

Электронный архив УГПТУ
Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Уральская государственная лесотехническая академия

Кафедра автоматизации производственных процессов

В.Е. Выборнов

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИКИ
Методические указания по курсу "Электроника"
для студентов спец. 210200

Екатеринбург 1999

Настоящие методические указания составлены для оказания технической помощи студентам III, IV и V курсов спец. 210200 как очного, так и заочного обучения при курсовом проектировании систем автоматики по дисциплинам: "Электроника", "Автоматизация технологических процессов" и "Проектирование средств автоматизации", а также при дипломном проектировании.

Данные методические указания посвящены вопросам применения операционных усилителей. Операционные усилители (ОУ) - это устройства усиления сигналов, имеющие два входа (инвертирующий и неинвертирующий) и весьма высокий коэффициент усиления (более 1000).

Благодаря этим свойствам ОУ можно применять в различных областях: как масштабный усилитель, компаратор сигналов, элемент математической обработки сигналов (сумматор, интегратор, дифференциатор), элемент преобразования одного вида сигнала в другой (преобразователь тока в напряжение, преобразователь импульсных сигналов в постоянное напряжение), элемент регулирования (стабилизатор тока и напряжения), генератор сигналов. Таким образом, под операционным усилителем принято понимать интегральную микросхему, позволяющую строить узлы электронной аппаратуры. вышеперечисленные функции и технические характеристики которых зависят только от свойств цепей обратной связи.

1. ПАРАМЕТРЫ ОУ

1.1. Коэффициент усиления K - отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения при работе усилителя на линейном участке характеристики:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$$

Обычно современные ОУ имеют $K=10^3 \div 10^6$.

1.2. Напряжение смещения нуля ($e_{см}$) - это напряжение, при котором выходное напряжение равно 0.

Обычно $e_{см} = (3-10) \text{ мВ}$, но есть ОУ, у которых $e_{см}$ значительно меньше, например, К140 УД17 имеет $e_{см} = 0,25 \text{ мВ}$.

Типичная зависимость выходного напряжения от входного для интегрального ОУ показана на рис. 1.

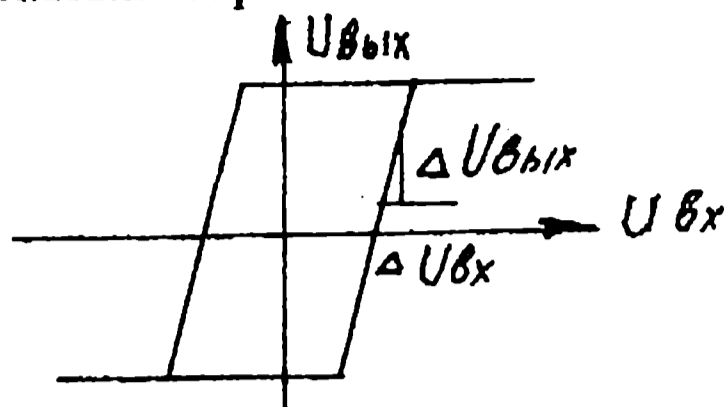


Рис. 1. Выходная характеристика ОУ

Из графика на рис. 1 видно, что $e_{см}$ может быть как положительным, так и отрицательным.

1.3. Входное сопротивление одного из входов, при этом другой вход заземлен.

$$R_{вх} = 10^3 + 10^6 \text{ Ом и более.}$$

1.4. Выходное сопротивление ОУ

$$R_{вых} = 100 + 500 \text{ Ом.}$$

1.5. Ток потребления микросхемы $J_{потр}$.

1.6. f_1 - частота единичного усиления (частота, при которой коэффициент усиления ОУ снижается до единицы).

1.7. В прил. 1, табл. 1 приведены основные технические характеристики ОУ, а на рис. 1-5 приложения 2 приведены цоколевки ОУ.

2. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОУ

2.1. Инвертирующий усилитель и вывод формулы его регулируемого коэффициента усиления

На рис. 2 представлена схема инвертирующего ОУ.

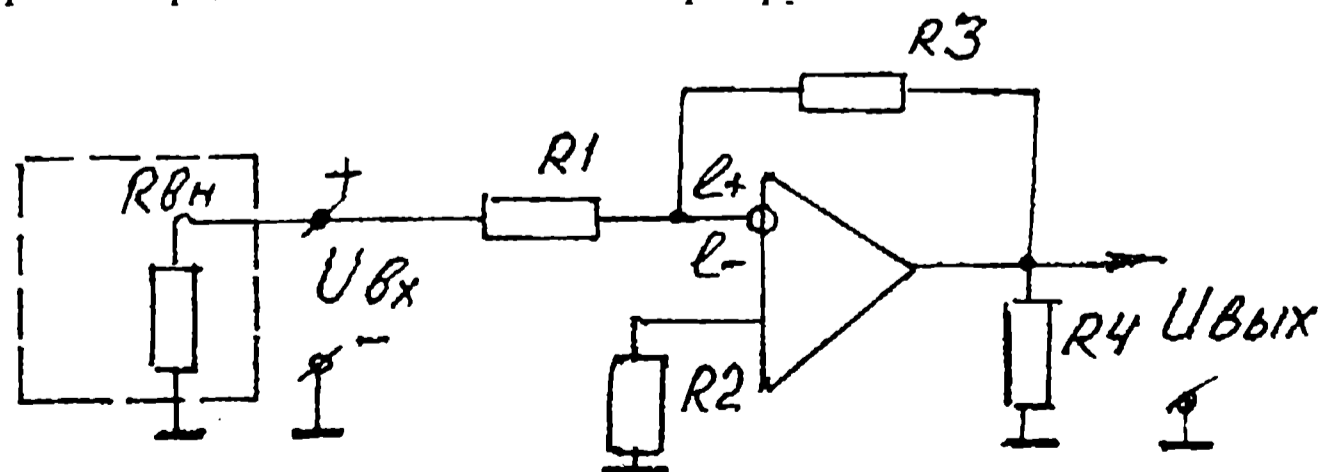


Рис. 2. Инвертирующий усилитель

На инвертирующем входе ОУ от источника входного сигнала имеется напряжение e_+ относительно общего провода. Если рассматривать резисторы R_1 , R_3 , $R_{вых}$ как делитель напряжения входного сигнала, то

$$e_+ = \frac{U_{вх} \cdot (R_3 + R_{вых})}{R_1 + R_3 + R_{вых}},$$

где $R_{вых} = 100 + 500$ Ом, что, как правило, меньше R_1 и R_3 . Поэтому $R_{вых}$ в формуле можно пренебречь.

$$\text{Тогда } e_+ = \frac{U_{вх} \cdot R_3}{R_1 + R_3}. \quad (2.1)$$

$U_{вых}$ можно рассматривать как входное напряжение для другого делителя, который создает на инверсном входе e_- часть выходного $U_{вых}$

$$e_- = \frac{U_{вых} \cdot (R_1 + R_{вн})}{R_1 + R_{вн} + R_3}.$$

$R_{вн}$ - внутреннее сопротивление источника входного сигнала, которое, как правило составляет несколько десятков Ом, которое значительно меньше R_1 , поэтому $R_{вн}$ в формуле можно пренебречь и формула примет вид:

$$e_- = \frac{U_{вых} \cdot R_1}{R_1 + R_3}. \quad (2.2)$$

Таким образом на выходе усилителя будет напряжение $U_{вых}$, определяемое формулой

$$U_{вых} = K \cdot e_+ - K \cdot e_-, \quad (2.3)$$

где K - коэффициент усиления усилителя ОУ.
Преобразуем формулу (2.3)

$$\frac{U_{вых}}{K} = e_+ - e_-. \quad (2.4)$$

Если K очень большое, например 10^5 , то левая часть формулы (2.4) будет стремиться к нулю, тогда $e_+ = e_-$, поэтому, подставляя в эту формулу значения e_+ и e_- из формул (2.1, 2.2), получим выражение:

$$\frac{U_{вх} \cdot R_3}{R_1 + R_3} = \frac{U_{вых} \cdot R_1}{R_1 + R_3}. \quad (2.5)$$

Из формулы (2.5) Электронный архив УГЛТУ получим выражение:

$$K_{yc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_3}{R_1} \quad (2.6)$$

Таким образом коэффициент усиления инвертирующего усилителя можно регулировать с помощью сопротивлений R_1 и R_3 .

2.2. Неинвертирующий усилитель и вывод формулы регулируемого коэффициента усиления.

На рис. 3 представлена схема неинвертирующего ОУ.

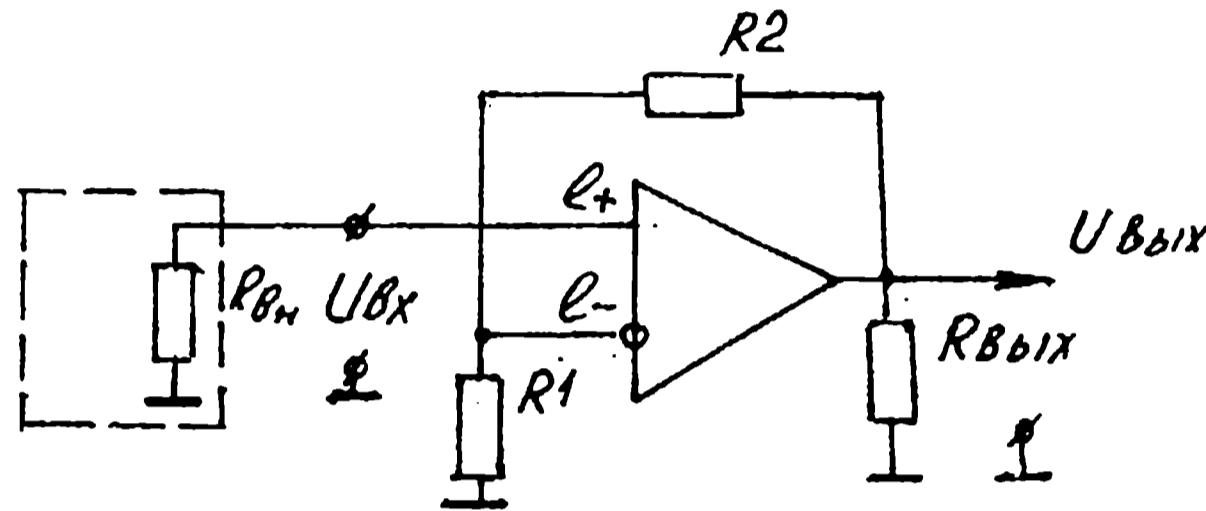


Рис. 3. Схема неинвертирующего усилителя

$$e_+ = U_{вх}, \quad (2.7)$$

$$e_- = \frac{U_{вых} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

$$U_{вых} = K \cdot e_+ - K \cdot e_- \quad (2.9)$$

$$\frac{U_{вых}}{K} = e_+ - e_- \quad (2.10)$$

Если $K \rightarrow \infty$, то $\frac{U_{вых}}{K} \rightarrow 0$,
тогда $e_+ = e_-$ (2.11)

Перепишем (2.11), подставив значения e_+ и e_- из формул (2.7 и 2.8), и получим

$$U_{вх} = \frac{U_{вых} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.12)$$

Преобразовав (2.12), получим

$$K_{yc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Частный случай неинвертирующего усилителя, изображенного на рис. 4, называется повторителем, у которого $R_2 = 0, R_1 \rightarrow \infty$.

поэтому его

$$K_{yc} = 1.$$

Сигнал подается на неинвертирующий вход. Этот сигнал без усиления появляется на выходе с той же полярностью, поэтому такая схема называется повторителем.

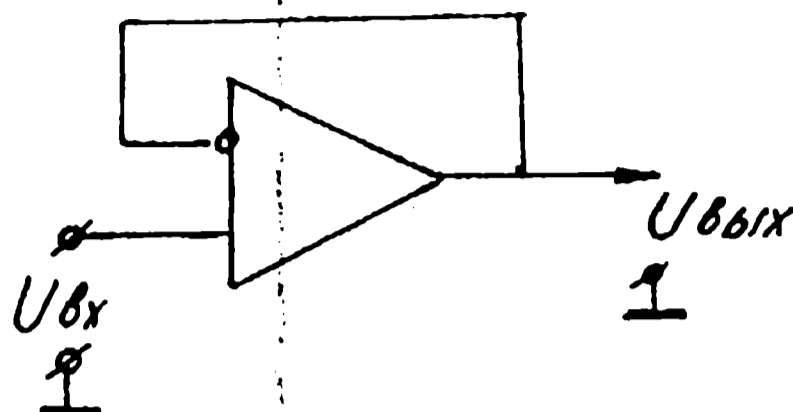


Рис.4. Схема повторителя

На базе инвертирующего усилителя также можно получить $K=1$, он не будет повторителем. У него сигнал на выходе по величине такой же, как и на входе, но полярность обратная.

Схема инвертирующего усилителя с $K_{yc} = -1$ представлена на рис. 5.

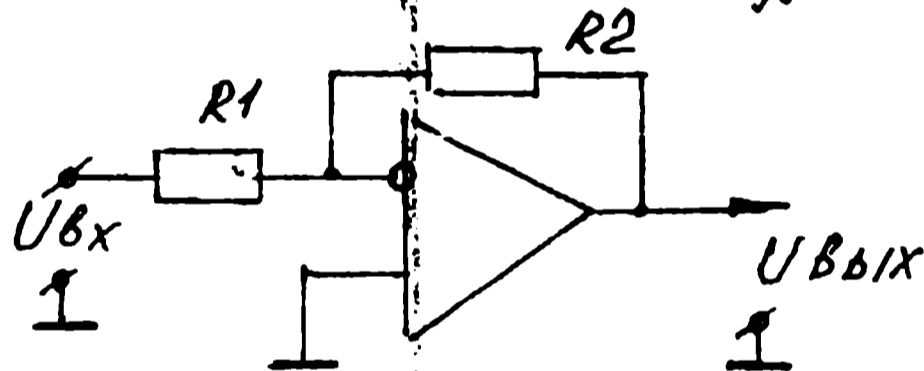


Рис. 5. Схема усилителя с коэффициентом $K_{yc} = -1$ при $R1 = R2$.

2.3. Дифференциальный усилитель

Такой усилитель используется, как правило, для усиления дифференциального сигнала, снимаемого с четырехплечевого моста.

Схема дифференциального усилителя представлена на рис. 6

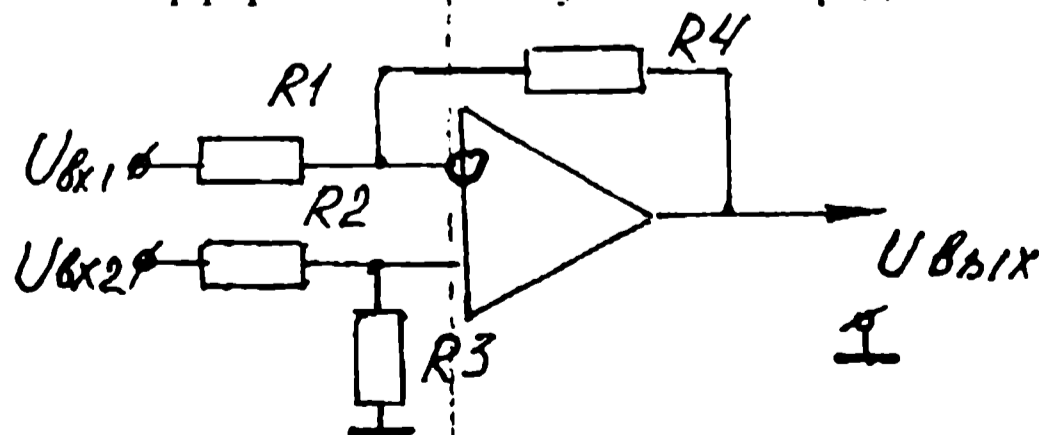


Рис. 6. Схема дифференциального усилителя

Используя предыдущие выводы, получим:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}2} \cdot \frac{R3}{R2+R3} \cdot \left(1 + \frac{R4}{R1}\right) - U_{\text{вх}1} \cdot \frac{R4}{R1} \quad (2.13)$$

При условии $\frac{R2}{R3} = \frac{R1}{R4}$

формула (2.13) примет вид $U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}) \cdot \frac{R4}{R1}$.

На рис. 7 представлена схема дифференциального усилителя, подключенного к выходу четырехплечевого моста.

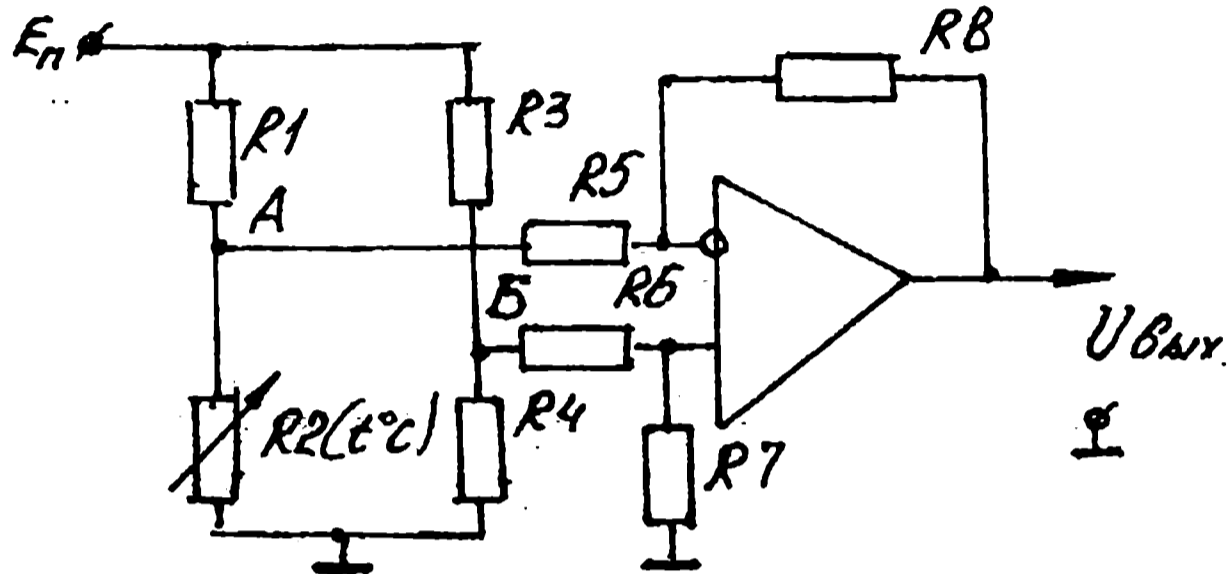


Рис. 7. Схема подключения ОУ к выходу моста

В мостовой схеме резисторы, как правило, низкоомные, значительно меньше $R5, R6, R7, R8$, поэтому

$$U_{\text{вых}} = (U_B - U_A) \cdot \frac{R8}{R5} \quad \text{при выполнении условия } R5 \cdot R7 = R6 \cdot R8.$$

2.4. Усовершенствованные дифференциальные усилители

Недостатками простейшего дифференциального усилителя являются низкие входные сопротивления и трудность регулировки коэффициента усиления. Регулировка K_{yc} возможна только путем одновременного изменения сопротивлений двух резисторов, например: $R7, R8$ (см. рис. 7).

Известны несколько усложненных дифференциальных усилителей, в которых возможна регулировка усиления с помощью одного переменного резистора.

Примером может служить схема на рис. 8.

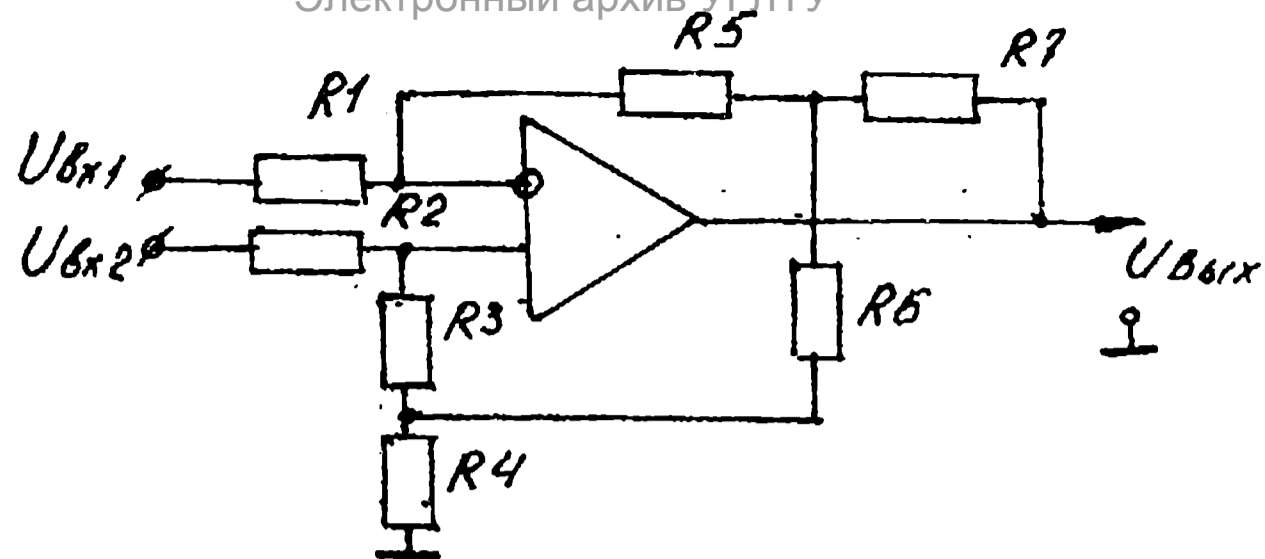


Рис.8. Схема дифференциального усилителя

При условии $R1 = R2, R3 = R5, R4 = R7$

$$U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1}) \cdot \left(\frac{R5 + R7}{R1} + \frac{R5 \cdot R7}{R1 \cdot R6} \right).$$

Регулировка $K_{ус}$ производится изменением одного резистора R6.

Известна другая (более усовершенствованная) схема дифференциального усилителя, так называемого, инструментального усилителя. Такие усилители имеют высокие входные сопротивления по обоим входам и обеспечивают установку заданного коэффициента усиления с помощью одного изменяемого сопротивления. Эта схема приведена на рис.9.

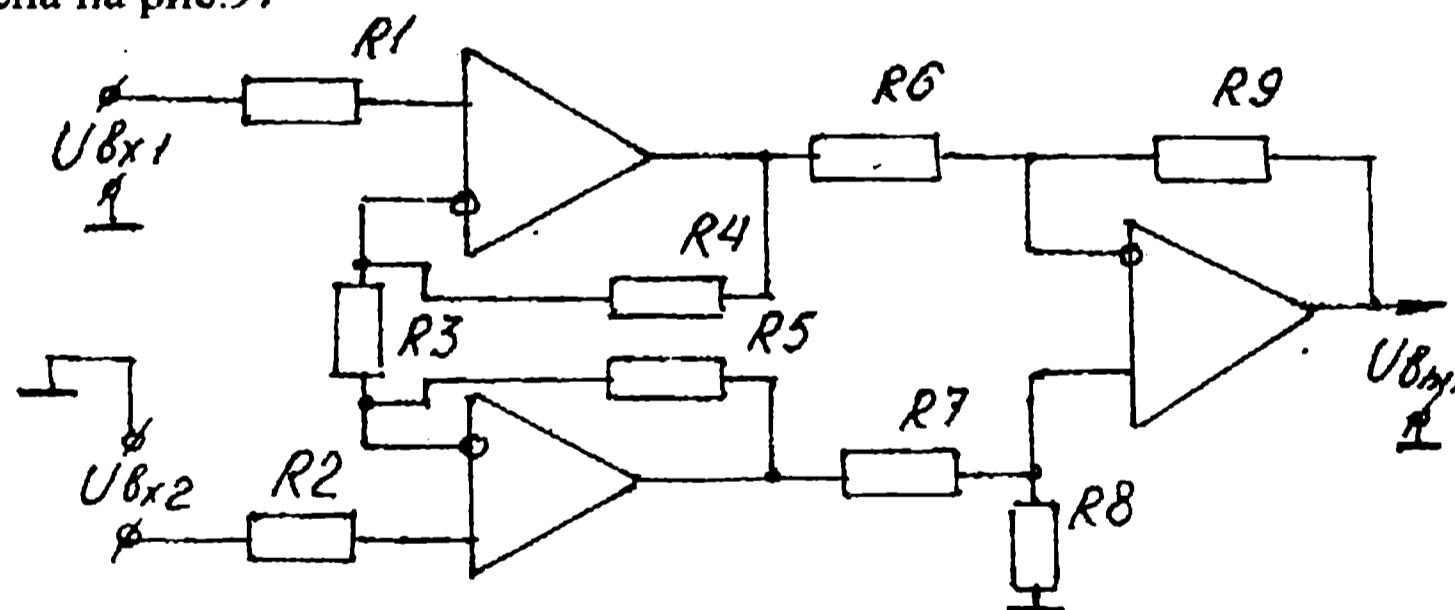


Рис. 9. Инструментальный усилитель

Усилитель на рис. 9 имеет очень высокий коэффициент подавления синфазных помех.

Резисторы R6, R7, R8, R9, входящие в схему, должны удовлетворять соотношению

$$R8 \cdot R6 = R7 \cdot R9,$$

тогда $U_{вых}$

определяется формулой

$$U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1}) \cdot \frac{R9}{R6} \cdot \left(\frac{R4 + R5}{R3} + 1 \right).$$

K_{yc} можно регулировать одним сопротивлением R_3 .

2.5. Интегральные компараторы

В устройствах автоматического регулирования широкое применение нашли устройства, имеющие название - компараторы. Это простейший преобразователь непрерывного аналогового сигнала в логический сигнал. "Лог.0" или "Лог.1" в зависимости от того, меньше или больше контролируемый сигнал, подаваемый на первый вход, опорного напряжения, подаваемого на второй вход компаратора. По сути дела компаратор - это устройство, сравнивающее два аналоговых сигнала. К компараторам относится микросхема 521 СА3.

Схема такого компаратора представлена на рис. 10.

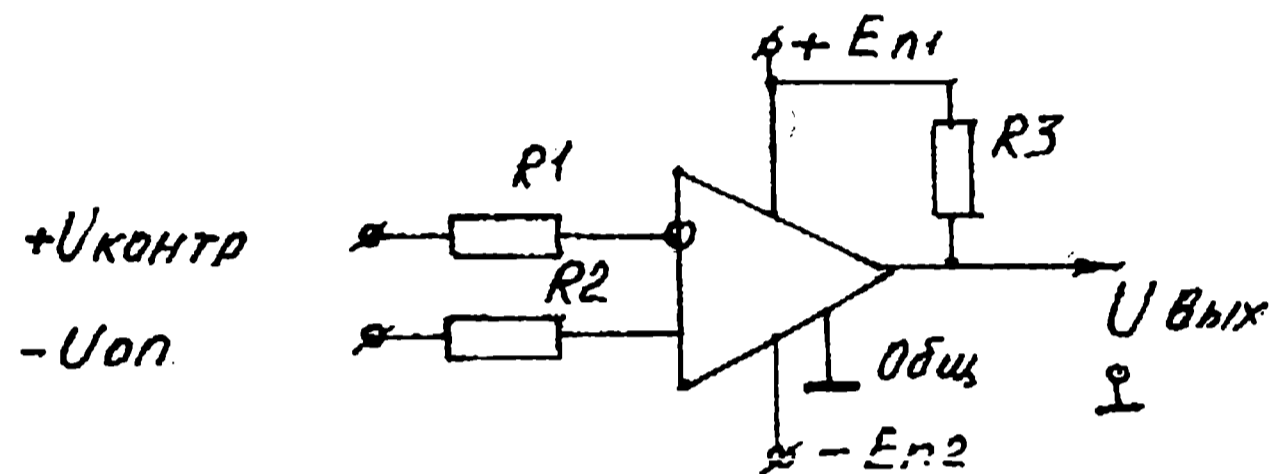


Рис.10.Компаратор на микросхеме '521 СА3

R_1 и R_2 берут, как правило, одинаковыми, по 10 кОм.

R_3 - это сопротивление коллекторной нагрузки выходного транзистора микросхемы с открытым коллектором. Величина R_3 берется (при $E_{п1}, E_{п2}=15В$) 3 - 5 кОм.

В идеальном компараторе 521 СА3 (когда $\epsilon_{см}=0$) при равенстве $U_{контр}$ и $U_{оп}$ на выходе будет напряжение $U_{вых}=0$.

При $U_{контр} > U_{оп}$ на выходе будет сигнал насыщения, равный -11В.

При $U_{контр} < U_{оп}$ на выходе будет сигнал +11В.

Эта микросхема обеспечивает работу логической микросхемы типа ТТЛ. При этом вывод $-E_{п2}$ подключается к общему проводу вместе с выводом "Общ."

Таким образом, схема компаратора, работающая от одного источника питания $+E_{п1}=5В$, представленная на рис. 11, сравнивает аналоговые (непрерывные) сигналы величиной не более 5 В и выдает на выходе сигнал уровня "Лог. 1" или "Лог. 0".

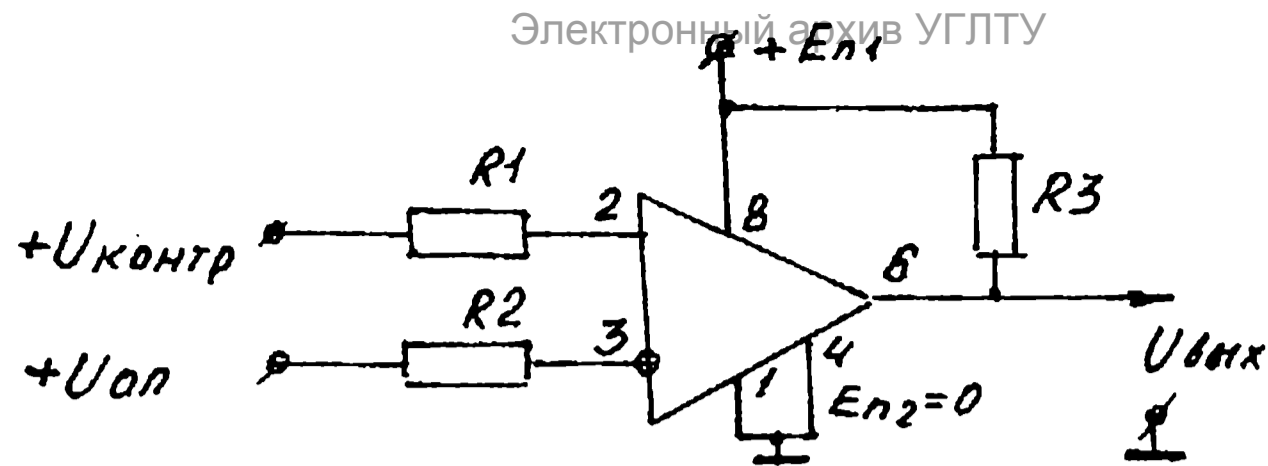


Рис. 11. Компаратор, сопрягаемый с логической микросхемой ТТЛ

Компаратор никогда не охватывается ООС (отрицательной обратной связью).

Компаратор можно обеспечить подключением U_k и $U_{оп}$ на один вход, но с разными полярностями. Второй, неиспользуемый вход, подключают через резистор на общий провод, как показано на рис. 12.

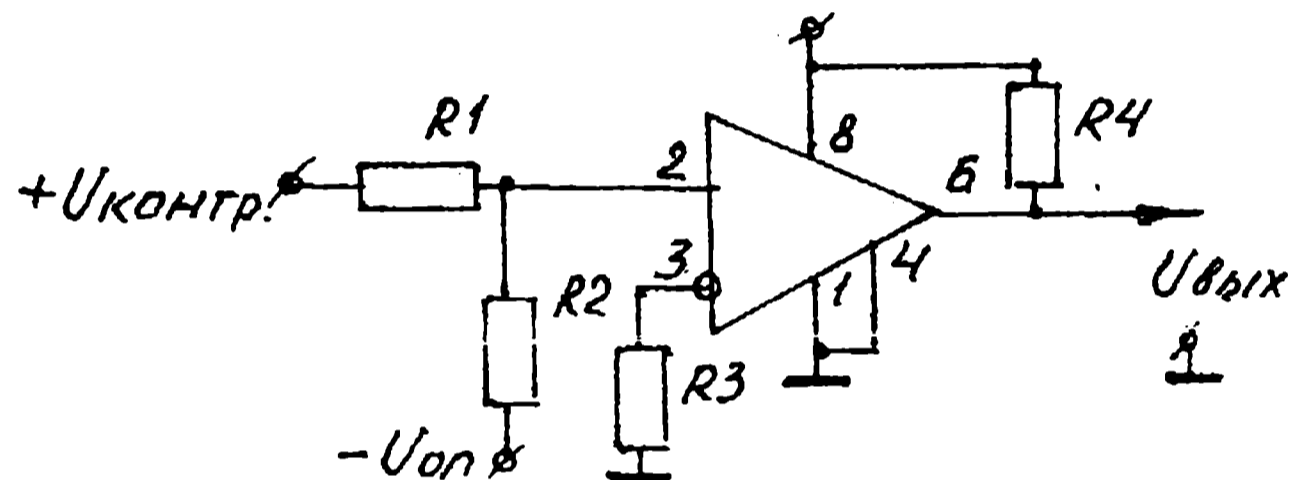


Рис. 12. Схема компаратора с подключением на прямой вход двух напряжений с разными полярностями

Компаратор по сути сравнивает модули токов (контролируемого с опорным).

При $\frac{U_{контр}}{R1} = \frac{U_{оп}}{R2}$ $U_{вых} = 0$, то есть при $U_{контр} = U_{оп}$ и равенстве $R1 = R2$.

Можно менять соотношения $R1$ и $R2$ и сравнивать уже другие значения напряжений, соблюдая равенство

$$\frac{U_{контр}}{R1} = \frac{U_{оп}}{R2}$$

Компараторы можно строить и на других типах ОУ, но согласно требованиям технических условий на ОУ 140, 154, 544 и других серий работать на одном источнике питания $+E_{н1}$ не рекомендуется.

Заводы-изготовители этих микросхем не гарантируют их безотказную работу в течение гарантийного срока службы.

2.6. Преобразователи тока в напряжение

В некоторой литературе их называют усилителями тока, которые выполняют функцию преобразования малых токов в напряжение.

Простейший способ преобразования тока в напряжение - это пропустить ток через резистор с известным сопротивлением. Однако при этом для увеличения чувствительности преобразователя при измерении очень малых токов приходится существенно увеличивать сопротивление резистора, а это приводит к обратному эффекту измерительной цепи на цепь, в которой создается ток.

В качестве источников тока могут быть первичные преобразователи физических параметров в стандартное значение тока, например, преобразователи разряженности и избыточного давления в ток (0-5) мА "Сапфир" и др. Такой же сигнал имеют специальные преобразователи мощности потребления в постоянный ток (0-5) мА, например типа Е 859.

Усилитель преобразователя тока в напряжение представляет собой инвертирующий усилитель без входного резистора, как показано на рис. 13.

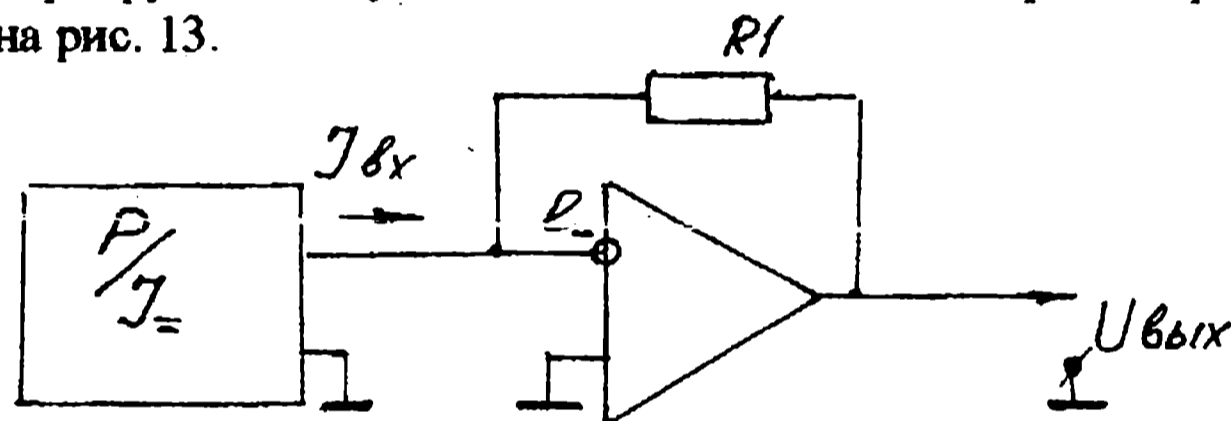


Рис.13. Преобразователь постоянного тока в напряжение

Преобразователь физического параметра (давления) представляет собой устройство, имеющее внутреннее сопротивление R_i .

Операционный усилитель, как известно, имеет входное сопротивление $R_{вх}$, к которому параллельно подключено внутреннее сопротивление R_i первичного преобразователя. Параллельное соединение этих сопротивлений образует эквивалентное сопротивление $R_э$ между инвертирующим входом ОУ и общим проводом.

Теперь мы можем записать входное напряжение e_- на инвертирующем входе ОУ.

$$e_- = I_{вх} \cdot R_э \quad (2.14)$$

$$U_{вых} = -e_- \cdot \frac{R1}{R_э} \quad (2.15)$$

В выражение (2.15) вместо e_- , подставим его значение (2.14), получим

$$U_{вых} = -I_{вх} \cdot R1.$$

Таким образом, на выходе преобразователя тока в напряжение имеем зависимость $U_{вых} = -I_{вх} \cdot R1$.

Если $I_{вх}$ изменяется от 0 до 5 мА, а сопротивление R1 имеет значение 1 кОм, получит на выходе изменение напряжения от 0 до 5 В.

2.7. Нуль - орган

В электронике используется ОУ в качестве контроллера нуля, у которого на один вход подключается входной изменяющийся сигнал, а другой вход заземлен. На выходе будет выходной сигнал изменяться от $+U_{вых}$ до $-U_{вых}$, при $U_{вх}$ больше или меньше "0". На рис. 14 представлена схема нуля - органа.

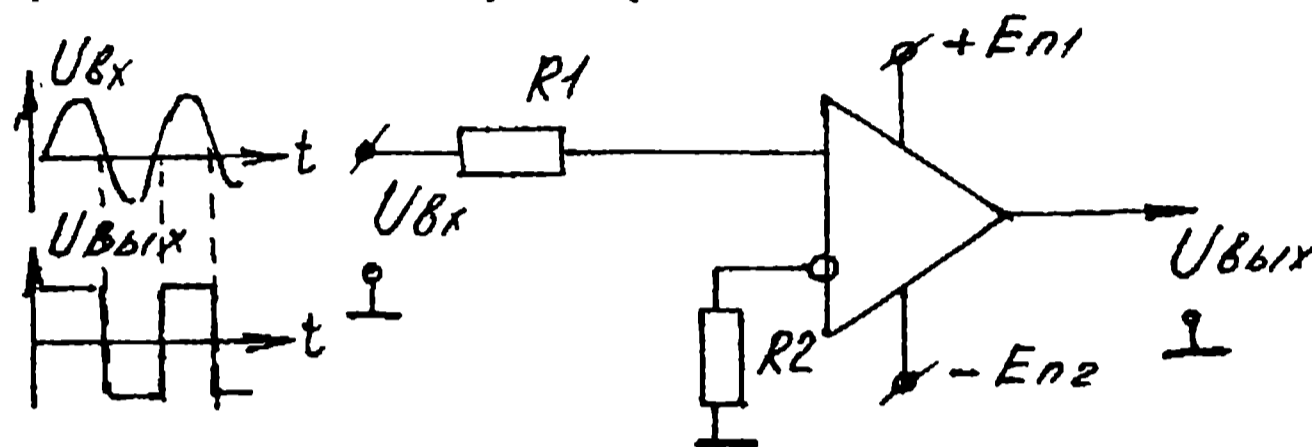


Рис. 14. Нуль-орган

2.8. Сумматор

Сумматор представлен на рис. 15.

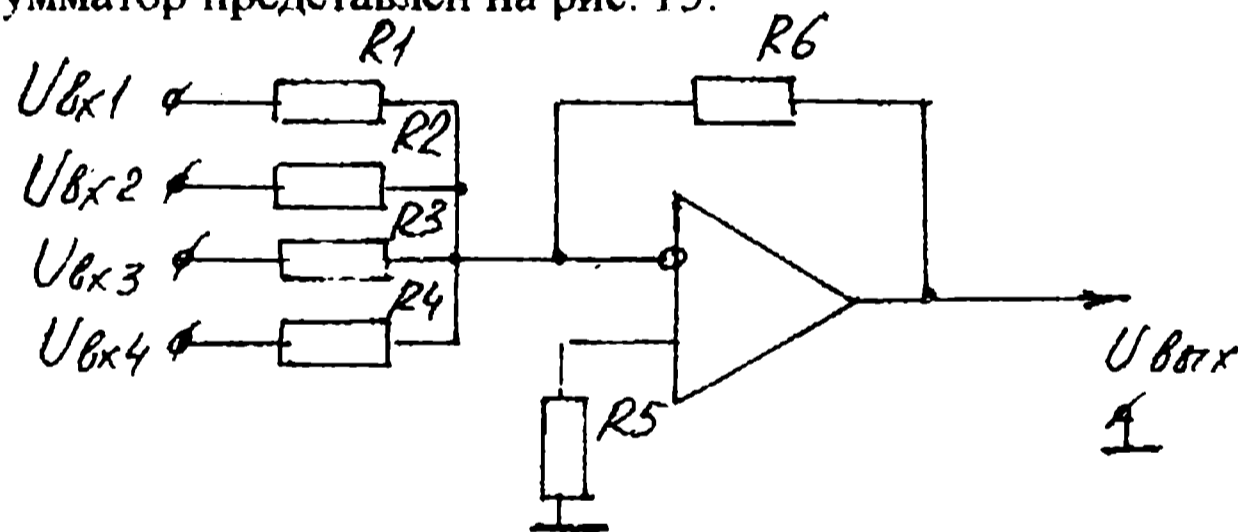


Рис. 15. Сумматор

$$U_{вых} = -(U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3} + U_{вх4}) \frac{R6}{Ri}$$

При равенстве $R1=R2=R3=R4=Ri$

$$U_{вых} = - \sum U_{вх} \cdot \frac{R6}{Ri}$$

формула примет вид

2.9. Амплитудный детектор

Амплитудный детектор по-другому называют амплитудный выпрямитель, который предназначен для формирования постоянного выходного напряжения, пропорционального амплитуде входного

переменного или импульсного напряжения. На рис. 16 представлена схема амплитудного детектора.

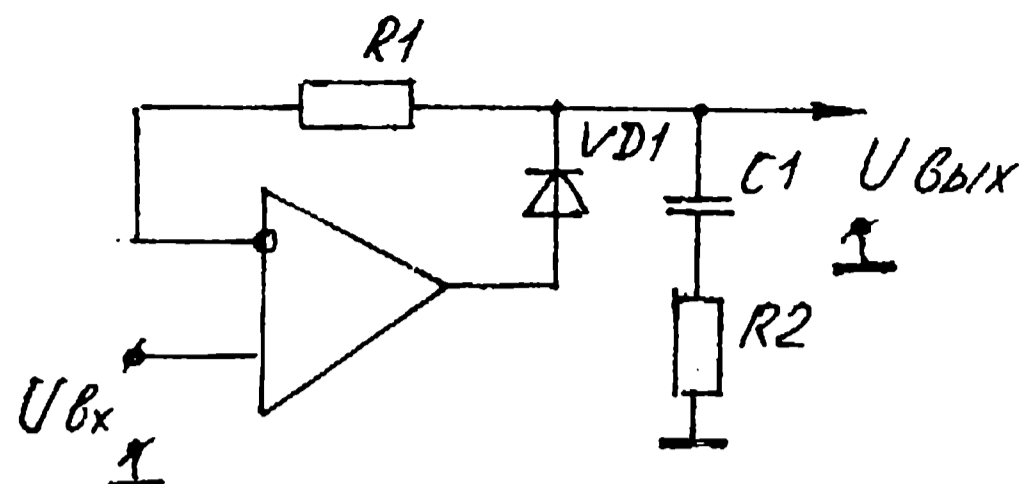


Рис.16. Амплитудный детектор

Если постоянная разряда конденсатора $C1$ много больше периода входных импульсов, то на выходе получим постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде входных импульсов. Однако следует обеспечить разряд конденсатора $C1$ через некоторое время, для периодического обновления информации.

На рис. 17 представлены временные диаграммы амплитудного детектора.

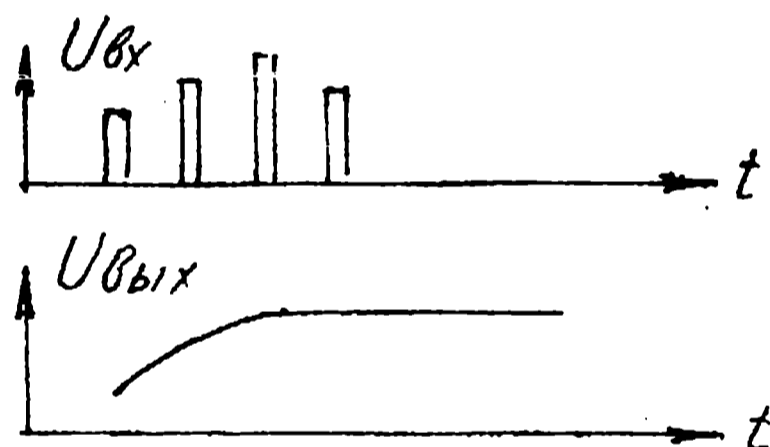
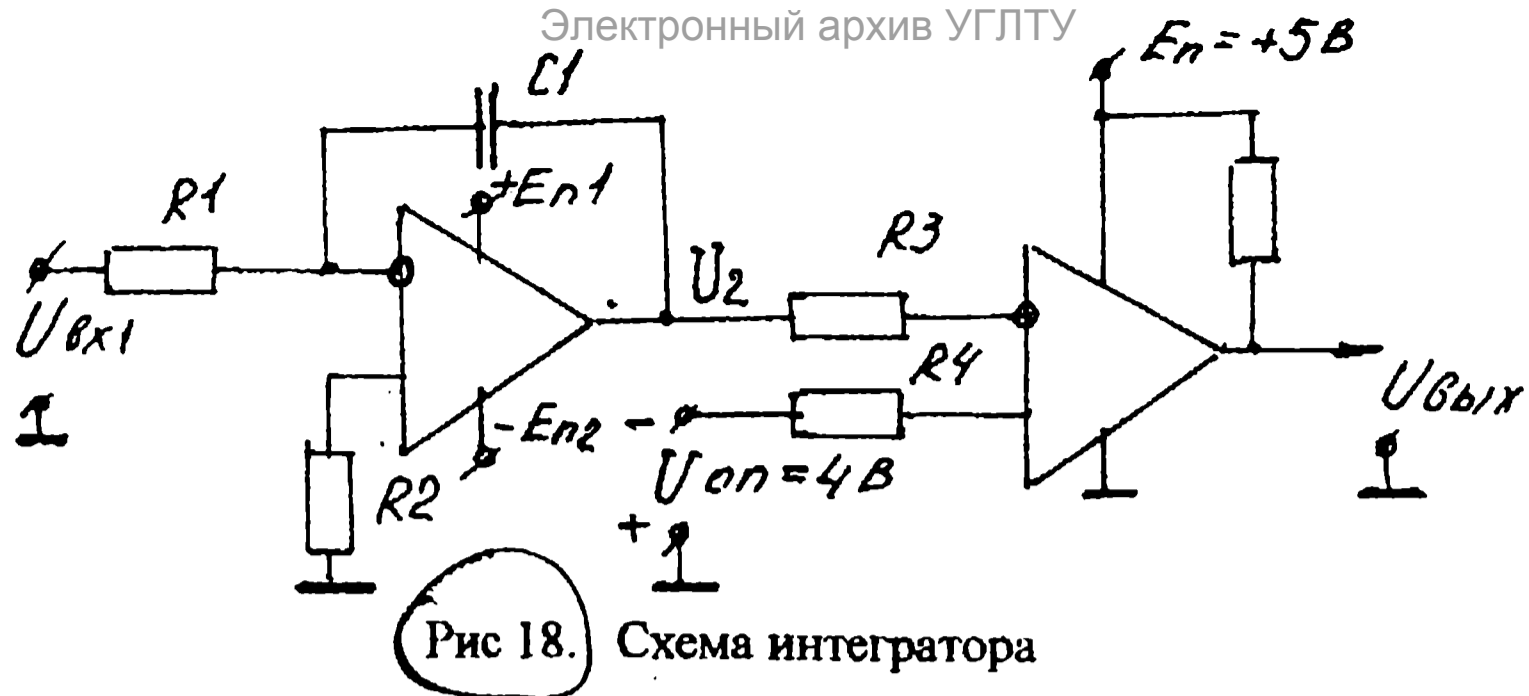


Рис 17. Временные диаграммы амплитудного детектора

2.10. Интегратор на операционном усилителе

Интегратор нашел широкое применение в электронике как устройство задержки прохождения импульсов, а также как селектор импульсов по длительности и в других случаях. Схема интегратора в устройстве селекции импульсов по длительности представлена на рис. 18.

Здесь используется свойство интегратора: зависимость времени интегрирования от величины интегрируемого напряжения ($U_{вх}$), от уровня интересующего выходного напряжения и, конечно, от величины постоянной времени интегратора. $T_{инт} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \cdot \tau$, где $\tau = R1 \cdot C1$.



На рис. 19 представлены временные диаграммы интегратора .

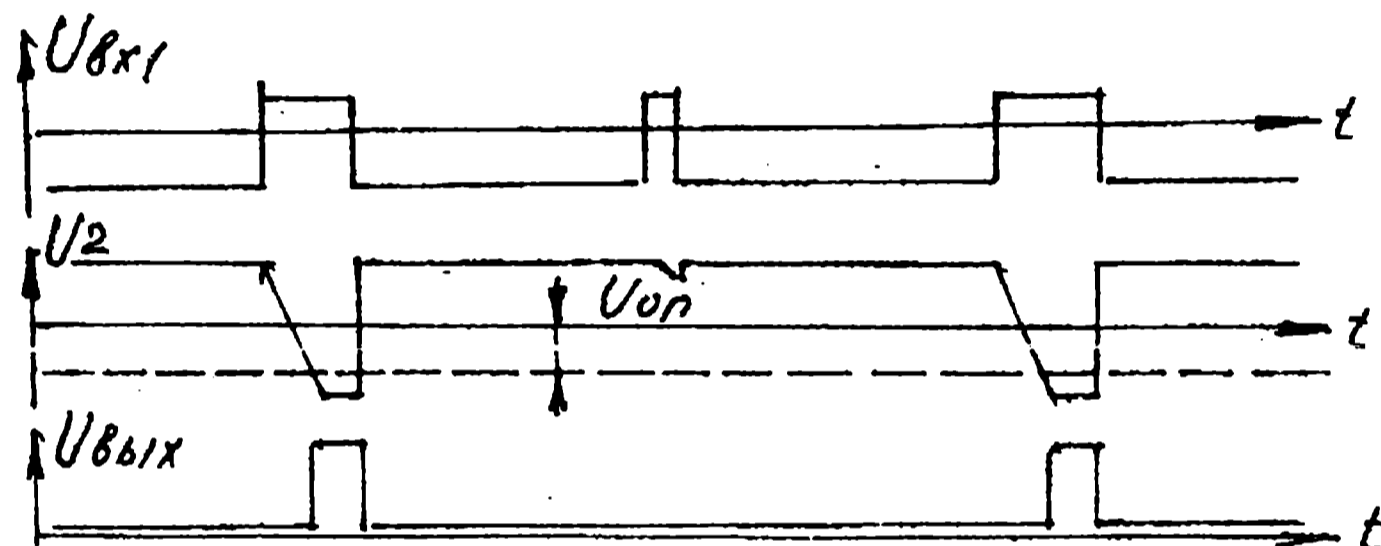
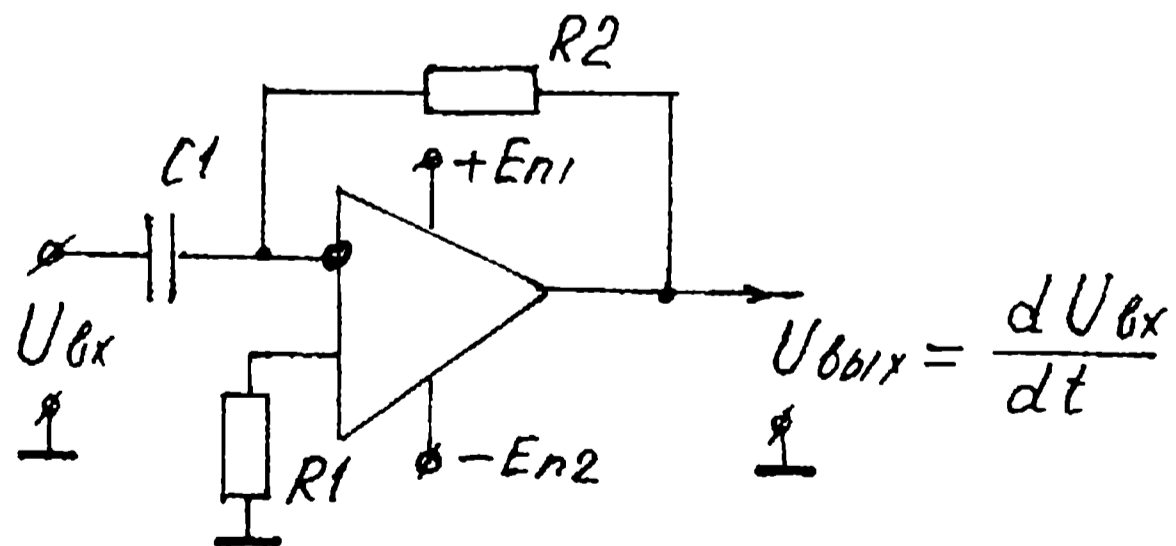


Рис. 19. Временные диаграммы интегратора

2.11. Дифференциатор

На рис. 20 представлена схема дифференцирующего усилителя на ОУ.



Если $C_1 = 1 \text{ мкФ}$, $R_2 = 30 \text{ кОм}$, $U_{вх} = 0,5 \cdot \sin \omega t$,
 то $U_{вых} = K \cdot U_{вх}$, где $K = \frac{R_2}{X_{C1}}$, $X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} =$
 $= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 3 \text{ кОм}$, $K = \frac{30 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^3} = 10$.
 $U_{вых} = 10 \cdot 0,5 \cdot \cos \omega \cdot t$.

На рис. 21 представлены временные диаграммы напряжения на входе и выходе дифференциального усилителя.

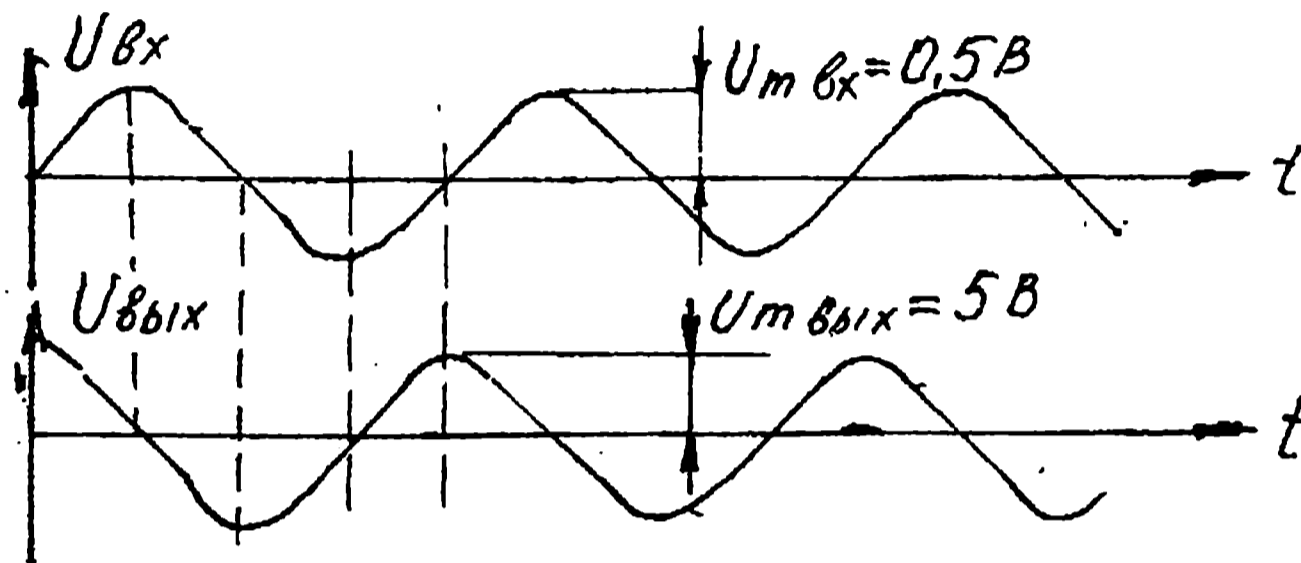


Рис. 21. Временные диаграммы напряжений на входе и выходе дифференцирующего усилителя

Дифференцирующие усилители используются для селекции момента максимума входного сигнала.

2.12. Стабилизатор напряжения с использованием параметрического стабилитрона и ОУ

Схема однополярного стабилизатора напряжения на основе ОУ представлена на рис. 22.

На прямой вход ОУ подано стабилизированное напряжение, снимаемое с параметрического стабилитрона V_{DI} . ОУ является неинвертирующим, на выходе которого напряжение определяется выражением: $U_{вых} = U_{ст} \cdot \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right)$.

Ток нагрузки $I_H = \beta_{VT1} \cdot I_{вых ДА1}$,

если $\beta_{VT1} = 50$, а $I_{вых ДА1} = 5 \text{ мА}$, то I_H стабилизатора в целом равно $I_H = 50 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 250 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

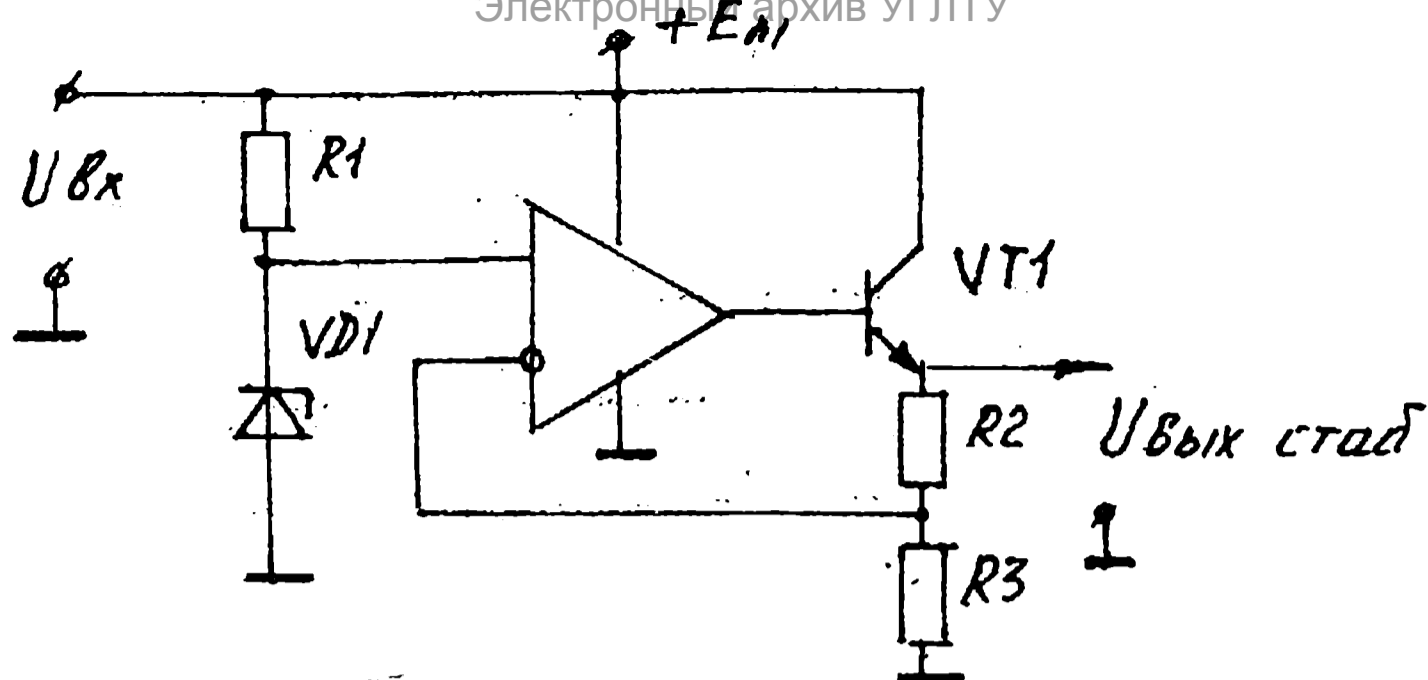


Рис. 22. Стабилизатор напряжения

2.13. Генератор прямоугольных сигналов

Генератор построен на базе ОУ, работающего в режиме компаратора, представленного на рис. 23.

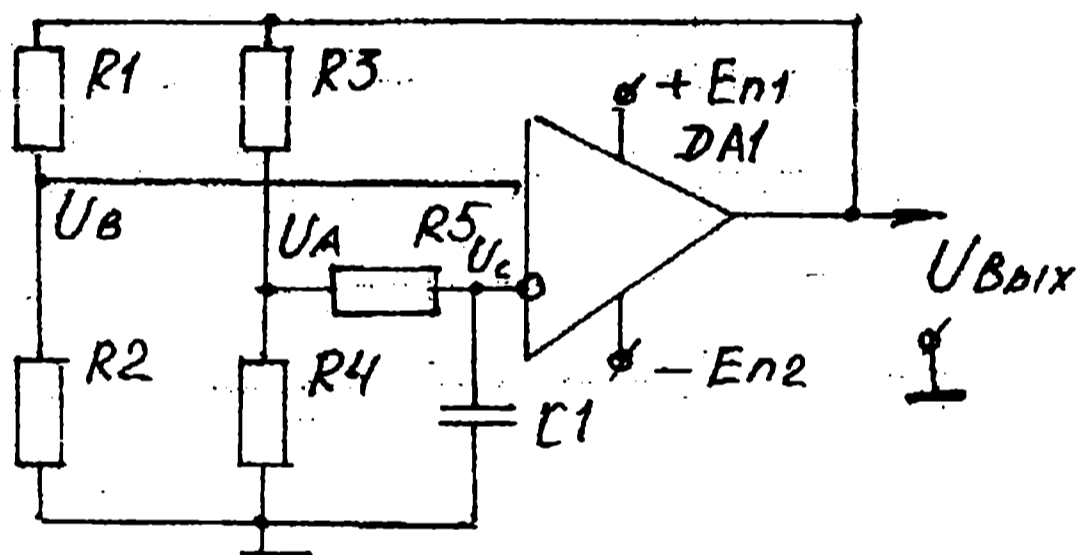


Рис. 23. Генератор

Опрокидывание компаратора $DA1$ происходит тогда, когда напряжение U_C достигнет уровня U_B . Полярность напряжений U_A и U_B соответствует разности входных напряжений $(U_B - U_A)$.

Нарастание и спад напряжения U_C происходит по экспоненциальному закону, как показано на временных диаграммах (рис. 24).

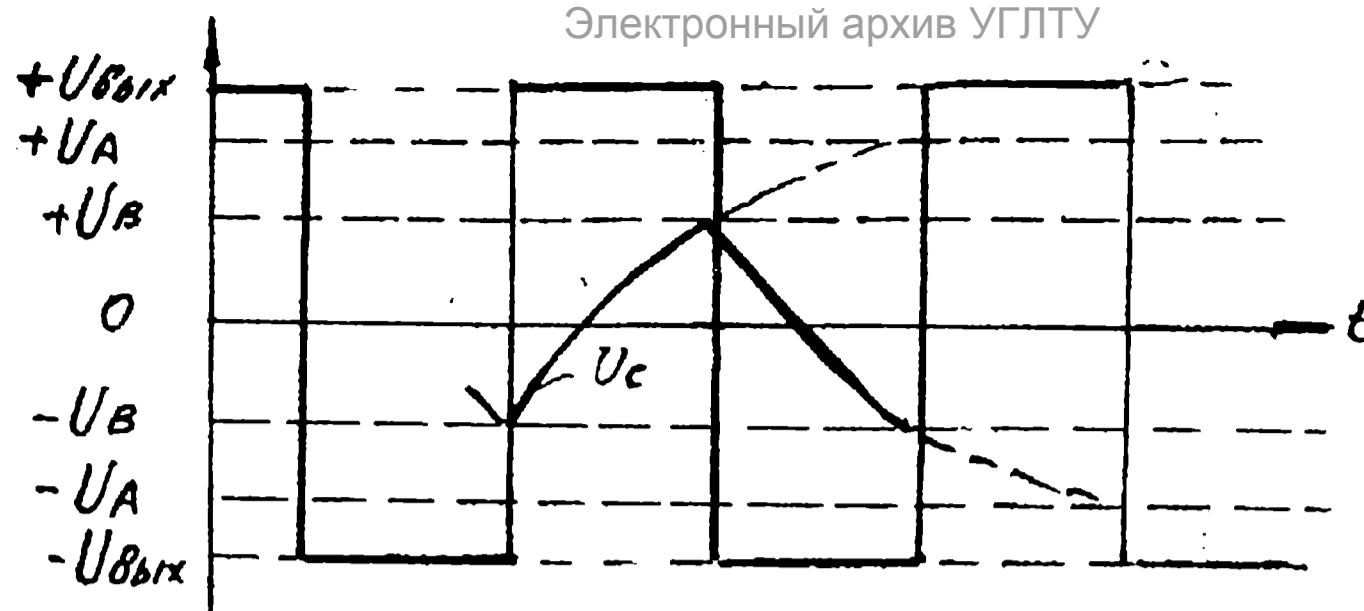


Рис. 24. Временные диаграммы генератора

$$U_C^+ = (U_A + U_B) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad \text{при нарастании напряжения} \quad (1)$$

$$U_C^- = (U_A + U_B) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{при спаде напряжения} \quad (2)$$

$$\tau = R_{\text{экв}} \cdot C1 \quad , \text{ где } R_{\text{экв}} = R5 + \frac{R3 \cdot R4}{R3 + R4} .$$

Сопротивления резисторов должны быть подобраны таким образом, чтобы $[U_A] > [U_B]$ - это необходимое условие работы генератора. Связь между частотой и параметрами генератора можно выявить из уравнений (1) или (2). Согласно рис. 24 напряжение на конденсаторе достигнет величины $(U_A - U_B)$ относительно уровня $-U_A$ через время $t = \frac{T}{2}$. Поэтому, полагая, что $t = \frac{T}{2}$ в выражении (2),

получим: $T = 2 \cdot \tau \cdot \ln \frac{U_A + U_B}{U_A - U_B};$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \tau \cdot \ln \frac{U_A + U_B}{U_A - U_B}} \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что частота не зависит от напряжения питания.

Таблица 1

Технические характеристики ОУ

Тип ОУ	$\pm E_{\text{нум}},$ В	Токтр, мА	Кус, раз/с	Смещ, мВ	$\pm U_{\text{вых}},$ В	Rнагр, ком. ($I_{\text{вых}}, \text{мА}$)	Схема см. прил 2
Универсальные ОУ							
КР140УД6	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 2,8$	$70 \cdot 10^3$	≤ 5	± 11	(≤ 25)	Рис. 2
КР140УД7	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 2,8$	$50 \cdot 10^3$	≤ 4	$\pm 11,5$	(≤ 20)	Рис. 1
КР140УД9	$\pm(12,5 \pm 1,26)$	≤ 8	$35 \cdot 10^3$	≤ 5	± 10	(≤ 22)	Рис. 2
КР140УД14	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 0,6$	$50 \cdot 10^3$	≤ 2	± 13	(≤ 20)	Рис. 5
КР140УД18	$\pm(15 \pm 1,5)$	≤ 4	$50 \cdot 10^3$	≤ 10	± 11	≥ 2	Рис. 2
КР140УД22	$\pm(15 \pm 1,5)$	≤ 10	$25 \cdot 10^3$	≤ 10	-	-	-
Прецизионные ОУ							
К140УД17А	$\pm(15 \pm 1,5)$	≤ 5	$200 \cdot 10^3$	$\leq 0,0775$	± 10	(≤ 6)	Рис. 3
140УД21	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 5,5$	$1 \cdot 10^3$	$\leq 0,06$	$\pm 10,5$	≥ 2	Рис. 2
140УД26А	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 4,7$	$1 \cdot 10$	$\leq 0,026$	± 12	≥ 2	Рис. 3

67

Технические характеристики регулируемых микро мощных ОУ

Тип ОУ	$\pm U_{\text{пит}},$ В	$I_{\text{потр}},$ мкА	$K_{\text{усил}},$ разы	$\varrho_{\text{см}},$ мВ	$\pm U_{\text{вых}},$ В	$R_{\text{нагр}}, \text{кОм}$ ($I_{\text{вых}}, \text{мА}$)	Схема см. прил 2
К1423УД1	$\pm(1,3 \pm 0,13)$		$10 \cdot 10^3$	≤ 5	$\pm 1,1$	(≤ 6)	Рис. 2
КР1409УД2	$\pm(1,5 \dots 15)$	≤ 30	$50 \cdot 10^3$	≤ 5	$\pm(1,2 \dots 12)$	($\leq 2,9$)	Рис. 1
154УД1	$\pm(15 \pm 0,5)$	≤ 120	$200 \cdot 10^3$	≤ 5	± 12	≥ 2	Рис. 2
КР1407УД3	$\pm(2 \dots 12)$	$\leq 2 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	≤ 5	$\pm(1,8 \dots 8)$	($\leq 2,5$)	Рис. 4
КР1407УД2	$\pm(12 \pm 1,2)$	≤ 100	$50 \cdot 10^3$	≤ 5	± 10	≥ 2	Рис. 4
Мощные и высоковольтные ОУ							
КР1408УД1	$\pm(27 \pm 2,7)$	$\leq 5 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	≤ 8	± 19	(≤ 100)	Рис. 2
1422УД1	$\pm(15 \pm 1,5)$	$\leq 25 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	≤ 5	± 12	(≤ 1000)	-

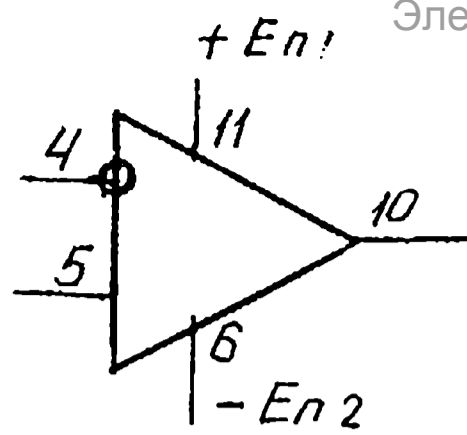


Рис. 1
 КР 140УД7
 КР 140УД12

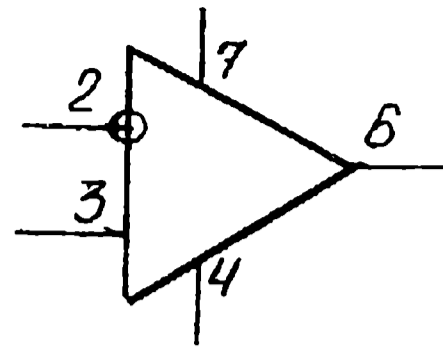


Рис. 2
 КР 140УД18
 140УД21
 154УД1
 КР 140УД1
 КР 1408УД1
 КР 140УД6
 К 1423УД1

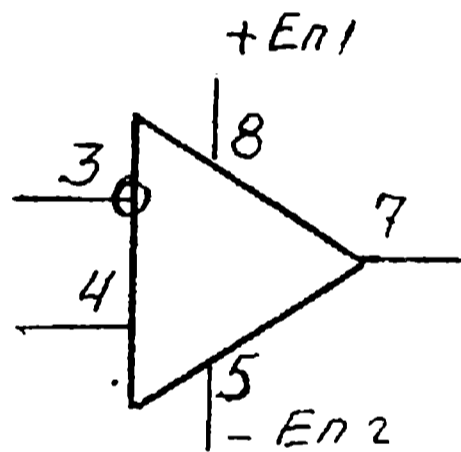


Рис. 3
 КР 140УД17А
 140УД26А

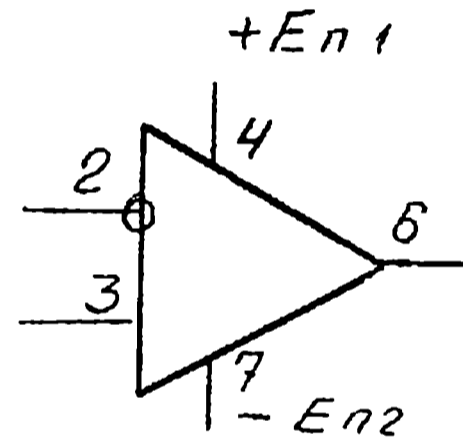


Рис. 4
 КР 1407УД2
 КР 1407УД3

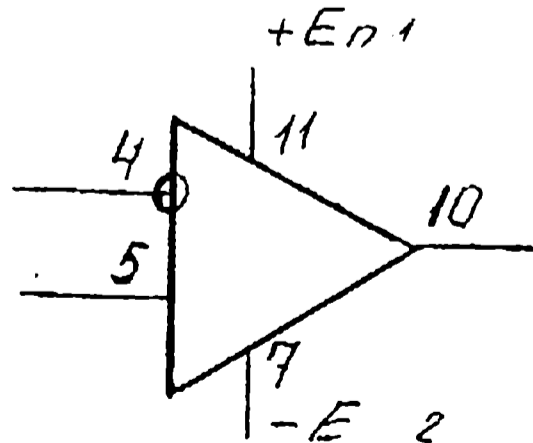


Рис. 5
 КР140УД14
 21