

621.38  
Э45

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С. ТОРАЙГЫРОВА

# ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ



Павлодар

021.38  
Э45

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

Энергетический факультет

Кафедра «Электротехники и автоматизации»

# **ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания к практическим работам

Павлодар  
Кереку  
2016

УДК 621.38 (075)

~~ББК 32.81я7~~

Э 45

**Рекомендовано к изданию заседанием кафедры «Электротехники  
и автоматизации» энергетического факультета Павлодарского  
государственного университета  
им. С. Торайгырова**

**Рецензент**

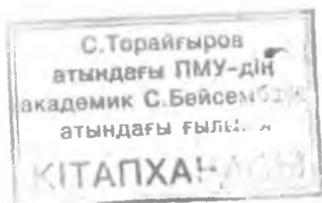
И. В. Захаров – доктор технических наук, профессор.

**Составители:** А. Д. Тастенов, А. А. Бектасова

Э45 Электроника и схемотехника аналоговых устройств :  
методические указания к практическим работам / сост. :  
А. Д. Тастенов, А. А. Бектасова. – Павлодар, 2016. – 31 с.

В методическом указании приводятся рекомендации по выполнению практических работ, приведены варианты заданий и их решения, содержат контрольные вопросы для проведения текущего контроля знаний студентов.

Методические указания рекомендуются для студентов технических специальности.



УДК 621.38 (075)

ББК 32.81я7

© Тастенов А. Д., Бектасова А. А., 2016

© ПГУ им. С. Торайгырова, 2016

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки  
ответственность несут авторы и составители

## Введение

Темой практических занятий «Операционные усилители» – раздел дисциплины «Электроника и схемотехника аналоговых устройств», изучающий основополагающую базу схемотехники современных электронных устройств уровня микросхем.

Тема «Операционные усилители» включает содержание нескольких разделов дисциплины «Электроника и схемотехника аналоговых устройств», в которых изучаются:

- основные параметры и типовые схемы включения операционных усилителей (ОУ);
- примеры применения ОУ;
- инвертирующий и неинвертирующий усилители постоянного тока (УПТ);
- дифференциальный УПТ;
- аналоговый сумматор и интегратор;
- усилители переменного напряжения и тока;
- детекторы, выпрямители и преобразователи на ОУ.

Изложенный ниже методический материал содержит 14 заданий с кратким изложением теоретической части и подробным изложением методических рекомендаций по выполнению этих заданий. Дополнительно Методические рекомендации содержат контрольные вопросы для проведения текущего контроля знаний студентов.

Рекомендуемый методический материал может быть использован при проведении 4 – 5 практических занятий в объеме  $8 \div 10$  академических часов.

## 1 Цели и задачи практических занятий

Цели практических занятий – закрепить теоретические знания, сформировать умения и навыки у студентов по расчету напряжения на выходе усилителя-сумматора, тока в схеме преобразователя напряжения в ток, коэффициента передачи инвертирующего усилителя, напряжения на выходе инвертирующего усилителя, относительной и максимальной погрешности.

Задачами практических занятий в соответствии с требованиями к компетенциям бакалавров являются:

- знания по основным параметрам и типовым схемам включения ОУ, применения ОУ, инвертирующим, неинвертирующим, дифференциальным УПТ на ОУ, аналоговым сумматорам и интеграторам;

- навыки применения методов расчета параметров ОУ и умений выбора ОУ, методов расчета относительной и максимальной погрешности;

- анализ достоинств и недостатков ОУ;

- коммуникация изучаемого раздела электроники и схемотехники аналоговых устройств с содержанием профильных дисциплин учебного плана специальности 5В071900 Радиотехника, электроника и телекоммуникации;

- формирование мнения о принципах действия, области практического применения и перспективы развития ОУ в радиотехнике и телекоммуникациях.

В процессе практических занятий реализуются следующие компетенции:

- готовность работать с информацией из различных источников;

- способность выполнять моделирование объектов и процессов по типовым методикам, в том числе с использованием стандартных пакетов прикладных программ;

- способность изучать специальную литературу и другую научно-техническую информацию, достижения отечественной и зарубежной науки и техники в области радиотехники.

В разработке Методических рекомендаций участвовал профессорско-преподавательский состав, участвующий в проведении все видов занятий по дисциплине «Электроника и схемотехника аналоговых устройств».

## 2 Тема «Усилительные каскады»

### 2.1 Усилительные схемы, выполненные на основе микросхем ОУ

При расчете усилителей на микросхемах ОУ целесообразно использовать известные при расчете линейных электрических цепей метод наложений (суперпозиции) и принцип «мнимой земли».

Принцип «мнимой земли» состоит в следующем. Положим, что ОУ идеален и его коэффициент усиления равен бесконечности. При этом, если ОУ охвачен отрицательной обратной связью и работает в линейном режиме, напряжение между его входами будет равно нулю. Действительно в схеме инвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 1) выполняются следующие соотношения:

$$-E_2 < U_{\text{вых}} < E_1,$$

где  $U_{\text{вых}}$  – напряжение на выходе ОУ, работающего в линейном режиме;

$E = E_1 = E_2$  – напряжение питания.

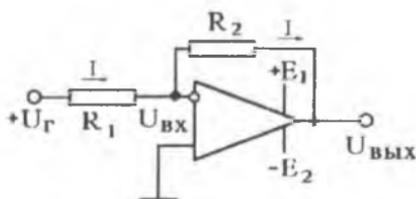


Рисунок 1 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ

По определению  $U_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{вх}}$ , где  $K$  – коэффициент усиления ОУ. Отсюда при  $K = \infty$  и т.к.  $U_{\text{вых}}$  конечно,  $U_{\text{вх}} = 0$ . Поскольку напряжение на инвертирующем входе равно нулю, в названии принципа используется слово «земля». Но «земля» эта «мнимая» (виртуальная), т.к. ток от источника  $U_{\text{Г}}$ , подключенного к инвертирующему входу ОУ через сопротивление  $R_1$ , в эту «мнимую землю» не течет, поскольку для идеального ОУ  $R_{\text{вх}} = \infty$ , а течет по резистивной цепи обратной связи. В итоге получаем:

$$I = \frac{U_{\Gamma}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_2} \quad \text{или} \quad U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\Gamma}$$

**Задача 1.** Рассчитать напряжение на выходе усилителя-сумматора, приведенного на рисунке 2, полагая, что ОУ идеален. Значения элементов схемы следующие:  $R_1 = R_2 = R_5 = 5 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = R_4 = 10 \text{ кОм}$ , а  $U_{\Gamma 1} = +1 \text{ В}$ ,  $U_{\Gamma 2} = -2 \text{ В}$ ,  $U_{\Gamma 3} = -3 \text{ В}$ .

**Решение:**

1) При расчете воспользуемся методом наложений. Полагаем, что  $U_{\Gamma 2} = U_{\Gamma 3} = 0$ . При этом получим схему, представленную на рисунке 3,а. Поскольку для идеального ОУ входные токи равны нулю, по сопротивлениям, находящимся между общей шиной и неинвертирующим входом, ток протекать не будет. При этом можно считать, что неинвертирующий вход заземлен. Исходя из принципа «мнимой земли», ток по сопротивлению  $R_2$ , присоединенному между инвертирующим входом и землей, не течет, т.к. в противном случае  $U_{\text{вх}} > 0$  и  $U_{\text{вых}} = K U_{\text{вх}} = -\infty$ , что невозможно. Отсюда получаем окончательно упрощенную схему для расчета (рисунок 3, б).

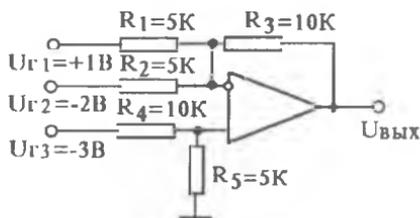


Рисунок 2 – Схема усилителя-сумматора

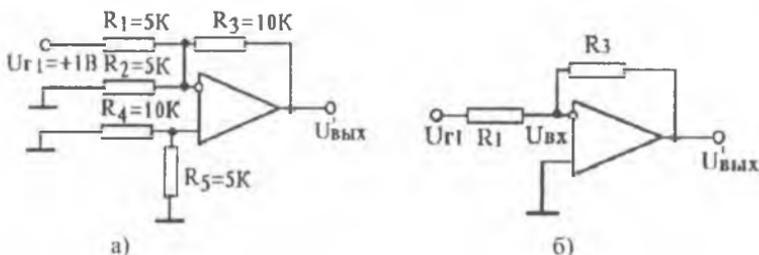


Рисунок 3 – Упрощенные схемы усилителя-сумматора для случая

$$U_{r2} = U_{r3} = 0.$$

Отсюда

$$U'_{\text{вых}} = -U_{r1} \frac{R_3}{R_1} = -2 \text{ В.}$$

2) Аналогично можно провести расчет для случая  $U_{r1} = U_{r3} = 0$ :

$$U''_{\text{вых}} = -U_{r2} \frac{R_3}{R_2} = 4 \text{ В.}$$

3) Для расчета выходного напряжения от источника  $U_{r3}$ , воспользуемся упрощенной схемой, приведенной на рисунке 4, а.

Определим напряжение  $U_0$ :

$$U_0 = U_{r3} \frac{R_5}{R_4 + R_5} = -1 \text{ В.}$$

Учитывая, что сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  включены параллельно, получаем эквивалентную схему для расчета представленную на рисунок 4, б. В данной схеме учтено, что  $R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ .

На основании принципа «мнимой земли» напряжение на инвертирующем входе равно напряжению на неинвертирующем входе, т.к. напряжение между входами ОУ равно нулю. Отсюда можно поучить формулу для тока, протекающего по цепи обратной связи:

$$I = \frac{U'''_{\text{вых}}}{R_3 + R_{12}} = \frac{U_0}{R_{12}} \quad \text{или} \quad U'''_{\text{вых}} = U_0 \left( 1 + \frac{R_3}{R_{12}} \right) = 5U_0 = -5 \text{ В.}$$

4. Суммируя все полученные выходные напряжения, получаем результирующее выходное напряжение на выходе усилителя от воздействия всех источников напряжения:

$$U_{r2} = U'_{\text{вых}} + U''_{\text{вых}} + U'''_{\text{вых}} = -2 + 4 - 5 = -3 \text{ В.}$$

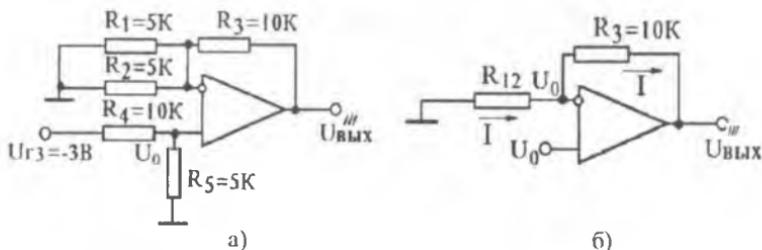


Рисунок 4 – Упрощенные схемы для расчета усилителя-сумматора для случая  $U_{i1} = U_{i2} = 0$

**Задача 2.** Рассчитать ток в сопротивлении  $R_2$  в схеме преобразователя напряжения в ток, приведенной на рисунок 5. Определить условия, при которых ток не зависит от величины сопротивления  $R_2$ . При расчете учесть, что  $R_1 = 1$  кОм,  $R_2 = 2$  кОм,  $U_r = +1$  В.

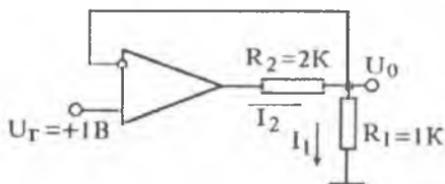


Рисунок 5 – Схема преобразователя напряжения в ток, выполненная на ОУ

**Решение.**

1) Из принципа «мнимой земли» разность потенциалов между входами ОУ равна нулю. Отсюда  $U_0 = U_r$ .

2) По сопротивлению  $R_1$  протекает ток  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{U_0}{R_1} = \frac{U_r}{R_1} = 1 \text{ мА.}$$

3) Поскольку ОУ идеален и его входные токи равны нулю, ток  $I_1$  протекает по сопротивлению  $R_2$  и при небольших значениях  $R_2$  от него не зависит, т.е.  $I_2 = I_1 = 1$  мА.

4) Для определения ограничений тока  $I_2$  найдем значения напряжения на выходе ОУ:  $U_{\text{вых}} = I_1(R_1 + R_2)$ .

5) Положим, что напряжение питания ОУ равно +15 В и -15 В, а также, что максимальное выходное напряжение ОУ равно  $\pm 12$  В. Отсюда получаем максимальное значение сопротивления  $R_2$ , при котором ток  $I_2$  не зависит от  $R_2$ :

$$R_{2\text{макс}} = \frac{U_{\text{вых,макс}} - IR_1}{I} \approx 11 \text{ кОм.}$$

Таким образом, ток в сопротивлении  $R_2$  не зависит от его величины, пока выполняется следующее условие  $0 < R_2 < 11 \text{ кОм}$ .

**Задача 3.** Рассчитать коэффициент передачи инвертирующего усилителя, полагая, что ОУ идеален (схема приведена на рисунке 6).

**Решение.**

1) ОУ охвачен отрицательной обратной связью, поэтому можно использовать принцип «мнимой земли».

Отсюда

$$I_1 = \frac{U_{\Gamma}}{R_1}, \quad I_1 = I_4, \quad U_0 = -I_1 R_4 = -U_{\Gamma} \frac{R_4}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_0}{R_2} = -U_{\Gamma} \frac{R_4}{R_2 R_1}.$$

2) Ток  $I_3$  является суммой токов  $I_1$  и  $I_2$  и равен:

$$I_1 = \frac{U_{\Gamma}}{R_1} + U_{\Gamma} \frac{R_4}{R_2 R_1} = \frac{U_{\Gamma}}{R_1} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right).$$

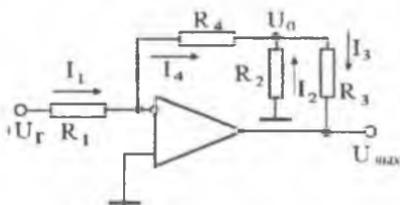


Рисунок 6 – Схема инвертирующего усилителя

3) Учитывая это, можно выразить  $U_{\text{вых}}$ :

$$U_{\text{вых}} = -U_0 - I_3 R_3 = -\frac{U_{\Gamma}}{R_1} (R_4 + R_3) \left( 1 + \frac{R_4 R_3}{(R_4 + R_3) R_2} \right)$$

4) Отсюда коэффициент передачи инвертирующего усилителя равен:

$$K = -\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\Gamma}} = -\frac{(R_4 + R_3)}{R_1} \left( 1 + \frac{R_4 R_3}{(R_4 + R_3) R_2} \right)$$

Замечание: Данная схема используется в случае, если сопротивление  $R_2$  в простейшей схеме усилителя-инвертора на ОУ получается чрезмерно большой величины, что может привести к большим погрешностям из-за входных токов ОУ, шума резистора  $R_2$  и влияния шумовых токов ОУ.

**Задача 4.** Найти коэффициент усиления  $K(j\omega)$  схемы, приведённой на рисунке 7, при подаче на вход синусоидального напряжения.

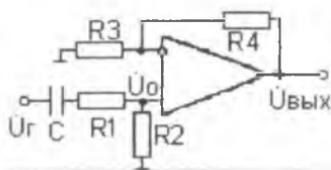


Рисунок 7 – Схема неинвертирующего усилителя переменного тока

**Решение.**

1) Определим передачу входного напряжения на неинвертирующий вход ОУ. Поскольку ОУ идеален, в данном случае требуется рассчитать коэффициент передачи пассивной цепи, состоящей из резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсатора  $C$ . Используя материал раздела «Пассивные RC-цепи», получаем:

$$\dot{U}_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_{\Gamma} = \frac{j\omega C R_2}{1 + j\omega C (R_1 + R_2)} \dot{U}_{\Gamma}$$

Учитывая, что напряжение  $U_0$  усиливается неинвертирующим усилителем в  $1 + R_4/R_3$  раз, получаем:

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{г}}} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 + R_2)}$$

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод наложений?
2. Для каких электрических цепей справедлив этот метод?
3. Чем ограничено напряжение на выходе ОУ?
4. Что такое идеальный ОУ?
5. В чем заключается принцип «мнимой земли»?
6. Какие ограничения использования принципа «мнимой земли» Вам известны?
7. Какие усилительные каскады используют на входе интегральных ОУ?
8. Какие усилительные каскады используют на выходе ОУ?
9. Почему для питания ОУ используют напряжение двух полярностей?
10. Какое напряжение будет на выходе ОУ без обратной связи, если на инвертирующий вход подать напряжение  $+1$  В, а неинвертирующий вход заземлить?
11. Какое напряжение будет на выходе ОУ без обратной связи, если на инвертирующий вход подать напряжение  $-1$  В, а на неинвертирующий вход подать напряжение  $-2$  В?
12. В чем отличие реального ОУ от идеального?
13. Какой вид будет иметь АЧХ усилителя, выполненного на идеальном ОУ?
14. Какое напряжение будет на выходе ОУ, если включить питание, а оба входа ОУ заземлить?
15. Какими должны быть входные и выходные сопротивления у идеального ОУ?
16. Что такое напряжение смещения?

### 2.2 Погрешности в усилителях на микросхемах ОУ

Реальные микросхемы операционных усилителей характеризуются большим количеством параметров. Часть этих параметров можно использовать для определения аддитивных погрешностей, т.е. таких погрешностей, которые не связаны с наличием входного сигнала, а часть – для определения мультипликативных погрешностей, т.е. таких, которые проявляются лишь при наличии входного сигнала. К числу параметров, используемых для расчета аддитивных погрешностей, относятся:

- напряжение смещения  $U_{см}$ ;
- входные токи ОУ  $I_{вх1}$ ,  $I_{вх2}$  и их разность  $\Delta I_{вх} = (I_{вх1} - I_{вх2})$ ;
- напряжение входных шумов  $E_{шОУ}$ ;
- шумовые токи  $I_{шОУ1}$  и  $I_{шОУ2}$  и т.д.

К числу параметров, используемых для расчета мультипликативных погрешностей, относятся:

- коэффициент усиления  $K$ ;
- входные и выходные сопротивления  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ ;
- частота единичного усиления  $f_1$ ;
- скорость нарастания ОУ  $\rho$  и т.д.

Для расчета аддитивных погрешностей используется метод, при котором ОУ считается идеальным за исключением того параметра, погрешность от которого мы хотим учесть при расчетах. При этом можно использовать принцип «мнимой земли». При расчете мультипликативных погрешностей целесообразно учитывать конечное значение одного параметра, полагая, что другие параметры такие, как у идеального ОУ, исключая конечное значение коэффициента усиления. В этом случае принцип «мнимой земли» использовать нельзя.

**Задача 5.** Рассчитать максимальное напряжение на выходе инвертирующего усилителя, выполненного на ОУ при  $U_r = 0$ , если известно, что  $U_{см} = 5$  мВ,  $I_{вх1} = I_{вх2} = 0,1$  мкА. Найти максимальную относительную погрешность при  $U_r = 1$  В.

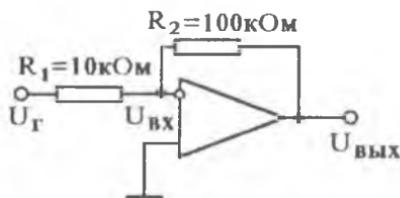


Рисунок 8 – Усилитель-инвертор на ОУ

**Решение.**

1) Используя метод наложений, найдем последовательно выходное напряжение  $U_{вых}$ , вызванное  $U_{см}$  и входными токами. Схема для расчета  $U'_{вых}$ , обусловленного влиянием  $U_{см}$ , приведена на рисунке 9.

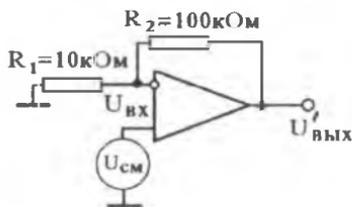


Рисунок 9 – Схема для расчета погрешности от  $U_{см}$  усилителя

Данную схему можно рассматривать как неинвертирующий усилитель. Отсюда

$$U'_{вых} = U_{см} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \pm 55 \text{ мВ.}$$

Знаки  $\pm$  означают, что напряжение  $U_{см}$  обусловленное неидентичностью транзисторов, использованных на входе ОУ, неопределенно по знаку, т.е. для получения напряжения на выходе равного нулю, ко входу ОУ, согласно определения  $U_{см}$ , нужно приложить либо положительное, либо отрицательное напряжение.

2) Схема для расчета  $U''_{вых}$ , обусловленного влиянием  $I_{вх1}$ , приведена на рисунок 10 (ток  $I_{вх2}$  не вызывает погрешности, т.к. неинвертирующий вход ОУ закорочен).

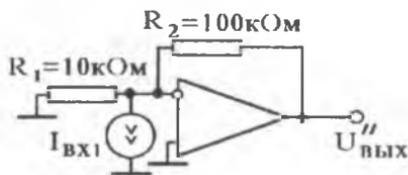


Рисунок 10 – Схема для расчета погрешности от  $I_{вх1}$

Полагая, что ОУ идеален, используем принцип «мнимой земли». Отсюда весь входной ток ОУ будет протекать лишь по сопротивлению  $R_2$ . Следовательно:

$$U''_{вых} = I_{вх1} R_2 = 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 = 10 \text{ мВ.}$$

В полученном выражении учтено, что ток в ОУ, входной каскад которого выполнен на биполярных транзисторах, втекает в него. Следовательно, напряжение  $U''_{\text{вых}}$  положительное.

3) Зная  $U'_{\text{вых}}$  и  $U''_{\text{вых}}$ , можно определить максимальное напряжение на выходе:

$$U_{\text{вых.макс}} = |U'_{\text{вых}}| + |U''_{\text{вых}}| = 65 \text{ мВ.}$$

4) Максимальная относительная погрешность при  $U_r = 1 \text{ В}$  будет составлять

$$\delta = \frac{U_{\text{вых.макс}}}{K_{\text{OC}} U_r} = 0,65 \%,$$

где  $K_{\text{OC}}$  – коэффициент усиления с обратной связью.

**Задача 6.** Рассчитать максимальное напряжение на выходе схемы, приведенной на рисунке 11, при условиях  $U_r = 0$ ,  $U_{\text{см}} = 0$ , входные токи ОУ равны 0,1 мкА, а их разность равна 0,2 мкА.

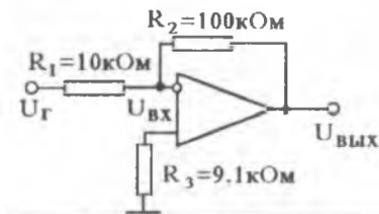


Рисунок 11 – Схема усилителя-инвертора на ОУ

**Решение.**

1) Убедимся в том, что включение сопротивления  $R_3 = 9,1 \text{ кОм}$  между инвертирующим входом и землей приводит к исчезновению погрешности, обусловленной одинаковыми входными токами.

Как было рассчитано в задаче 5, напряжение на выходе  $U'_{\text{вых}}$ , обусловленное  $I_{\text{вх}}$  равно 10 мВ. Схема для расчета напряжения на выходе ОУ, обусловленного  $I_{\text{вх}2}$ , приведена на рисунке 12.

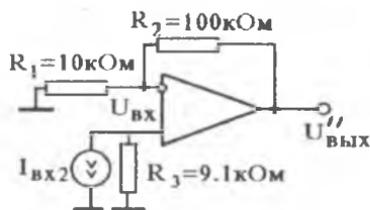


Рисунок 12 – Схема для расчета напряжения  $U''_{\text{вых}}$ , вызываемого током  $I_{\text{вх}2}$

Для определения  $U''_{\text{вых}}$  найдем напряжение  $U_{\text{вх}}$ :  $U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}2} R_3 = -0,182$  мВ. Далее расчет можно выполнить аналогично расчету напряжения на выходе неинвертирующего усилителя:

$$U''_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = -10 \text{ мВ.}$$

Отсюда  $U_{\text{вых}} = U'_{\text{вых}} + U''_{\text{вых}} \approx 0$ .

Таким образом, включение в схему инвертирующего усилителя на ОУ сопротивления  $R_3$  компенсирует действие входных токов ОУ.

2) Для определения влияния разности входных токов можно использовать либо схему на рисунке 12, либо, что существенно проще, схему, приведенную на рисунке 10, полагая, что входной ток равен  $\Delta I_{\text{вх}}$ . Из схемы на рисунке 10 получаем  $U_{\text{вых}} = \Delta I_{\text{вх}} R_2 = \pm 2$  мВ. (Знаки  $\pm$  означают, что из-за неидентичности транзисторов мы не можем знать какой из входных токов больше).

Таким образом, включение на неинвертирующий вход компенсирующего сопротивления  $R_3 = R_1 \parallel R_2$  уменьшает погрешность, обусловленную входными токами ОУ. При этом погрешность будет вызываться лишь разностью входных токов.

**Задача 7.** Рассчитать спектральное напряжение шума на выходе схемы инвертирующего усилителя на ОУ при условии, что спектральное напряжение шума равно  $25 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , а спектральный шумовой ток ОУ равен  $0,25 \text{ нА}/\sqrt{\text{Гц}}$ . (Приведенные цифры соответствуют значениям шумовых параметров стандартных ОУ.)

**Решение.**

1) Источниками шумов в схеме являются шумовые токи и напряжения ОУ, а так же шумы сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рисунок 13). (В ряде случаев шумами резисторов не обоснованно пренебрегают, что, как будет показано ниже, делать нельзя).

Выходное напряжение шума от указанных источников можно определить по формуле:

$$U_{\text{вых.ш}} = \sqrt{(U_{\text{вых.Е}})^2 + (U_{\text{вых.И}})^2 + (U_{\text{вых.}R_1})^2 + (U_{\text{вых.}R_2})^2},$$

где  $U_{\text{вых.Е}}$  – выходное напряжение, обусловленное шумовым напряжением ОУ  $E_{\text{ш.ОУ}}$ ;

$U_{\text{вых.И}}$  – выходное напряжение, обусловленное шумовым током ОУ  $I_{\text{ш.ОУ}}$  (шумовой ток неинвертирующего входа ОУ можно не учитывать, так как этот вход ОУ заземлен);

$U_{\text{вых.}R_1}$  и  $U_{\text{вых.}R_2}$  – выходные напряжения, обусловленные шумами резисторов  $R_1$  и  $R_2$  соответственно.

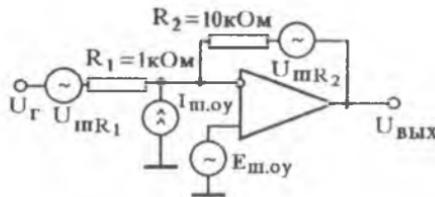


Рисунок 13 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ с источниками шумов

2) Спектральное напряжение шума, вызываемое  $E_{\text{ш.ОУ}}$  и  $I_{\text{ш.ОУ}}$  можно рассчитать по формулам, полученным для  $U_{\text{см}}$  и  $I_{\text{вх}}$  в задаче 1. Для вычислений используем схемы, представленные на рисунках 9 и 10:

$$U_{\text{вых.Е}} = E_{\text{ш.ОУ}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 275 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$$

$$U_{\text{вых.И}} = I_{\text{ш.ОУ}} R_2 = 2,5 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$$

3) Спектральное напряжение шума одного сопротивления  $R$  можно определить по формуле:

$$U_{ш.Р} = 0,13 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}} \times \sqrt{R},$$

где R измеряется в омах. Отсюда

$$U_{ш.Р_1} = 4,1 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}} \text{ и } U_{ш.Р_2} = 13 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}}.$$

4) Определим  $U_{вых.Р_1}$  и  $U_{вых.Р}$ . Действие напряжения  $U_{ш.Р_1}$  эквивалентно действию напряжения входного генератора. Отсюда:

$$U_{вых.Р_1} = U_{ш.Р_1} \frac{R_2}{R_1} = 41 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}}.$$

Действие напряжения  $U_{ш.Р_2}$  можно найти из принципа «мнимой земли». Поскольку должно выполняться условие  $U_{вх} = 0$ , то ток от  $U_{ш.Р_2}$  по цепи обратной связи протекать не должен. Отсюда:

$$U_{вых.Р_2} = U_{ш.Р_2} = 13 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}}$$

5) Таким образом,

$$U_{вых.ш} = \sqrt{(275)^2 + (2,5)^2 + (41)^2 + (13)^2} \approx 278 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}}$$

6) Приведенное решение позволяет сделать следующие выводы:

а) основное влияние на шумы усилителя, выполненного на стандартных микросхемах ОУ, оказывает  $E_{ш.ОУ}$ ;

б) влияние шумов резисторов получается больше, чем влияние шумовых токов ОУ;

в) при использовании маломушмящих ОУ ( $E_{ш.ОУ} = 1 \div 3 \text{ нВ} / \sqrt{\Gamma_{ц}}$ ) влиянием шумов резисторов пренебрегать нельзя.

**Задача 8.** Определить относительную погрешность коэффициента усиления инвертирующего усилителя на ОУ, обусловленную влиянием входного сопротивления ОУ, при условии  $K = 10^5$ ,  $R_{вх} = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_1 = 1 \text{ кОм}$  (рисунок 14):



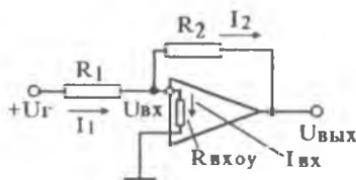


Рисунок 14 – Схема инвертирующего усилителя с учетом  $R_{вх}$

**Решение.**

1) Прежде всего следует заметить, что при  $K = \infty$  сопротивление  $R_{вх}$ . ОУ не влияет на коэффициент передачи, т.к. при  $K = \infty U_0 = 0$ . Следовательно, для определения влияния  $R_{вх}$  на коэффициент усиления необходимо одновременно учесть  $R_{вх}$  ОУ и  $K$ .

2) Выразим токи, протекающие в схеме, через  $U_{\Gamma}$  и  $U_{вх}$ :

$$I_1 = \frac{U_{\Gamma} - U_{вх}}{R_2}, \quad I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_{вх}}, \quad I_2 = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{R_2} = \frac{U_{вх} - KU_{вх}}{R_2}$$

Из условия  $I_1 = I_{вх} + I_2$  получаем

$$\frac{U_{\Gamma} - U_{вх}}{R_1} = \frac{U_{вх}}{R_{вх}} + \frac{U_{вх} - KU_{вх}}{R_2}$$

Отсюда

$$U_{вх} = \frac{R_2 U_{\Gamma}}{R_2 + (1 + K)R_1 + R_1 R_2 R_{вх}^{-1}}$$

Поскольку  $U_{вых} = -KU_{вх}$  получаем

$$K_{ос} = \frac{-KR_2}{R_2 + R_1(1 + K) + R_1 R_2 R_{вх}^{-1}}$$

3) Очевидно, что последнее слагаемое в знаменателе приведенной формулы определяет влияние входного сопротивления ОУ. Таким образом, относительную погрешность от влияния  $R_{вх}$  можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{R_1 R_2}{R_{вх}[R_2 + R_1(1 + K)]} 100 \% \approx \frac{R_2}{R_{вх} K} 100 \% \approx 0,001 \%$$

4) Учесть влияние  $R_{вх}$  на коэффициент усиления схемы с обратной связью можно с помощью приближенных расчетов. Первоначально положим, что  $K = \infty$ . Отсюда

$$|U_{вых}| = \frac{R_2}{R_1 U_{Г}} = 1000 U_{Г}, \quad I_1 = \frac{U_{Г}}{R_1} = 10^{-3} U_{Г} \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Затем положим, что  $K = 10^5$ . Отсюда

$$U_0 = \frac{U_{вых}}{K} = 0,01 U_{Г}.$$

Напряжение  $U_{вх}$  вызывает ток через сопротивление  $R_{вх}$ :

$$I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_{вх}} = 10^{-9} U_{Г} \frac{1}{\text{Ом}}.$$

Этот входной ток ОУ составляет часть от тока  $I_1$ , следовательно:

$$\delta = \frac{I_{вх}}{I_1} 100 \% = 0,001 \%.$$

Нетрудно установить, что уменьшение тока  $I_2$  на величину  $I_{вх}$  вызывает такое же относительное уменьшение выходного напряжения, т.е. искомое  $\delta$  равно 0,001 %.

**Задача 9.** Рассчитать максимальную погрешность, возникающую из-за изменения коэффициента усиления неинвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 15). При этом учесть, что  $K = 10^5$  ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) и в диапазоне температур от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ\text{C}$  он изменяется на  $\pm 40 \%$ , т.е.  $\delta_K = \pm 40 \%$ .

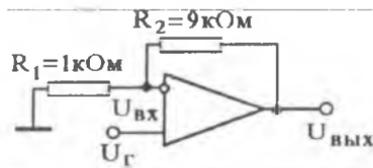


Рисунок 15 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

**Решение:**

1) Известно, что коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью равен  $K_{OC} = K/(1 + \beta K)$ , где  $1 + \beta K = F$  – фактор обратной связи.

В данном случае усилитель охвачен последовательной отрицательной обратной связью по напряжению. При этом  $\beta = R_1/(R_1 + R_2)$  и  $K_{OC} = 1 + (R_2/R_1) = 10$ , а фактор обратной связи  $F = 1 + \beta K$  равняется

$$F = \frac{K}{K_{OC}} = \frac{10^5}{10} = 10^4.$$

2) Известно также, что нестабильность, обусловленная нестабильностью коэффициента усиления усилителя с обратной связью, уменьшается в фактор обратной связи раз.

Отсюда

$$\delta K_{OC} = \frac{\Delta K_{OC}}{K_{OC}} = \frac{\delta K}{F} = \frac{40\%}{10^4} = 0,04\%.$$

Таким образом, введение отрицательной обратной связи увеличивает стабильность усилителя в  $10^4$  раз. (Без учёта нестабильности резисторов обратной связи.)

**Задача 10.** Рассчитать верхнюю граничную частоту и погрешность усиления на частоте 20 кГц, обусловленную частотной зависимостью коэффициента усиления, усилителя, выполненного по схеме на рисунке 15 на микросхеме ОУ с внутренней цепью коррекции, учитывая, что  $K = 10^5$ , а частота единичного усиления  $f_1$  равна 1 МГц.

**Решение.**

1. Для ОУ с внутренней цепью коррекции можно считать, что

$$K(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega T}, \quad |K(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

где  $T$  – постоянная времени, обусловленная внутренней цепью коррекции.

При этом верхняя граничная частота  $f_{BGR}$  без обратной связи равна:  $f_{BGR} = 1/2\pi T$ . С учётом этого модуль коэффициента усиления можно выразить следующей формулой

$$|K(j\Omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + \Omega^2}}$$

где  $\Omega = f/f_{ВГР}$  – нормированная частота без обратной связи.

При частоте, близкой к частоте единичного усиления,  $|K(j\Omega)| = 1$  и можно считать, что  $\Omega \gg 1$ , т.е.  $|K(j\Omega)| = K/\Omega$

При  $f_1 = 1$  МГц получаем  $K/\Omega = 1$  или  $K \cdot f_{ВГР}/f_1 = 1$ .

Таким образом верхняя граничная частота ОУ без обратной связи равна  $f_{ВГР} = 10^6/10^5$  Гц = 10 Гц.

2) Учитывая увеличение верхней граничной частоты при охвате усилителя отрицательной обратной связью, получаем:  $f_{ВГРОС} = F \cdot f_{ВГР}$ , где  $F = K/K_{ОС} = 10^4$ .

Таким образом верхняя граничная частота усилителя с обратной связью равна  $f_{ВГРОС} = 10 \cdot 10^4$  Гц = 100 кГц.

3) С учётом обратной связи модуль  $K_{ОС}(j\omega)$  можно представить следующей формулой

$$|K(j\Omega_{ОС})| = \frac{K_{ОС}}{\sqrt{1 + \Omega_{ОС}^2}}$$

где  $\Omega_{ОС} = f/f_{ВГРОС}$  – нормированная частота усиления с обратной связью.

Поскольку  $f = 20$  кГц, а  $f_{ВГРОС} = 100$  кГц получаем

$$|K(j\Omega_{ОС})| = \frac{K_{ОС}}{\sqrt{1 + 0,04}} \approx 0,98K_{ОС}$$

Таким образом погрешность коэффициента усиления на частоте 20 кГц составляет  $\delta_K = 2\%$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое аддитивные и мультипликативные погрешности?
2. Какие параметры ОУ позволяют определить аддитивные погрешности?
3. Какие параметры ОУ позволяют определить мультипликативные погрешности?

4. Можно ли использовать принцип «мнимой земли» при определении аддитивных погрешностей?
5. Можно ли использовать принцип «мнимой земли» при определении мультипликативных погрешностей?
6. Какой метод можно использовать при определении погрешностей в схемах на ОУ, обусловленных разными причинами?
7. Из каких соображений необходимо определять сопротивления цепи обратной связи усилителя, чтобы уменьшить величину погрешностей, обусловленных входными токами ОУ?
8. С какой целью в инвертирующем усилителе между неинвертирующим входом и землей включается резистор?
9. Какими причинами обусловлены шумы на выходе усилителей на ОУ?
10. Какой источник шумов является доминирующим при использовании микросхем стандартных ОУ?
11. Можно ли пренебречь шумами резисторов обратной связи в схемах, выполненных на ОУ? В каких случаях?
12. Могут ли шумы от разных источников шума компенсировать друг друга?
13. Как следует определять результирующее напряжение шума от разных источников шума?
14. Как влияет отрицательная обратная связь на нестабильность коэффициента усиления?
15. Как влияет параллельная и последовательная отрицательные связи на входное сопротивление усилителя?
16. Как влияет отрицательная обратная связь по напряжению на выходное сопротивление?
17. Как выбрать тип микро схемы ОУ, чтобы его входное и выходное сопротивления мало влияли на коэффициент усиления усилителя на её основе?
18. Почему в схемах усилителей на ОУ не используют положительную обратную связь?
19. Можно ли ОУ использовать без обратной связи?
20. Как отрицательная обратная связь влияет на верхнюю и нижнюю граничные частоты усилителя?
21. Зачем в микросхемах ОУ используют внутреннюю цепь коррекции?
22. Как рассчитать верхнюю граничную частоту усилителя, выполненного на микросхеме ОУ с внутренней цепью коррекции?

23. Как рассчитать погрешность коэффициента усиления усилителя, обусловленную зависимостью коэффициента усиления от частоты?

### 2.3 Импульсные устройства на основе микросхем ОУ

В импульсных устройствах операционные усилители часто выполняют функции переключателей цепей с одного напряжения на другое. Простейшим таким устройством является компаратор на ОУ, который сравнивает два напряжения и в результате этого сравнения формирует на выходе положительное или отрицательное напряжение (рисунок 16). Для этого устройства справедливы следующие соотношения:  $U_1 > U_2$ :  $U_{\text{вых}} \cong U_{\text{вых мин}}$ ,  $U_2 > U_1$ :  $U_{\text{вых}} \cong U_{\text{вых макс}}$ , где  $U_{\text{вых мин}}$  и  $U_{\text{вых макс}}$  по модулю на два-три вольта меньше напряжений  $-E_2$  и  $+E_1$  соответственно. При выполнении условия  $U_1 \approx U_2$  компаратор находится в режиме перехода из одного состояния в другое.

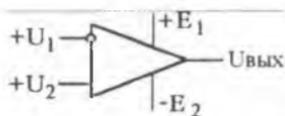


Рисунок 16 – Схема простейшего компаратора на ОУ

Для обеспечения быстрого переключения и создания условий устойчивых и временно устойчивых состояний в импульсных устройствах на компараторах используют положительную обратную связь.

На основе компараторов строятся и другие импульсные устройства. Примерами таких устройств являются мультивибратор и одновибратор. Мультивибратор генерирует постоянно повторяющиеся импульсы прямоугольной формы. Одновибратор при подаче на вход напряжения больше порогового генерирует однократный импульс, длительность которого определяется свойствами самого одновибратора. На основе ОУ могут быть созданы и генераторы линейно изменяющегося напряжения.

**Задача 11.** Определить максимальную разность входных напряжений  $\Delta U$ , при которой простейший компаратор на ОУ всегда переходит из одного состояния к другому. Определить время перехода из одного состояния в другое  $\Delta t$ , если выполняется условие  $|U_1 - U_2| \gg \Delta U$ .

Известны параметры ОУ:  $K = 10^5$ ,  $U_{см} = 5$  мВ,  $U_{вых\ max} = |U_{вых\ min}| = 12$  В, скорость нарастания напряжения на выходе ОУ  $\rho$  равна 10 В/мкс.

**Решение.**

1) Напряжение  $\Delta U$  определяется двумя причинами:

Действием напряжения  $U_{см} - \Delta U_1$ ;

конечным коэффициентом усиления ОУ –  $\Delta U_2$ .

Поскольку знак  $U_{см}$  может быть, как положительным, так и отрицательным, получаем  $\Delta U_1 = 2U_{см} = 10$  мВ. Для напряжения  $\Delta U_2$  справедливо следующее соотношение  $\Delta U_{вых} = K\Delta U$

2) Определим  $\Delta U_{вых} = U_{вых\ max} - U_{вых\ min} = 24$  В. Отсюда  $\Delta U_2 = 0,24$  мВ. Таким образом,  $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 10,24$  мВ. Полученный результат дает основание сделать вывод о том, что переходная область в основном определяется напряжением смещения и его нестабильностью.

3) При подаче на вход ОУ разности напряжений, удовлетворяющих условию  $|U_1 - U_2| \gg \Delta U$ , переходной процесс будет определяться перезарядом корректирующей емкости ОУ от внутренних источников тока. Этот процесс в ОУ характеризуется скоростью нарастания выходного напряжения  $\rho$ .

Отсюда  $\Delta t = \Delta U_{вых} / \rho = 2,4$  мкс.

**Задача 12.** Определить пороги срабатывания триггера Шмидта, выполненного по схеме, приведенной на рисунке 17. Считать операционный усилитель идеальным, т.е.  $U_{см} = 0$ , а  $U_{вых\ max} = |U_{вых\ min}| = 12$  В. Нарисовать зависимость  $U_{вых} = f(U_r)$ .

В схеме использована положительная обратная связь, обеспечивающая два устойчивых состояния триггера, при которых  $U_{вых} = U_{вых\ max}$  и  $U_{вых} = U_{вых\ min}$ .

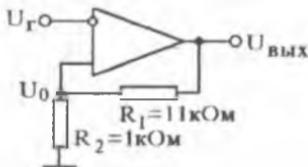


Рисунок 17 – Схема триггера Шмидта на ОУ.

**Решение:**

1. Пусть напряжение на выходе  $U_{вых\ max} = 12$  В. Отсюда  $U_{п1} = \gamma U_{вых\ max}$ , где  $\gamma = R_2 / (R_1 + R_2)$ . Следовательно,  $U_{п1} = 1$  В.

2. При  $U_r \geq +1$  В происходит переброс триггера в состояние, при котором  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых мин}} = -12$  В. При этом  $U_{\text{пз}} = \gamma U_{\text{вых мин}} = -1$  В.

При  $U_r \leq -1$  В происходит переброс триггера в состояние, при котором  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых макс}} = +12$  В.

Таким образом  $U_{\text{п1}}$  и  $U_{\text{п2}}$  – пороги срабатывания триггера Шмидта на ОУ, а зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_r)$  имеет гистерезисный характер и её легко нарисовать, зная  $U_{\text{п1}}$ ,  $U_{\text{п2}}$ ,  $U_{\text{вых макс}}$ ,  $U_{\text{вых мин}}$ .

**Задача 13.** Рассчитать частоту мультивибратора на ОУ, схема которого приведена на рисунке 18, полагая, что напряжения питания равны  $+18$  В и  $-18$  В, а  $U_{\text{вых макс}} = |U_{\text{вых мин}}| = 15$  В.

**Решение.**

1) Операционный усилитель с положительной обратной связью, выполненной на сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$ , представляет собой триггер Шмидта. Как было определено в предыдущей задаче, его пороги срабатывания равны:  $U_{\text{п1}} = \gamma U_{\text{вых макс}}$ ,  $U_{\text{п2}} = \gamma U_{\text{вых мин}}$ , где  $\gamma = R_2 / (R_1 + R_2)$ . После вычисления получаем  $\gamma = 0,1$  и  $U_{\text{п1}} = 1,5$  В,  $U_{\text{п2}} = -1,5$  В.

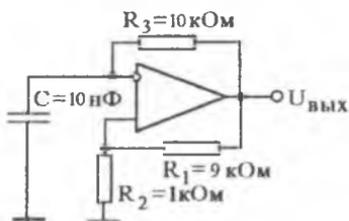


Рисунок 18 – Схема мультивибратора на ОУ.

2) Конденсатор  $C$  заряжается от источников напряжения  $U_{\text{вых макс}}$  и  $U_{\text{вых мин}}$ . При этом переброс мультивибратора в другое состояние происходит при достижении напряжения на конденсаторе пороговых значений. Пусть конденсатор  $C$  заряжается от уровня напряжения  $-1,5$  В. При этом напряжение на нем стремится к уровню  $+15$  В. При достижении порога  $+1,5$  В напряжение на выходе ОУ устанавливается  $-15$  В, а напряжение на неинвертирующем входе  $-1,5$  В. Во время второго полупериода напряжение на конденсаторе  $C$  изменяется от  $+1,5$  В до  $-1,5$  В. Эюра напряжения на конденсаторе в первый полупериод приведена на рисунке 19.

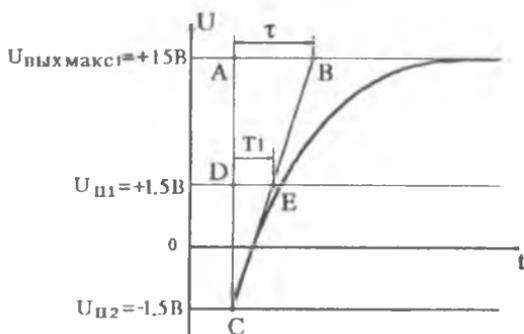


Рисунок 19 – Эпюра изменения напряжения на конденсаторе С в первый полупериод

3) Полагая, что заряд конденсатора происходит по линейному закону, полупериод  $T_1$  можно определить из подобия треугольников ABC и DCE (рисунок 19)

$$\frac{DE}{AB} = \frac{DC}{AC}$$

или

$$\frac{T_1}{\tau} = \frac{U_{П1} - U_{П2}}{U_{\text{вых.макс1}} - U_{П2}}$$

$$T_1 = \frac{3}{16,5} \tau = \frac{\tau}{5,5}$$

4) Заряд конденсатора во второй полупериод аналогичен заряду конденсатора в первый. Следовательно, полный период  $T$  равен

$$T = 2T_1 = \frac{2\tau}{5,5}$$

5) Частота сигнала на выходе мультивибратора получается равной

$$f = \frac{1}{T} = \frac{5,5}{2\tau}$$

где  $\tau = RC$ . Отсюда  $f = 27.5$  кГц.

б) Если учесть нелинейный характер изменения напряжения на конденсаторе, получим

$$T = 2\tau \ln \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma}$$

и, следовательно,  $f = 24.9$  кГц.

**Задача 14.** Рассчитать максимальную амплитуду сигнала  $U_{\max}$ , получаемого на выходе генератора линейно-изменяющегося напряжения (рисунок 20). Максимальные по модулю напряжения на выходах ОУ равны  $U_{\text{вых.max}} = |U_{\text{вых.min}}| = 15$  В.

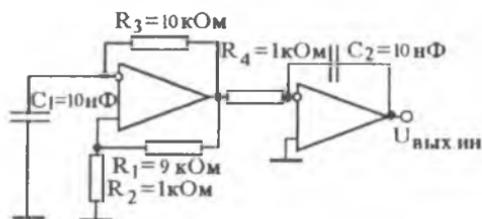


Рисунок 20 – Схема генератора линейно-изменяющегося напряжения

### Решение.

1) На первом ОУ выполнен мультивибратор, рассчитанный в предыдущей задаче. Напряжение с выхода мультивибратора  $U_{\text{вых.м}}$  поступает на вход интегратора, собранного на втором ОУ. На выходе интегратора напряжение  $U_{\text{вых.ин}}$  попеременно то линейно возрастает, то линейно уменьшается (рисунок 21).

Напряжение на выходе мультивибратора, т.е. напряжение на выходе первого ОУ, изменяется попеременно от  $U_{\text{вых.max1}}$  до  $U_{\text{вых.min1}}$ .

Напряжение на выходе интегратора, т.е. напряжение на выходе второго ОУ, изменяется линейно от  $U_{\text{вых.max2}}$  до  $U_{\text{вых.min2}}$  и наоборот

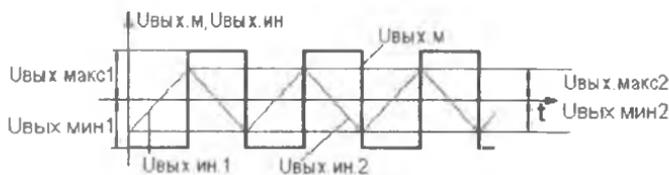


Рисунок 21 – Эпюры изменения напряжения на выходах мультивибратора  $U_{\text{вых.м}}$  и интегратора  $U_{\text{вых.ин}}$

2) Можно записать следующие уравнения для линейно-нарастающего и линейно-падающего напряжений на выходе интегратора, полагая, что момент уменьшения и увеличения напряжений происходит в момент переключения мультивибратора

$$U_{\text{вых.ин1}}(t) = U_{\text{вых.мин2}} - \frac{1}{\tau_2} \int_0^t U_{\text{вых.макс1}} dt$$

и

$$U_{\text{вых.ин2}}(t) = U_{\text{вых.макс2}} - \frac{1}{\tau_2} \int_0^t U_{\text{вых.мин1}} dt$$

где  $\tau_2 = R_4 C_2$  – постоянная времени интегратора.

Поскольку  $U_{\text{вых.мин1}} = -15 \text{ В}$ , а  $U_{\text{вых.макс2}} = 15 \text{ В}$  получаем

$$U_{\text{вых.ин1}}(t) = U_{\text{вых.мин2}} + 15 \frac{t}{\tau_2}, \quad U_{\text{вых.ин2}}(t) = U_{\text{вых.макс2}} - 15 \frac{t}{\tau_2},$$

где  $\tau_2 = R_4 C_2$  – постоянная времени интегратора.

3) Поскольку схема симметричная, то при  $t = T/2$ , где  $T$  – период следования импульсов с выхода мультивибратора.

$$U_{\text{вых.ин1}}\left(\frac{T}{2}\right) = U_{\text{вых.макс2}}, \quad U_{\text{вых.ин2}}\left(\frac{T}{2}\right) = -U_{\text{вых.мин2}},$$

где  $U_{\text{вых.макс2}} = |U_{\text{вых.мин2}}|$ .

Отсюда

$$U_{\text{вых.макс2}} = \frac{15T}{4\tau_2} = 13,3 \text{ В.}$$

### Контрольные вопросы

1. Что такое компаратор?
2. Чем определяется разность напряжений, при которой напряжение на выходе компаратора на ОУ не определено?
3. Чем определяется время переключения компаратора на ОУ из одного состояния в другое?
4. С какой целью в импульсных устройствах используют положительную обратную связь?
5. Какое напряжение будет на выходе триггера Шмидта на ОУ, если его входное напряжение равно нулю?
6. Чем определяются пороги срабатывания триггера Шмидта на ОУ?
7. Всегда ли пороги срабатывания триггера Шмидта на ОУ совпадают по абсолютной величине?
8. Что называется мультивибратором?
9. Какую функцию выполняет мультивибратор?
10. Какие основные параметры мультивибратора?
11. Чем определяется амплитуда импульсов на выходе мультивибратора?
12. Чем ограничены максимальная и минимальная частоты импульсов на выходе мультивибратора?
13. Из каких соображений необходимо выбрать коэффициент положительной обратной связи в мультивибраторе?
14. Что такое одновибратор?
15. Как изменяется напряжение на выходе интегратора при подаче на его вход постоянного напряжения?
16. От чего зависит линейность напряжения на выходе генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН)?
17. Чем ограничена амплитуда напряжения на выходе ГЛИН?

## Литература

1. Амосов В. В. Схемотехника и средства проектирования цифровых устройств. – СПб. : БХВ-Петербург, 2007.
2. Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. Основы схемотехники микроэлектронных устройств. – М. : Техносфера, 2012.
3. Вайсбург Ф. И., Панаев Г. А., Савельев Б. Н. Электронные приборы и усилители. – М. : КомКнига, 2007.
4. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
5. Гаврилов С. А. Искусство схемотехники. Просто о сложном. – СПб. : Наука и Техника, 2011.
6. Казёнов Г. Г. Основы проектирования интегральных схем и систем / Г. Г. Казёнов. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.
7. Каплан Д., Уайт К. Практические основы аналоговых и цифровых схем. – М. : Техносфера, 2006.
8. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. Перевод с английского к.т.н. Рабодзея А. Н. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2011.
9. Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Ф. Лаврентьев. – М. : Издательский центр «Академия», 2010.
10. Муханин Л. Г. Схемотехника измерительных устройств: Учебное пособие. – СПб. : Издательство «Лань», 2009.
11. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. – М. : Техносфера, 2015.
12. Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. – М. : Техносфера, 2008.
13. Селиванова З. М. Схемотехника электронных средств: учебное пособие / З. М. Селиванова. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008.
14. Топильский В. Б. Схемотехника измерительных устройств / В. Б. Топильский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
15. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем PSPICE/ – М. : ДМК, 2008.
16. Шустов М. А. Схемотехника. 500 устройств на аналоговых микросхемах. – СПб. : Наука и Техника, 2013.

## Содержание

	Введение	3
1	Цели и задачи практических занятий	4
2	Тема «Операционные усилители»	5
2.1	Усилительные схемы, выполненные на основе микросхем ОУ	5
	Задача 1	6
	Задача 2	8
	Задача 3	9
	Задача 4	10
	Контрольные вопросы	11
2.2	Погрешности в усилителях на микросхемах ОУ	11
	Задача 5	12
	Задача 6	14
	Задача 7	15
	Задача 8	17
	Задача 9	19
	Задача 10	20
	Контрольные вопросы	21
2.3	Импульсные устройства на основе микросхем ОУ	23
	Задача 11	23
	Задача 12	24
	Задача 13	25
	Задача 14	27
	Контрольные вопросы	29
	Литература	30

А. Д. Тастенов, А. А. Бектасова

**ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА  
АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Методические указания

Технический редактор Е. А. Кабнасыров  
Ответственный секретарь З. С. Исакова

Подписано в печать 05.05.2016 г.

Гарнитура Times.

Формат 29,7 x 42 ¼. Бумага офсетная.

Усл.печ.л. 1,78 Тираж 300 экз.

Заказ № 2800

Издательство «КЕРЕКУ»

Павлодарского государственного университета  
им. С. Торайгырова

140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64



Составители: А. Д. Тастенов, А. А. Бектасова

**Кафедра «Электротехники и автоматизации»**

Электроника и схемотехника аналоговых устройств  
Методические указания к практическим работам

Одобрено на заседании кафедры 17 03 2016 г.  
Протокол № 14

Заведующий кафедрой [Signature] С. К. Жумажанов

**СОГЛАСОВАНО**

Декан ЭФ [Signature] А. П. Кислов 28 03 2016 г.

**Нормоконтролер**

ОАиМК [Signature] Г. С. Баяхметова 25 04 2016 г.

**ОДОБРЕНО**

Начальник УМО [Signature] А. Б. Темиргалиева 20 04 2016 г.