Предмет:
Схемотехника

Вывод типа «Я измерил все, что требовалось» приниматься к рассмотрению не будут!

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## “Исследование резисторного каскада предварительного усиления на биполярном транзисторе”

**1.1. Цель работы**

Исследовать влияние параметров элементов схемы каскада с эмиттерной стабилизацией на его показатели (коэффициент усиления, частотные и переходные характеристики).

**1.2. Подготовка к работе**

1.2.1. Изучить следующие вопросы курса:

* цепи питания и схемы смещения транзисторных каскадов усиления;
* свойства и особенности каскадов предварительного усиления;
* назначение элементов принципиальной схемы резисторного каскада;
* амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) резисторного каскада;
* переходные характеристики резисторного каскада;
* эквивалентные схемы и линейные искажения в резисторном каскаде; расчетные соотношения для резисторного каскада.

1.2.2. Для заданной схемы, в соответствии с исходными данными, указанными в таблице 1, рассчитать следующие параметры усилителя:

* коэффициент усиления по напряжению, сквозной коэффициент усиления каскада;
* коэффициент частотных искажений каскада на частоте 100Гц, обусловленной влиянием емкости в цепи эмиттера *Сэ* (*С*5) и разделительных конденсаторов *Ср вх* (*С*1)и *Ср вых* (*С*2). Определить общий коэффициент частотных искажений, вносимых этими элементами. При этом учесть, что выходное сопротивление транзистора значительно больше сопротивления в цепи коллектора *R*4;
* коэффициент частотных искажений *Мв* на частоте 100кГц, обусловленной динамической емкостью *Сбэ дин* транзистора и емкостью нагрузки *Сн* (*С*3)*.* Определить общий коэффициент частотных искажений, вносимых этими элементами.
* время установления переднего фронта прямоугольного импульса малой длительности (*tи =* 5*мкс*). При этом считать, что переходные искажения в области малых времен определяется выходной цепью каскада:
* относительный спад плоской вершины прямоугольного импульса большой длительности (*tи =* 5000*мкс*) вследствие влияния разделительных емкостей.

**Исходные данные для предварительного расчета**: транзистор типа KT3102А с параметрами: *h21э=*185*,* *Сбэ дин=*1,8*нФ,* *fh21э=*1,5*МГц, rб′б =* 50 *Ом*; напряжение источника питания *Eп=*15*В,* ток покоя транзистора *iк*0*=*18,6*мА.*

Варианты значений входной (С1) и выходной (С2) разделительной емкости, а также емкости нагрузки *С*3, указанные в таблице 1, выбираются по последней цифре пароля**.**

Таблица 1 – Варианты значений емкостей

|  |  |
| --- | --- |
| № | 1 |
| С1, мкФ | 2.2 |
| С2, мкФ | 4.7 |
| С3, пФ | 200 |
| С5, мкФ | 500 |

**1.3. Описание схемы исследуемого усилителя**

Принципиальная схема резисторного каскада приведена на рисунке 1.

На схеме транзистор *VT*1 включен по схеме с общим эмиттером. Необходимый режим работы и стабилизации тока коллектора обеспечивается резисторами *Rб1, Rб2, Rэ*. При этом делитель напряжения *Rб1, Rб2*  создает требуемое напряжение смещения, а *Rэ* предназначен для эмиттерной стабилизации постоянного коллекторного тока транзистора *VT*1.

Через сопротивление *Rк* подается постоянное питающее напряжение от источника питания на коллектор *VT*1, кроме того, благодаря *Rк* , усиленный сигнал поступает в нагрузку.

Конденсаторы *Ср1* и *Ср2*  разделяют по постоянному току входную и выходную цепи усилителя.

 Конденсатор *Сэ*  (большой емкости) служит для устранения отрицательной обратной связи по переменному току, создаваемой резистором *Rэ* (для повышения коэффициента усиления). Если емкость *Сэ*  отключить, то в схеме возникнет частотно-независимая отрицательная обратная связь по переменному току с глубиной

*,*

где **- сопротивление базового делителя напряжения;

*Rвх.э* – входное сопротивление транзистора.

Эта обратная связь существенно уменьшит коэффициент усиления на средних частотах.

Если в цепь эмиттера подключить малую емкость, то создается частотно-зависимая отрицательная обратную связь, применяемая для коррекции частотной характеристики на верхних частотах. При этом общий коэффициент усиления уменьшается (на низких и средних частотах так же, как и при частотно-независимой обратной связи). На верхних частотах *Сэ*  сопротивление уменьшается, при этом уменьшается глубина ООС и увеличивается коэффициент усиления, компенсируя частотные искажения и значительно расширяя диапазон усиливаемых частот.

**+**

*Еп*

*Rист*

*Ср*1

 *Rб1*

*Rк*

 *Rб2*

*Rэ*

*Сэ*

*Ср*2

*Rн*

*Сн*

*Еист*

*500мкФ*

*500пФ*

*2к*

*2,7мкФ*

*2,7к*

*75*

*15к*

*1к*

*4,7мкФ*

*360*

*15*

Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки

Резистор *Rист* эквивалентен внутреннему сопротивлению источника сигнала, а *R*н является нагрузкой для усилителя. Под нагрузкой для каскада предварительного усиления понимается входное сопротивление следующего усилительного каскада. Конденсатор *С*н имитирует влияние емкости нагрузки, в качестве которой может служить входная динамическая емкость транзистора следующего каскада.

**1.4. Расчетная часть**

***Перед выполнением работы требуется рассчитать следующие параметры усилителя:***

* коэффициент усиления и сквозной коэффициент усиления по напряжению в области средних частот (без ООС по переменному току);
* входное сопротивление транзистора, включенного с ОЭ;
* общий коэффициент частотных искажений на нижней частоте (*fн = 40Гц*) при заданных значениях емкостей *Ср1,* *Ср2* и *Сэ* ;
* общий коэффициент частотных искажений на верхней частоте (*fв = 100кГц*) при заданных значениях входной динамической емкости транзистора *Сбэ дин* и емкости нагрузки *Сн* ;
* относительный спад плоской вершины импульса большой длительности (*tимп* = 2мс) за счет разделительных емкостей *∆общ*;
* время установления фронта импульса малой длительности (*tимп* = 5мкс) *tуст* за счет влияния емкости нагрузки.

Коэффициент усиления по напряжению в области средних частот определяется по формуле:

 . (1)

Эквивалентное сопротивление нагрузки по переменному току равно параллельному соединению сопротивлений *R*4 и *R*6:

 . (2)

Входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

*,* (3)

Сквозной коэффициент усиления по напряжению равен произведению коэффициента передачи входной цепи на коэффициент усиления каскада:

*,*  (4)

Входное сопротивление каскада *Rвх*, представляет собой параллельное соединение входного сопротивления транзистора *Rвх.э* и сопротивлений делителя в цепи базы *Rб*

, (5)

где *Rб* – определяется выражением (7), а входное сопротивление транзистора – выражением (3).

Эквивалентное сопротивление источника сигнала *R′ист* равно параллельному соединению сопротивлений *R*1*, R*2 и *R*3, то есть:

 , (6)

 . (7)

Сопротивление эквивалентного генератора для области нижних частот(*Rэн*) представляет собой параллельное соединение сопротивления коллекторной нагрузки *R*4 и выходного сопротивления транзистора *Rвых.* Если *R*4 невелико (много меньше выходного сопротивления транзистора), то *Rэн* ≈ *R*4. При понижении частоты сопротивление разделительной емкости растет, а ток в цепи и, соответственно, напряжение на нагрузке уменьшается, что приводит к возникновению частотных искажений.

Коэффициент частотных искажений, вносимых разделительными емкостями:

, (8)

 . (9)

Для большой емкости в цепи эмиттера (при сравнительно небольших частотных искажениях, вызываемых цепочкой *RэСэ*) коэффициент частотных искажений можно рассчитать по приближенному выражению

, (10)

где *КT –* динамический коэффициент усиления по току, который в приближенных расчетах можно брать равным статическому коэффициенту усиления по току *h*21*э.*

При этом общий коэффициент частотных искажений усилительного каскада на нижних частотах определяется как произведение

*Мн = Мнр вх Мнр вых Мнэ* (11)

На верхних частотах частотные искажения могут вноситься входной динамической емкостью *Сбэ дин* транзистора и емкостью нагрузки (*Сн = С*3). Коэффициент частотных искажений, создаваемых входной динамической емкостью транзистора, определяется выражением:

, (12)

где внутреннее сопротивление эквивалентного генератора для входной цепи каскада

 (13)

где *rб′э* определяется из (3).

Частотные искажения, вносимые емкостью нагрузки *С*3 транзистора

, (14)

где внутреннее сопротивление эквивалентного генератора для выходной цепи каскада

. (15)

Относительный спад плоской вершины импульса большой длительности за счет разделительных емкостей находится по приближенным формулам

;  (16)

*Δобщ = ΔСр вх + ΔСр вых*, (17)

*tуст =* 2,2*СнRэв вых*, (18)

где *Rэв вых* – эквивалентное сопротивление выходной цепи каскада, рассчитанное для диапазона верхних частот.

**1.4 Задание для исследования**

Для данного усилительного каскада представляет интерес решение трех основных задач:

1. Исследование амплитудно-частотных (ЛАЧХ) характеристик усилителя с целю исследования влияния реактивных элементов:
	* без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току (при включении большой емкости в цепь эмиттера) при номинальных значениях компонентов;
	* без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току при уменьшении *Ср2*и увеличении *Сн* (примерно в 2 раза);
	* с частотно-независимой обратной связью (без подключения емкостей в цепи эмиттера транзистора);
	* с частотно-зависимой обратной связью (при включении малой емкости эмиттера, на несколько порядков меньше номинальной (например, Сэ = 4нФ), являющейся элементом высокочастотной коррекции).

***В отчете необходимо привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) все четыре АЧХ, изображенные для сравнения на одном графике. Отметить, как изменился коэффициент усиления на средних частотах К(fср) и как изменились граничные частоты при допустимых частотных искажениях Мн = Мв = 1,41. Объяснить результаты экспериментов.***

1. Исследовать переходную характеристику каскада в области малых времен (*tи* = 5 мкс).

Объяснить причины и механизм возникновения переходных искажений импульсов малой длительности. Какие элементы схемы вносят эти искажения?

***В отчете необходимо привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) переходные характеристики для следующих вариантов:***

***-*** без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току (при включении большой емкости в цепь эмиттера) при номинальных значениях элементов схемы (указанных в таблице 1);

***-*** без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току при увеличении *Сн* (примерно в 2 раза);

***-*** с частотно-зависимой обратной связью (при включении малой емкости эмиттера, на несколько порядков меньше номинальной (например, Сэ = 4нФ), являющейся элементом высокочастотной коррекции) при номинальных значениях элементов схемы (указанных в таблице 1)..

***Все три переходные характеристики необходимо для сравнения изобразить на одном графике. Отметить, как изменилась амплитуда импульса и показать, как изменилось время установления импульса. Объяснить результаты экспериментов.***

Под временем установления (*tуст*), характеризующего длительность (крутизну) переднего фронта, понимается интервал времени, за напряжение возрастет от уровня 0.1*Uуст*, до на уровня 0.9*Uуст*, где *Uуст**–* установившееся значение, под которым понимается значение напряжения в конце импульса.

1. Исследовать переходную характеристику каскада в области больших времен (*tи* = 2 мс = 2000 мкс).

Объяснить причины и механизм возникновения переходных искажений импульсов малой длительности. Какие элементы схемы вносят эти искажения?

***В отчете необходимо изобразить (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) переходные характеристики для следующих вариантов:***

***-*** без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току (при включении большой емкости в цепь эмиттера) при номинальных значениях компонентов;

***-*** без учета влияния отрицательной обратной связи по переменному току при уменьшении *Ср2* (примерно в 2 раза);

***-*** при частотно-независимой обратной связи (при отключении Сэ) при номинальных значениях элементов схемы (указанных в таблице 1)..

***Все три переходные характеристики необходимо для сравнения изобразить на одном графике. Отметить, как изменилась амплитуда импульса и показать, как изменился относительный спад вершины импульса. Объяснить результаты экспериментов.***

Под относительным спадом понимается отношение изменения напряжения за время длительности импульса к начальному размаху напряжения.

**1.5. Содержание отчета**

* 1. 1. Принципиальная схема исследуемого каскада.
	2. 2. Результаты предварительного расчета.

3. Графики амплитудно-частотных характеристик.

4. Осциллограммы выходного импульсного сигнала (для области малых и больших времен), результаты измерений переходных искажений.

5. Выводы по результатам измерений, сравнение с результатами расчетов. Под выводами понимается сравнение результатов и объяснение механизма влияния компонентов схемы на АЧХ и ПХ.

6. Ответы на контрольные вопросы.

**1.7. Контрольные вопросы**

1. Изобразить упрощенную эквивалентную схему транзистора для широкойполосы частот в системе физических параметров. Объяснить частотные свойства транзистора.
2. Изобразить эквивалентные схемы входной и выходной цепи резисторного каскада усиления для широкой полосы частот. Преобразовать схему для области нижних, средних и верхних частот.
3. По эквивалентной схеме выходной цепи резисторного каскада усиления для области нижних частот объяснить причины частотных и переходных искажений.
4. По эквивалентной схеме выходной цепи резисторного каскада усиления для области верхних частот объяснить причины частотных и переходных искажений.
5. Изобразить переходные характеристики резисторного каскада усиления в области больших и малых времен. Объяснить причины переходных искажений. Какими параметрами они оцениваются?
6. Объяснить действие большой емкости в цепи эмиттера на частотную характеристику.
7. Объяснить действие большой емкости в цепи эмиттера на переходную характеристику.
8. Объяснить действие эмиттерной высокочастотной коррекции с помощью малой емкости в цепи эмиттера на частотную характеристику.
9. Объяснить действие эмиттерной высокочастотной коррекции с помощью малой емкости в цепи эмиттера на переходную характеристику.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

**«Исследование резисторного каскада широкополосного усилителя**

**на полевом транзисторе»**

**2.1 Цель работы**

Исследовать влияние элементов схемы каскада широкополосного усиления на полевом транзисторе с общим истоком на его показатели (коэффициент усиления, частотные и переходные характеристики).

2.2 Подготовка к работе

2.2.1. Изучить следующие вопросы курса:

* цепи питания полевого транзистора;
* назначение элементов принципиальной схемы резисторного каскада на полевом транзисторе;
* принцип действия простой параллельной высокочастотной коррекции индуктивностью;
* площадь усиления: определение и методика измерения по АЧХ;
* принцип действия низкочастотной коррекции;
* переходные характеристики и искажения в широкополосном усилителе;
* влияние цепей коррекции на переходные характеристики в области малых и больших времен.

2.2.2. Изучить принципиальную схему каскада.

2.2.3. Выполнить предварительный расчет к лабораторной работе: используя данные принципиальной схемы, рассчитать оптимальные значения *L* и *Сф* для получения максимально плоской формы АЧХ в области граничных частот (*fв* и *fн*). Варианты значений выходной разделительной емкости (*Ср*2) и емкости нагрузки *Сн*, указанные в таблице 10.2, выбираются по последней цифре пароля.

Таблица 2 – Варианты значений емкостей

|  |  |
| --- | --- |
| № | 1 |
| *Ср*2, нФ | 10 |
| *Сн*, пФ | 200 |

**Литература**

1. Учебное пособие Архипов С.Н. «Конспект лекций по курсу «Схемотехника устройств телекоммуникаций».

### 2.3 Описание схемы лабораторной установки

Принципиальная схема каскада изображена на рисунке 2.

Исследуемый усилитель выполнен на полевом транзисторе 2П303Б с *p-n* - переходом и каналом *n* - типа. Резистор *Rи* служит для создания начального напряжения смещения на за­творе, определяющего положение точки покоя. Подача напряжения смещения на за­твор осуществляется через резистор *Rз.* Поскольку через *Rз* протекает только ток затвора, не превышающий 10-10…10-12 А, то допустимо считать, что ток затвора отсутствует и смещение полностью определяется падением на­пряжения на резисторе *Rи.* Резистор *Rи* создает также ООС по постоянному току, которая стабилизирует ток покоя при изменениях температуры и тех­нологическом разбросе параметров элементов.

Резистор *Rи* может являться элементом отрицательной обратной связи по сигналу (по пе­ременному току), что может привести к уменьшению коэффициента усиления. Для устранения этой ОС в рабочем диапазоне частот параллельно резистору *Rи* подключается конденсатор большой ёмкости *Си*.

*L*

**+**

*Еп*

*Rист*

*Ср*1

*Rс*

*Rи*

*Си*

*Ср*2

*Rн*

*Сн*

*Е*ист

*Rз*

*Сф*

*Rф*

*510к*

*1мкФ*

*500пФ*

*5мкФ*

*510*

*10нФ*

*2к*

*5,1к*

*0,2мкФ*

*1,5мГн*

*510к*

*1к*

*15*

Рисунок 2 – Принципиальная схема исследуемого каскада

На входе и выходе каскада находятся разделительные конденсаторы *С*р1 и *С*р2. К внешней нагрузке *Rн* подключен конденсатор *Сн*, который имитирует влияние ёмкостной состав­ляющей внешней нагрузки. Резистор *Rист* представляет собой внутреннее сопротивление источника сигнала.

Ем­кость *Сф* вместе с резистором *Rф* используются как эле­менты фильтра в цепи питания. Причем, при подключении малой емкости фильтра эта цепочка может использоваться для коррекции АЧХ в области нижних частот.

Для коррекции АЧХ в области верхних частот применяется индуктивность *L* в цепи выходного электрода.

При выборе оптимальных значений корректирующих элементов искажения частотных и переходных характеристик будут минимальны. Если *Сф* < *Сф.опт* и *L > Lопт* возникает «перекоррекция», при которой коэффициент усиления на НЧ и ВЧ становится больше, чем на средних частотах. В этом случае частотный диапазон несколько возрастает, но на АЧХ возникают подъемы в области низких и высоких частот.

Оптимальное значение емкости *Сф* определяется выражением

. (1)

Оптимальное значение индуктивности *Lопт* определяется как

*Lопт =* 0,414 *С*н(*Rс*)2 . (2)

Эффективность каскада широкополосного усиления оценивается параметром «площадь усиления», который при выполнении условия *fн >> fв* можно определить как

*П = К(fср) ⋅ fв ,* (3)

При расчете площади усиления по (3.3) коэффициент усиления подставляется в относительных единицах (разах).

**2.4 Задание для исследования**

**1. Исследование амплитудно-частотные характеристики**.

Исследовать следующие варианты АЧХ усилительного каскада.

***а) Для схемы без коррекции:***

* при отключенной емкости фильтра и отсутствие индуктивности (*L = 0*);
* при подключении большой емкости фильтра (например, *Сф = 100мкФ*).

В последнем случае большая емкость фильтра (*Сф*) фактически шунтирует сопротивление *Rф* по переменному току, уменьшая общее сопротивление в стоковой цепи транзистора. Уменьшение активного сопротивления нагрузки уменьшает коэффициент усиления, но расширяет частотный диапазон. Определите, как это скажется на площади усиления.

***В отчете необходимо привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) эти две АЧХ, изображенные для сравнения на одном графике. Отметить, как изменился коэффициент усиления на средних частотах К(fср) и как это отразилось на площади усиления. Объяснить результаты экспериментов.***

***б) Для схемы с низкочастотной (Сф, Rф) и высокочастотной (L) – коррекцией:***

* при наличие корректирующих элементов, указанных на схеме;
* при оптимальных значениях емкости *Сф.опт* и индуктивности *Lопт*.

***Привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) эти две АЧХ, изображенные для сравнения на одном графике. Отметить, как изменилась форма АЧХ и как это отразилось на площади усиления. Объяснить результаты экспериментов.***

**2.** **Исследовать** **переходную характеристику** **каскада в области малых времен** (*tи* = 5 мкс).

Исследовать следующие варианты переходной характеристики:

* при отключенной емкости фильтра и отсутствие индуктивности (*L = 0*);
* при подключении большой емкости фильтра (например, *Сф = 100мкФ*).
* с коррекцией при номинальном значении корректирующей индуктивности;
* с коррекцией при оптимальном значении индуктивности *Lопт*, рассчитанном для заданного варианта.

***Привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) все четыре переходные характеристики, изображенные для сравнения на одном графике. Отметить, как изменилась форма ПХ и как это отразилось на времени установления импульса малой длительности. Объяснить результаты экспериментов.***

**3**. **Исследовать переходную характеристику каскада для области больших времен** (*tи* = 5000 мкс).

Исследовать следующие варианты переходной характеристики:

* при отключенной емкости фильтра и отсутствие индуктивности (*L = 0*);
* при подключении большой емкости фильтра (например, *Сф = 100мкФ*).
* с коррекцией при номинальных значениях элементов НЧ-коррекции (*Сф Rф*);
* с коррекцией при оптимальном значении емкости фильтра *Сф.опт*, рассчитанном для заданного варианта.

***Привести (либо качественно, либо с применением программ компьютерного моделирования) все четыре переходные характеристики, изображенные для сравнения на одном графике. Отметить, как изменилась форма ПХ и как это отразилось на относительном спаде вершины импульса большой длительности. Объяснить результаты экспериментов.***

### Содержание отчета

1. Принципиальная схема каскада.

2. Результаты предварительного расчёта.

3. Графики амплитудно-частотных характеристик.

4. Осциллограммы выходных импульсов малой длительности.

5. Осциллограммы выходных импульсов большой длительности.

6. Выводы по работе (анализ влияния элементов на коэффициенты усиления, граничные частоты, площади усиления, *tуст*, *Δобщ*) для различных вариантов параметров и объяснение механизма работы цепей коррекции.

7. Ответы на контрольные вопросы.

### 2.6. Контрольные вопросы

1. Изобразить эквивалентные схемы выходной цепи каскада для областей нижних, верхних частот. Пояснить причины, вызывающие частотные искажения на низких и высоких частотах.

2. Пояснить причины, вызывающие переходные искажения в области больших и малых времен. Объяснить форму выходных импульсов для схемы без коррекции.

3. Объяснить влияние корректирующих элементов на АЧХ в области низких частот.

4. Объяснить влияние корректирующих элементов на переходную характеристику в области больших времен.

5. Объяснить влияние корректирующей индуктивности L1 на АЧХ (ПХ) в области верхних частот (малых времен).

.6. Объяснить, как влияет изменение номиналов элементов схемы на АЧХ и ПХ (*Rc, Cр вых,, Сн*).

7. Что такое площадь усиления? Как она определяется по амплитудно-частотной характеристике?

8. Пояснить назначение и виды коррекции в каскадах широкополосного и импульсного усиления.

9. Объяснить отличия в форме АЧХ при емкости С5 и С6.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

«Исследование интегратора и дифференциатора на основе

операционного усилителя»

**3.1 Цель работы**

Исследовать свойства и характеристики схем интегратора и дифференциатора на основе операционного усилителя (ОУ).

### Подготовка к работе

Изучить следующие вопросы курса:

* свойства и особенности построения схем интегратора и дифференциатора на ОУ;
* способы повышения устойчивости схемы дифференциатора на ОУ;
* функциональные схемы и характеристики операционных усилителей.

#### Литература

1. Учебное пособие Архипов С.Н. «Конспект лекций по курсу «Схемотехника устройств телекоммуникаций».
	1. Описание исследуемых схем

***Интегратором*** называется устройство, выходное напряжение которого пропорционально интегралу входного сигнала (площади под кривой входного сигнала). Схема идеального интегратора приведена на рисунке 3.

Схема содержит входной резистор R1 и конденсатор С1, включенный в цепь обратной связи ОУ (А1).

∞

*Uвх*

*Uд*

*Uвых*

*R1*

*С1*

*Iвх*

*IОС*

*а*

Рисунок 3 – Принципиальная схема идеального интегратора

Учитывая большой собственный коэффициент усиления ОУ и глубокую отрицательную обратную связь, дифференциальное напряжение между инвертирующим и неинвертирующем входами (*Uд* = *Uвых / К*) близко к нулю. Таким образом, напряжение на инвертирующем входе (в точке *а*) близко к напряжению нулевого потенциала, то есть является «виртуальной землей». В результате входной ток определяется только входным напряжением и резистором *R1*. Вследствие большого входного сопротивления ОУ практически весь входной ток протекает через конденсатор *С1*, заряжая его. При этом реализуется операция интегрирования.

Таким образом, для идеального интегратора

*Iвх =IОС*. (1)

При этом

; . (2)

Подставляя (2) в (1) и выражая *Uвых,* получим выражение для выходного напряжения во временной области.

**, (3)

где *Т –* интервал интегрирования. Величина *T*1 *= R*1*C*1 называется постоянной времени интегратора, определяющей скорость заряда емкости.

В реальном интеграторе (с учетом свойств реального ОУ, реальных R и С), построенном по схеме (рисунок 3) при интегрировании сигналов низких частот (в том числе сигналов постоянного тока) возникают ошибки интегрирования, связанные с зарядом емкости входными токами ОУ. В этом случае, даже при отсутствии входного сигнала конденсатор может медленно заряжаться (в пределе до напряжения питания). Это объясняется различием входных характеристик транзисторов входного дифференциального каскада. Чтобы уменьшить ошибки интегрирования, параллельно конденсатору подключают электронный ключ для периодического разряда емкости (Рис.4).

∞

*Uвх*

*Uвых*

*R1*

*С1*

*Ucбр*

Рисунок 4 – Интегратор с периодическим сбросом накопленного напряжения

При интегрировании сигналов переменного тока параллельно конденсатору С1 подключается резистор обратной связи *Rос*, как показано на рисунке 5, выполняющий следующие функции:

- ограничение коэффициента усиления на низких частотах;

- устранение ошибки интегрирования, связанной с зарядом емкости С1 входными токами ОУ;

- уменьшение влияния напряжения смещения ОУ.

Таким образом, на низких частотах (*f < fраб*) схема интегратора с резистором R2 работает как инвертирующий усилитель с постоянным коэффициентом усиления. На частотах *f > fраб* схема выполняет функции интегратора, при этом АЧХ имеет наклон -20 дБ/дек (коэффициент передачи уменьшается на 20 дБ при каждом десятикратном изменении частоты).

Резистор R3 выступает в качестве нагрузки.

∞

*Uвх*

*С1*

*Rос*

*R1*

*1мкФ*

*1к*

*10к*

*R3*

*2к*

Рисунок 5 – Интегратор переменного напряжения

***Дифференциатор*** – это устройство, выходное напряжение которого пропорционально производной входного сигнала (скорости изменения входного напряжения). Схема идеального дифференциатора приведена на рисунке 6.

Дифференциатор состоит из резистора R1, конденсатора С1 и ОУ (А1). Изменения входного напряжения вызывают протекание тока через конденсатор С1. За счет большого внутреннего коэффициента усиления ОУ и глубокой обратной связи, его инвертирующий вход, как отмечалось выше, оказывается виртуальной землей, поэтому выходное напряжение ОУ оказывается пропорциональным скорости изменения входного напряжения.

Таким образом, для идеального дифференциатора

*Iвх =IОС*. (4)

При этом

 (5)

Подставляя (5) в (4) и выражая *Uвых,* получим выражение для выходного напряжения во временной области.

*.* (6)

АЧХ идеального дифференциатора имеет положительный наклон +20 дБ/дек (коэффициент передачи растет на 20дБ при каждом десятикратном изменении частоты).

∞

*Uвх*

*Uд*

*Uвых*

*R1*

*С1*

*Iвх*

*IОС*

*а*

Рисунок 6 – Идеальный дифференциатор

При построении схем реальных дифференциаторов возникает ряд практических проблем:

1. Дополнительные фазовые сдвиги в цепи обратной связи могут привести к нарушению устойчивости работы дифференциатора. Таким образом, переходная характеристика будет иметь колебательный характер, что приводит к ошибкам дифференцирования.
2. На высоких частотах возрастает входной ток от источника сигнала, что может привести к нарушению его работы.
3. Коэффициент передачи дифференциатора возрастает с ростом частоты, что приводит к увеличению высокочастотных помех.

Для улучшения работы дифференциатора в схему вводят корректирующие элементы (R2). При этом в передаточной характеристике появляется дополнительный полюс, при котором ограничивается коэффициент передачи на высоких частотах. Схема скорректированного дифференциатора приведена на рисунке 7.

∞

*Uвх*

*С*1

*Rос*

*0,2мкФ*

*R*1

*1к*

*2к*

*20к*

*R*3

Рисунок 7 – Схема дифференциатора с коррекцией

С учетом элементов коррекции, реальный дифференциатор будет выполнять свои функции на частотах *f < fраб.* На более высоких частотах сопротивление емкости С1 будет много меньше R2 и схема будет работать как обычный инвертирующий усилитель.

Таким образом, резистор R2 выполняет следующие функции:

1. Ограничивает величину входного тока на высоких частотах.
2. Повышает устойчивость работы дифференциатора.
3. Ограничивает коэффициент передачи на высоких частотах, что приводит к уменьшению собственных помех дифференциатора.

Резистор R2 подключается с помощью ключа S1. Резистор R3 выступает в качестве нагрузки.

**3.4. Задание для исследования**

1. Исследовать свойства интегратора, изображенного на рисунке 5, считая операционный усилитель, R и С идеальными элементами. Пояснить влияние сопротивления обратной связи R2 на логарифмическую амплитудно-частотную характеристику схемы интегратора. Для этого рассмотреть следующие варианты:

- сопротивление R2 отключено (R2 = ∞);

- R2 = 100 кОм;

- R2 = 10 кОм.

***При выполнении отчета все три логарифмические (путем теоретического расчета или применения программ компьютерного моделирования) АЧХ изобразить для сравнения на одном графике. Отметить, как изменился коэффициент усиления на низких частотах, а также рабочая частота интегратора (минимальная частота, на которой интегратор сохраняет свои свойства). Объяснить результаты экспериментов.***

1. Пояснить влияние сопротивления обратной связи R2 на переходную характеристику схемы интегратора, Для этого рассмотреть следующие варианты:

- сопротивление R1 отключено (R1 = 0);

- R1 = 100 кОм;

- R2 = 10 кОм.

***При выполнении отчета все три переходные характеристики изобразить для сравнения на одном графике. Отметить, как изменилась форма выходного сигнала при подаче на вход двух периодов прямоугольного сигнала. Объяснить результаты экспериментов.***

1. Исследовать логарифмические амплитудно-частотные характеристики схемы дифференциатора (рис.7). Для этого рассмотреть следующие варианты:

- сопротивление R1 отключено (R1 = 0);

- сопротивление R1 включено (R1 = 1 кОм);

- сопротивление R1 включено (R1 = 10 кОм);

***При выполнении отчета все три логарифмические АЧХ изобразить для сравнения на одном графике. Отметить, как изменился коэффициент усиления на верхних частотах, а также рабочая частота дифференциатора (максимальная частота, на которой дифференциатор сохраняет свои свойства). Объяснить результаты экспериментов.***

1. Пояснить влияние сопротивления R1 на переходную характеристику схемы дифференциатора. Для этого рассмотреть следующие варианты:

- сопротивление R1 отключено (R1 = 0);

- сопротивление R1 включено (R1 = 10 кОм);

***При выполнении отчета переходные характеристики (качественно или с использованием программ компьютерного моделирования) изобразить на разных графиках. Отметить, как изменилась форма выходного сигнала. Объяснить результаты экспериментов.***

* 1. Содержание отчета

1. Принципиальные схемы интегратора и дифференциатора на ОУ.

2. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики и значения рабочих частот интегратора и дифференциатора.

3. Переходные характеристики интегратора и дифференциатора для различных вариантов схем.

3. Выводы по проделанной работе.

4. Ответы на контрольные вопросы.

3.7. Контрольные вопросы

1. Назначение интегратора (дифференциатора).

2. Привести передаточную функцию интегратора (дифференциатора).

3. Типовая частотная характеристика идеального интегратора (дифференциатора).

4. Как изменится частотная характеристика интегратора (дифференциатора) с учетом корректирующих элементов?

5. Почему инвертирующий вход ОУ с обратной связью называют «виртуальной землей»?

6. Вывести выражения для выходного напряжения идеального интегратора (дифференциатора) во временной области

7. Переходная характеристика при подаче на вход скачкообразного или периодического импульсного сигнала (для схем интегратора и дифференциатора).

8. Методы уменьшения погрешности интегрирования для схемы на реальных ОУ.

9. Способы повышения устойчивости работы дифференциатора на реальном ОУ.

10. Перечислить свойства идеального операционного усилителя.