов)*
- *Снятие характеристик, указанных в ТЗ*

Заключение

**Приложение Б.
(обязательное)
Титульный лист**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)
Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой РСС, доцент, кан.
техн. наук
_____ А.В. Фатеев
«__» _____ 2026 г.

УСИЛИТЕЛЬ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

Пояснительная записка к курсовой работе по дисциплине
«Схемотехника аналоговых электронных устройств»

Студент гр.142-3
_____ Иванов И.И.
«__» _____ 2026 г.

Руководитель
Профессор каф. РСС, д.т.н.
_____ Авдоченко
Б.И.
«__» _____ 2026 г.

Томск 2026

Приложение В.
(обязательное)
Образец Технического задания

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»
(ТУСУР)
Кафедра радиоэлектроники и систем связи (РСС)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой РСС, доцент, кан.
техн. наук
_____ А.В. Фатеев
« ____ » _____ 2026 г.

ЗАДАНИЕ №1

На курсовую работу по дисциплине «Схемотехника»
студенту группы 142-3 Иванову Ивану Ивановичу

1. **Тема работы:** Электронный эквивалент конденсатора.
2. **Исходные данные для проектирования:**
 - 2.1 **Назначение:** Применение в медицинской аппаратуре.
 - 2.2. **Электрические параметры проектируемого устройства:**
 - 2.2.1 Номинальное входное напряжение 100 мВ.
 - 2.2.2 Номинальная входная емкость 1 мФ.
 - 2.2.3 Минимальная добротность на частоте 100 Гц, $Q \geq 10$.
 - 2.2.4 Источник электропитания – обосновать напряжение и мощность.
3. **Вопросы, подлежащие разработке:**
 - 3.1 Выбор, обоснование и расчет структурной схемы.
 - 3.2 Выбор и расчет схемы электрической принципиальной.

3.3 Выбор типов радиоэлементов.

3.4 Моделирование схемы устройства на ЭВМ

3.5 Сборка устройства на монтажной плате и снятие характеристик.

4. Содержание графической части проекта:

4.1 Схема электрическая структурная.

4.2 Схема электрическая принципиальная.

4.3 Перечень элементов.

4.4 Результаты моделирования.

4.5 Результаты эксперимента.

Содержание и оформление пояснительной записки к работе в соответствии с ОС ТУСУР и требованиями задания.

Дата выдачи задания « ____ » _____ 2026 г.

Руководитель проектирования,
профессор каф. РСС

_____ / Б.И. Авдоченко

Исполнитель, студент гр. _____

_____ / _____

Вопросы для самоконтроля

1. Чем определяется максимальное значение коэффициента усиления ОУ без обратной связи.

Варианты ответа: 1. Частотой единичного усиления ОУ. 2. Частотной зависимостью. 3. Частотой, на которой определяется усиление. 4. Справочными данными ОУ.

2. Преимущество активных фильтров перед RLC- фильтрами:

Варианты ответа: 1. Возможность реализации высокой крутизны АЧХ на одном ОУ. 2. Малые токи потребления. 3. Широкий динамический диапазон. 4. Отсутствие индуктивных элементов.

3. Для чего нужны логарифмические усилители?

Варианты ответа: 1. Для расширения динамического диапазона входных сигналов. 2. Для расширения динамического диапазона выходных сигналов. 3. Для ограничения амплитуды максимального сигнала. 4. Для приближенного описания АЧХ.

4. Триггер Шмидта – это:

Варианты ответа: 1. Устройство сравнения амплитуд двух входных сигналов. 2. Генератор прямоугольных импульсов 3. Устройство перевода аналоговых сигналов в дискретные. 4. Компаратор с положительной обратной связью

5. Какое устройство является гиратором?

Варианты ответа: 1. Генератор сигналов. 2. Устройство фазового сдвига. 3. Электронный эквивалент индуктивности. 4. Устройство интегрирования сигнала.

6. По какой формуле определяется коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ?

Варианты ответа: 1. $K_0 = 1 + R_2/R_1$ 2. $K_0 = R_1/(R_1 + R_2)$ 3. $K_0 = -R_2/R_1$ 4. $K_0 = 1 - R_2/R_1$

7. Входное сопротивление инвертирующего усилителя:

Варианты ответа: 1. $R_{вх} \rightarrow \infty$ 2. $R_{вх} \rightarrow 0$ 3. $R_{вх} = R_1$ 4. $R_{вх} = R_1 + R_2$

8. До какой частоты инвертирующий усилитель сохраняет свойство безинерционности?

Варианты ответа: 1. До частоты f_T 2. До частоты единичного усиления ОУ 3. До частоты сопряжения по диаграмме Боде. 4. До частоты $f = f_1 / K_{OC}$

9. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

Варианты ответа: 1. $K_{OC} = 1 - R_2 / R_1$ 2. $K_{OC} = 1 + R_2 / R_1$ 3. $K_{OC} = (R_1 + R_2) / R_2$ 4. $K_{OC} = K_o / (1 + \beta K)$

10. До какой частоты буферный каскад сохраняет свойства безинерционности?

Варианты ответа: 1. До частоты f_T 2. До частоты единичного усиления ОУ 3. До частоты сопряжения по диаграмме Боде для ОУ 4. До частоты $f = f_1 / K_{OC}$

11. Какое устройство имеет частотную характеристику, описываемую выражением

$$A_1(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}?$$

Варианты ответа: 1. ФНЧ первого порядка 2. ФНЧ второго порядка 3. ФВЧ 4. Интегратор

12. Какое устройство имеет частотную характеристику, описываемую выражением

$$A_1(\omega) = \frac{k \cdot \omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}?$$

Варианты ответа: 1. ФНЧ первого порядка 2. ФНЧ второго порядка 3. ФВЧ 4. Дифференцирующее устройство

13. Чему равен максимальный фазовый сдвиг ФНЧ второго порядка?

Варианты ответа: 1. -360° 2. -270° 3. -180° 4. -90°

14. Для чего используется триггер Шмидта?

Варианты ответа: 1. Для получения прямоугольных импульсов 2. Для ликвидации многократных срабатываний компаратора. 3. Для перехода к

цифровой обработке сигналов 4. Для получения крутого фронта импульса.

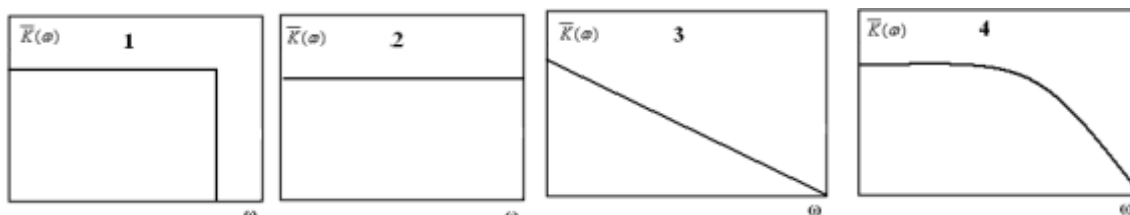
15. Чем определяется высокое быстродействие триггера Шмидта?

Варианты ответа: 1. Высоким коэффициентом усиления. 2. Наличием петли гистерезиса. 3. Наличием глубокой обратной связи. 4. Положительной обратной связью в момент переключения

16. На каком свойстве основано действие электронного эквивалента емкости на ОУ?

Варианты ответа: 1. На увеличении глубины ОС с ростом частоты при емкостной ОС. 2. На спаде АЧХ ОУ с обратной связью на ВЧ 3. На подъеме АЧХ ОУ с обратной связью. 4. На увеличении входной емкости ОУ с обратной связью.

17. Какую форму АЧХ имеет фазовый корректор?



Варианты ответа: 1. 2. 3. 4

18. Как определить верхнюю частоту усилителя на ОУ?

Варианты ответа: 1. По справочным данным ОУ 2. По частоте, на которой коэффициент передачи равен 1 3. По частоте, на которой коэффициент передачи равен 0,707 4. По частоте, на которой коэффициент передачи снижается до уровня 0,707 от исходного.

19. Как изменяется крутизна спада частотной характеристики ОУ при изменении коэффициента усиления?

Варианты ответа: 1. Угол наклона при увеличении коэффициента усиления увеличивается 2. Угол наклона при увеличении коэффициента усиления уменьшается, 3. Угол наклона от коэффициента усиления не зависит. 4. Не знаю

20. При последовательной отрицательной обратной связи по току:

Варианты ответа: 1. Увеличиваются входное и выходное сопротивления. 2. Уменьшаются входное и выходное сопротивления. 3. Увеличивается входное и уменьшается выходное сопротивления. 4. Увеличивается выходное и уменьшается входное сопротивления.

21. При параллельной отрицательной обратной связи по напряжению:

Варианты ответа: 1. Увеличиваются входное и выходное сопротивления. 2. Уменьшаются входное и выходное сопротивления. 3. Увеличивается входное и уменьшается выходное сопротивления. 4. Увеличивается выходное и уменьшается входное сопротивления.

22. При параллельной отрицательной обратной связи по напряжению:

1. Варианты ответа: 1. Уменьшается значение нижней граничной частоты. 2. Увеличивается значение нижней граничной частоты. 3. Уменьшается значение верхней граничной частоты. 4. Увеличивается входное сопротивление

23. Величина фазового сдвига операционного усилителя на частоте единичного усиления:

Варианты ответа: 1. 45° , 2. 90° . 3. 180° 4. $\approx 0^\circ$

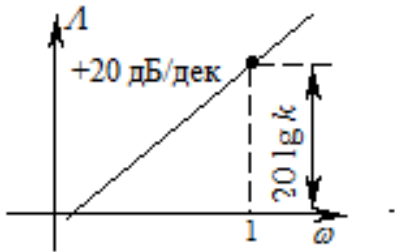
24. Как изменяется крутизна спада частотной характеристики ОУ при изменении напряжения питания?

Варианты ответа: 1. Крутизна спада при увеличении напряжения питания увеличивается 2. Крутизна спада при увеличении напряжения питания уменьшается 3. Крутизна спада от напряжения питания не зависит. 4. Не знаю

25. Как изменяется крутизна спада частотной характеристики ОУ при изменении коэффициента усиления?

Варианты ответа: 1. Крутизна спада при увеличении коэффициента усиления увеличивается 2. Крутизна спада при увеличении коэффициента усиления уменьшается, 3. Крутизна спада от коэффициента усиления не зависит. 4. Не знаю.

26. Характеристика какого устройства изображена на рисунке?



Варианты ответа: 1. ФВЧ 2. ФНЧ 3. Дифференцирующего устройства.
4. Интегратора