

## ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Исследовать экспериментально параметры и характеристики операционных усилителей (ОУ).

1.2. Изучить особенности включения и свойства операционных усилителей, охваченных обратной связью и обеспечивающих выполнение различных математических операций над входными сигналами.

## 2. КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ К РАБОТЕ

**2.1. Общие сведения.** Операционными усилителями называют высококачественные усилители постоянного тока (УПТ), предназначенные для выполнения различных операций над аналоговыми величинами. Они выполняются в виде интегральных микросхем, имеют высокий коэффициент усиления, дифференциальный вход и несимметричный выход.

Условные обозначения ОУ приведены на рис. 1. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно выходного напряжения, называется инвертирующим и обозначается знаком инверсии  $^\circ$ , а вход, напряжение на котором совпадает по фазе с выходным напряжением, - неинвертирующим. Для повышения информативности допускается введение дополнительных полей с выводами балансировки (NC), частотной коррекции (FC) и напряжения питания (рис. 1, б).

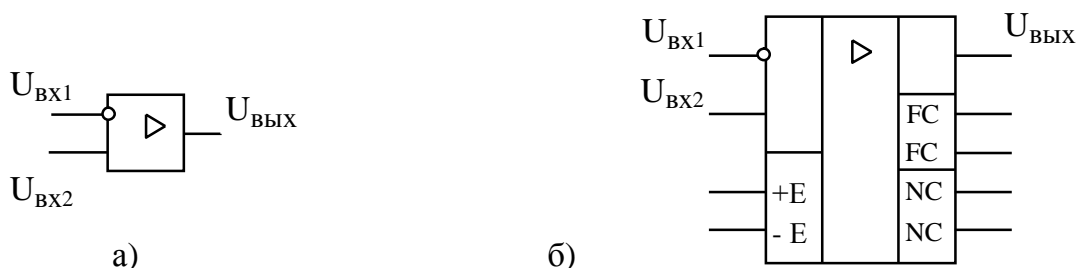


Рис. 1. Условное обозначение ОУ без дополнительного поля (а) и с дополнительными полями (б)

Характерной особенностью ОУ является то, что входные сигналы подаются относительно одной общей шины (общей точки источников напряжения  $+E$  и  $-E$ ), относительно которой снимается выходной сигнал. Общая шина на структурных схемах обычно не показывается. При нулевых входных напряжениях выходной сигнал равен нулю. Источники входного сигнала и нагрузку можно непосредственно подключать к выводам ОУ, не заботясь о разделении переменной и постоянной составляющих.

Общее представление о схемотехнике ОУ дает рис. 2, на котором приведена упрощенная схема ОУ типа  $\mu A741$  (аналог 140УД6). Входной каскад выполнен по схеме дифференциального усилителя на p-n-р транзисторах VT1 и VT2.

Управляемый источник тока (VT3 и VT4) служит в качестве сопротивления нагрузки транзистора VT2. Транзистор VT4 совместно с транзистором VT3 образует по отношению к коллекторному току транзистора VT1 так называемую схему токового зеркала. Коллекторный ток  $I_{K1}$  транзистора VT1 передается в выходную цепь. Для выходного тока входного каскада можно записать следующее соотношение:  $I = I_{K1} - I_{K2}$ . Благодаря тому, что выходным сигналом дифференциального каскада является разностный ток, синфазные изменения коллекторных токов входных транзисторов взаимно компенсируются, что значительно ослабляет синфазные входные сигналы.

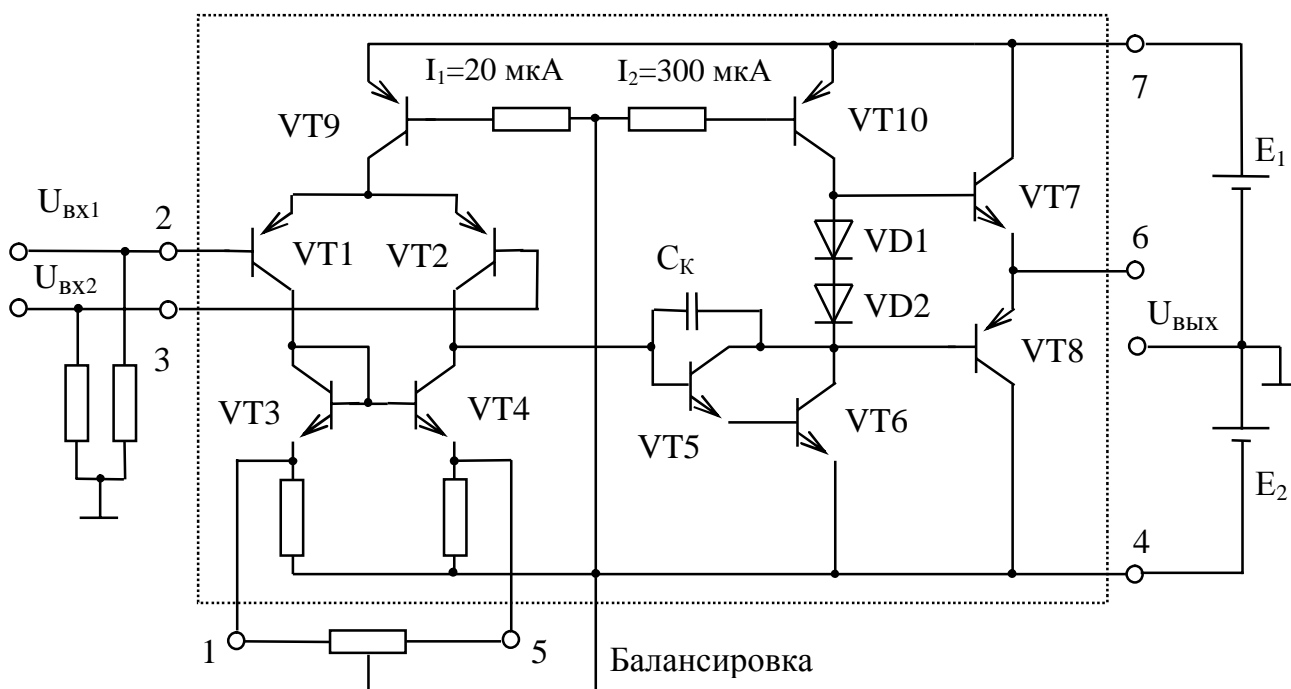


Рис. 2. Принципиальная схема интегрального операционного усилителя  $\mu A741$

Эмиттеры транзисторов VT3 и VT4 подключены к внешним выводам (NC) интегральной микросхемы, которые служат для установки нулевой точки. При помощи внешнего резистора, подключенного к этим выводам, можно изменять соотношение между токами коллекторов транзисторов VT1 и VT2.

Второй каскад усиления образует составной транзистор VT5, VT6. Он включен по схеме с общим эмиттером и имеет в качестве нагрузочного сопротивления источник тока.

Конденсатор  $C_k$  предназначен для коррекции частотной характеристики. Частотная коррекция необходима для того, чтобы устранить автоколебания, которые могут возникнуть при введении обратной связи. Внутренней коррекции не всегда бывает достаточно для обеспечения устойчивости. Поэтому ее дополняют внешними цепями коррекции, подключая к выводам FC дополнительный конденсатор  $C_k$ .

Выходной каскад образуют транзисторы VT7 и VT8. Они включены по схеме комплементарного эмиттерного повторителя с малым током покоя (двухтактное включение в режиме АБ).

На транзисторах VT9 и VT10 выполнены источники тока. Базовые цепи показаны условно.

## 2.2. Параметры и характеристики операционных усилителей

Параметры и характеристики ОУ можно условно разделить на входные, выходные и характеристики передачи.

2.2.1. К основным входным параметрам относят: напряжение смещения нуля; входные токи и сопротивления; коэффициент ослабления синфазного сигнала; температурный дрейф напряжения смещения нуля и входных токов и др.

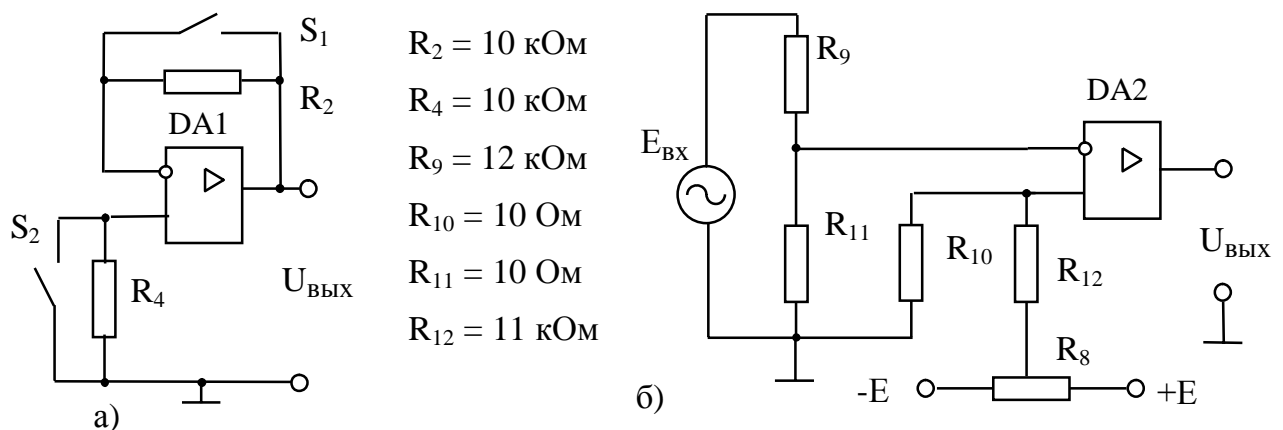
*Напряжение смещения нуля*  $U_{см}$  - это потенциал на выходе усилителя при нулевом входном сигнале, который поделен на коэффициент усиления усилителя. Данный параметр показывает, какой источник напряжения необходимо подключить к входу ОУ для того, чтобы на выходе получить  $U_{вых} = 0$ . Если ОУ включить со 100%-ной обратной связью, то коэффициент усиления его будет равен единице, а выходное напряжение равно  $U_{см}$  (рис. 3, а; ключи S1 и S2 замкнуты). Значение  $U_{см}$  - 1 мВ - десятки мВ.

*Входные токи* обеспечивают нормальный режим работы входного дифференциального каскада на биполярных транзисторах. Если к обоим входам ОУ подключены источники сигналов с разными внутренними сопротивлениями, то входные токи создают разные падения напряжения на этих внутренних сопротивлениях. Между входами ОУ появится дифференциальный сигнал, изменяющий выходное напряжение. С целью его уменьшения сопротивления, подключаемые к обоим входам, следует брать по возможности одинаковыми.

Измерение входных токов осуществляется по схеме, показанной на рис. 3, а. При размыкании ключа S1 коэффициент усиления по напряжению остается равным единице, а входное напряжение  $U_{вх1}$  за счет падения напряжения на сопротивлении изменится на  $\Delta U_{вх1} = I_{вх1} R_2$ . Выходное напряжение достигает значения  $U_{вых1}$ . А так как коэффициент усиления по напряжению равен единице, то справедливо равенство  $\Delta U_{вх1} = U_{вх1} - U_{см} = I_{вх1} R_2$ .

Отсюда ток первого входа определится из выражения  $I_{вх1} = (U_{вх1} - U_{см})/R_2$ .

Входной ток второго входа определяют аналогично при разомкнутом S2 и замкнутого S1:  $I_{вх2} = (U_{вх2} - U_{см})/R_4$ .



Входное сопротивление для дифференциального сигнала  $R_{вх \text{ диф}}$  - это полное входное сопротивление со стороны любого входа, в то время как другой вход соединен с общим выводом. У операционного усилителя К140УД6  $R_{вх \text{ диф}} = 2 \text{ МОм}$ .

2.2.2. К группе характеристик передачи ОУ можно отнести коэффициент усиления по напряжению, скорость нарастания выходного напряжения, амплитудно-частотную характеристику.

Коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  ОУ может быть определен экспериментально по схеме рис. 3, б, когда на вход ОУ, не охваченного цепью обратной связи, подается известное напряжение и определяется выходное напряжение. Напряжение смещения нуля, усиливаясь в  $K_u$  раз, может привести к насыщению ОУ. Поэтому перед началом измерений при  $E_{вх} = 0$  с помощью резистора  $R_8$  необходимо выставить нулевое выходное напряжение.

Входное напряжение  $E_{вх}$  при данной схеме измерений берется низкочастотным (20 Гц). Коэффициент усиления  $K_u$  с учетом входного делителя напряжений ( $R_9, R_{11}$ ) определяется выражением

$$K_u = U_{вых} (R_{11} + R_9) / E_{вх} R_{11}.$$

Следует отметить, что ОУ без цепей обратной связи применяют крайне редко из-за температурной нестабильности напряжения смещения и коэффициента усиления  $K_u$ . Эта нестабильность может вызвать насыщение выходного каскада ОУ и он станет неработоспособным.

Скорость нарастания выходного напряжения - это максимальная скорость изменения выходного сигнала при максимальном значении его амплитуды. При измерении скорости нарастания ОУ включается в схему (рис. 4, а), обеспечивающую единичное усиление, и на его вход подается напряжение прямоугольной формы, амплитуда которого такова, что выходной каскад попадает в область насыщения (рис. 4, б). Скорость нарастания  $V_{вых}$  определяется как тангенс угла наклона участка, заключенного между минимальным и максимальным значениями выходного сигнала, и имеет размерность В/мкс.

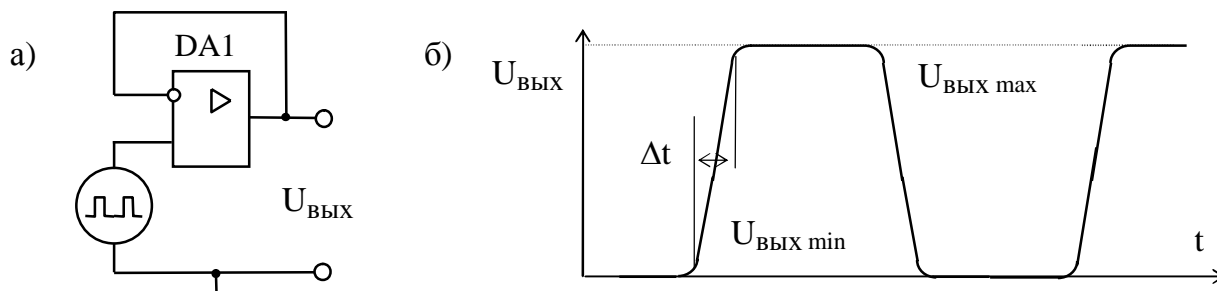


Рис. 4. Схема для определения скорости нарастания  $V_{вых}$  (а) и определение ее по результатам измерений (б)

Амплитудно-частотная характеристика ОУ обычно приводится в виде графика, построенного в логарифмическом масштабе (рис. 5). Причем у ОУ с внутренней коррекцией ЛАЧХ за частотой среза  $f_{ср}$  можно аппроксимировать прямой, имеющей наклон 20 дБ/дек.

2.2.3. К группе выходных параметров относятся выходное сопротивление, напряжение и ток выхода.

Максимальные выходные напряжение и ток, а также минимальное допустимое сопротивление нагрузки указываются в технических условиях на ОУ. Для измерения выходного сопротивления  $R_{вых}$  можно использовать схему рис. 3, б. Перед началом измерений при  $E_{вх} = 0$  с помощью резистора  $R_8$  необходимо выставить нулевое

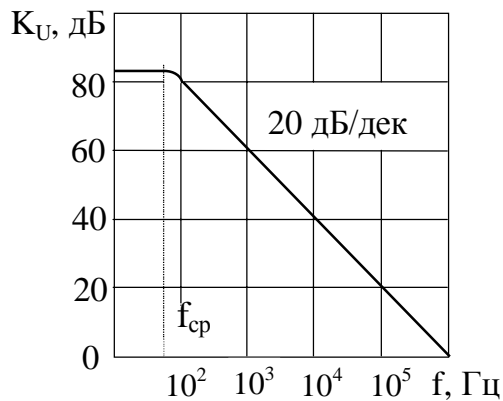


Рис.5. Амплитудно-частотная характеристика усилителя без ОС

выходное напряжение. Затем подается входное напряжение, и на выходе ОУ измеряются два напряжения при отключенном и подключенном сопротивлении  $R_H$ . Выходное сопротивление усилителя вычисляется по формуле

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_H(U_{\text{ХХ}} - U_H) / U_H,$$

где  $U_{\text{ХХ}}$  - выходное напряжение холостого хода (нагрузка отключена), а  $U_H$  - выходное напряжение усилителя при подключенной нагрузке.

### 2.3. Операционные усилители, охваченные обратной связью

На практике операционные усилители используются с обратными связями, которые изменяют их амплитудно-частотные характеристики. В ОУ обратная связь отрицательная, если она подается с выхода усилителя на инвертирующий вход. И наоборот, обратная связь является положительной, если она подается на неинвертирующий вход.

На рис. 6 приведены схемы реализации отрицательной обратной связи (ОС) в операционных усилителях. При подаче входного напряжения на неинвертирующий вход ОУ (рис. 6, а), охваченного ОС с коэффициентом  $\gamma$ , равным  $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2)$ , коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = K_y / (1 + \gamma K_y) = K_y / [1 + K_y R_1 / (R_1 + R_2)]$$

$$\text{При } K_y R_1 / (R_1 + R_2) \gg 1, \quad K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

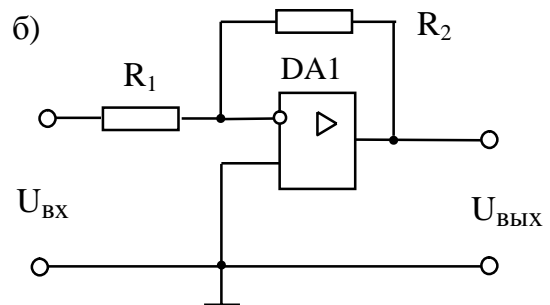
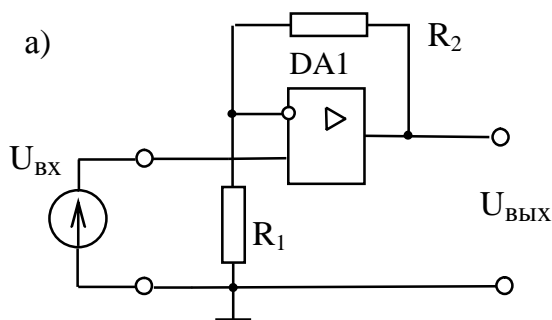


Рис. 6. Включение ОУ с подачей входного напряжения на неинвертирующий (а) и инвертирующий (б) входы

Коэффициент усиления ОУ, охваченного отрицательной ОС, при большом значении  $K_y$  определяется только сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$  и мало зависит от колебаний  $K_y$ .

Так как в рассматриваемом случае сигнал ОС вводится последовательно с входным напряжением, входное сопротивление для дифференциального сигнала увеличивается в  $1 + \gamma K_y$  раз

$$R_{\text{ВХ ОС}} = R_{\text{ВХ}} (1 + \gamma K_y).$$

Сигнал обратной связи снимается пропорциональным выходному напряжению, поэтому выходное сопротивление уменьшается в  $1 + \gamma K_y$  раз

$$R_{\text{ВЫХ ОС}} = R_{\text{ВЫХ}} / (1 + \gamma K_y).$$

При подаче входного напряжения на инвертирующий вход (рис. 6, б) вводится параллельная отрицательная ОС по напряжению. Если  $\gamma K_u \gg 1$ , то коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = - \frac{R_2}{R_1}.$$

Разность потенциалов между входами ОУ достаточно мала. Напряжение на неинвертирующем входе отличается от напряжения на инвертирующем входе на величину  $\Delta U = U_{\text{вых}} / K_u$ . Поэтому можно считать, что потенциал инвертирующего ввода равен нулю (виртуальный нуль).

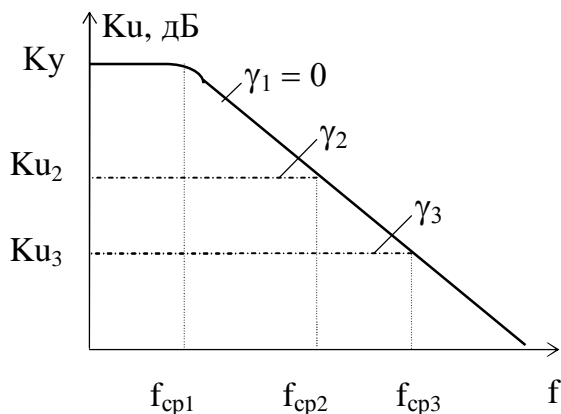


Рис. 7. ЛАЧХ усилителя без ОС и с ОС разной глубины

Тогда входное сопротивление

$$R_{\text{вх ос}} = R_1.$$

Выходное сопротивление определяется так же, как и для предыдущей схемы.

При введении ОС амплитудно-частотная характеристика усилителя зависит от параметров элементов цепи ОС. Так, если элементы активные сопротивления, то введение обратной связи с коэффициентом ОС  $\gamma_2$  или  $\gamma_3$  приводит к уменьшению коэффициента усиления по напряжению и повышению в  $1 + \gamma K_u$  раз частоты среза (рис. 7).

## 2.4. Масштабные усилители.

Усилители, имеющие точное нормированное значение коэффициента усиления, называют масштабными. При их создании применяют ОУ, включенные по схеме рис. 6, используя чисто активные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  для создания отрицательной обратной связи. По схеме рис. 6,а выполняют неинвертирующий усилитель, а по схеме рис. 6, б - инвертирующий.

На основе инвертирующего усилителя можно выполнить суммирующее устройство (рис. 8, а). В нем отсутствует взаимное влияние входных сигналов. Это происходит потому, что инвертирующий вход имеет практически нулевой потенциал. Выходное напряжение такого усилителя

$$U_{\text{вых}} = - (U_{\text{вх1}} R_2 / R_1 + U_{\text{вх2}} R_2 / R_5).$$

В инвертирующих усилителях неинвертирующий вход обычно соединен с общей точкой через резистор  $R_3$ . Он не влияет на коэффициент усиления и вводится для уменьшения изменений выходного напряжения, вызванных временными или температурными колебаниями входных токов. Сопротивление  $R_3$  выбирают таким, чтобы эквивалентные сопротивления, подключенные к входам ОУ, были одинаковы. Для схемы рис. 8, а  $R_3 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_5$ .

При одновременной подаче напряжения на оба входа инвертирующего усилителя получается вычитающий усилитель (рис. 8, б). При определении выходного напряжения справедлив принцип наложения для каждого входного сигнала

$$U_{\text{вых}} = - U_{\text{вх1}} R_2 / R_1 + U_{\text{вх2}} [ (R_1 + R_2) / R_1 ] [ R_4 / (R_3 + R_4) ].$$

При выполнении условия  $R_2 R_3 = R_1 R_4$ , усилитель становится дифференциальным и усиливает разность напряжений, приложенных к входам:

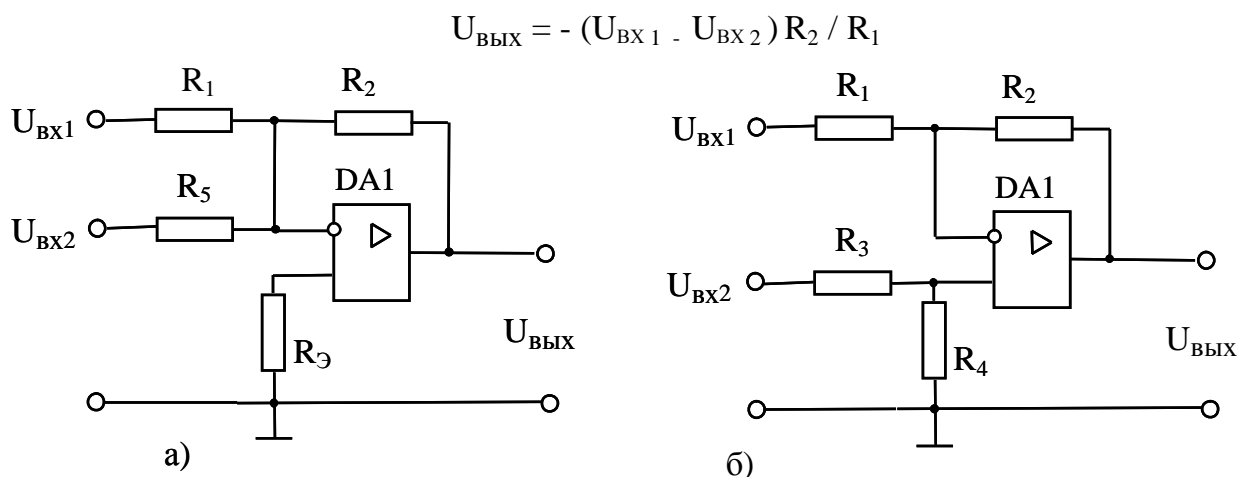


Рис. 8. Схемы сумматора напряжений (а) и вычитающего устройства (б)

**2.5. Преобразователи напряжение - ток.** Электронные усилители, имеющие большие входное и выходное сопротивления, называются преобразователями напряжение - ток. Для них входным сигналом является напряжение, а выходным - ток. Малое изменение выходного тока при подключении различных сопротивлений нагрузки получается за счет большого собственного выходного сопротивления, или за счет использования обратной связи по току.

Схема простейшего преобразователя напряжение - ток приведена на рис. 9, а. Эту схему применяют тогда, когда нагрузка гальванически не связана с землей. Ее работа основана на использовании равенства токов, подходящих и уходящих от инвертирующего входа ОУ ( $i_{\text{ВХ}} + i_{\text{Н}} = 0$ ). Поэтому ток в нагрузке  $i_{\text{Н}}$  задается резистором  $R_1$ .  $i_{\text{Н}} = - U_{\text{ВХ}} / R_1$ .

На рис. 9, б изображен преобразователь напряжение - ток, в котором реализована идея увеличения выходного напряжения на величину падения напряжения на нагрузке. При  $R_{\text{Н}} = 0$  ток нагрузки  $i_{\text{Н}} = - U_{\text{ВХ}} R_2 / R_5 R_7$ . Если  $R_{\text{Н}} \neq 0$ , то на нем падает напряжение  $U_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} i_{\text{Н}}$  и выходное напряжение усилителя необходимо увеличить на это значение. Параметры резисторов можно определить из условия получения единичного усиления напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  при отсутствии нагрузки. Если  $R_2 / R_5 = R_7 / R_6$  ток нагрузки не зависит от изменений  $R_{\text{Н}}$  и равен  $i_{\text{Н}} = - U_{\text{ВХ}} / R_6$ .

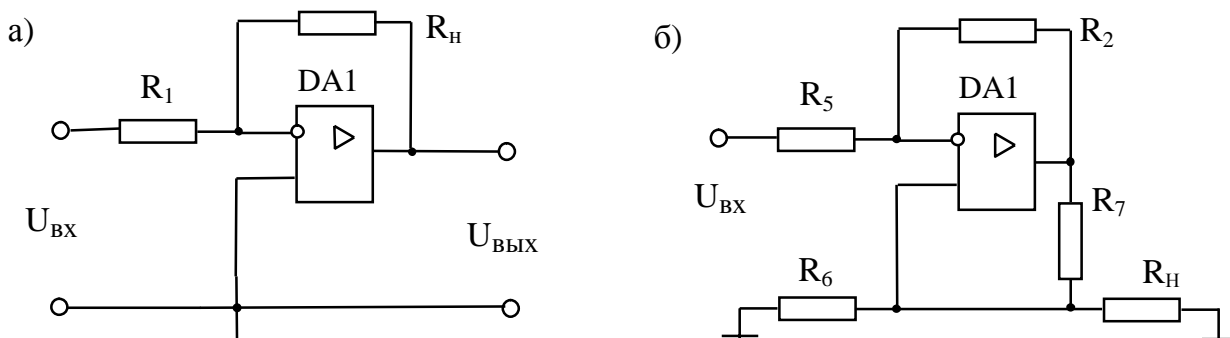


Рис. 9. Преобразователи напряжение - ток с изолированной от общей шины (а) и заземленной (б) нагрузкой

**2.6. Фазосдвигающие устройства.** Эти устройства используют для получения напряжений, сдвинутых по фазе на определенный угол. Их применяют в составе фильтров и автогенераторов гармонических колебаний, а также для управления тиристорными преобразователями.

При создании фазосдвигающих устройств часто применяют RC - цепи интегрирующего (рис. 11, а) и дифференцирующего (рис. 10, а) типов. Коэффициенты передачи этих цепей соответственно равны

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 1 / (1 + j\omega RC) = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2}} e^{j\varphi_1};$$

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = j\omega RC / (1 + j\omega RC) = \sqrt{\frac{(\omega RC)^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}} e^{j\varphi_2},$$

где  $\varphi_1 = -\arctg \omega RC$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ - \arctg \omega RC$ .

RC - цепь интегрирующего типа обеспечивает отставание по фазе выходного напряжения на угол  $\varphi_1$ , а RC - цепь дифференцирующего типа - опережение по фазе на угол  $\varphi_2$ . Значения углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  зависят от параметров R и C и могут меняться в пределах от 0 до  $90^\circ$ . При этом существенно меняется амплитуда выходного напряжения, определяемая модулем коэффициента передачи.

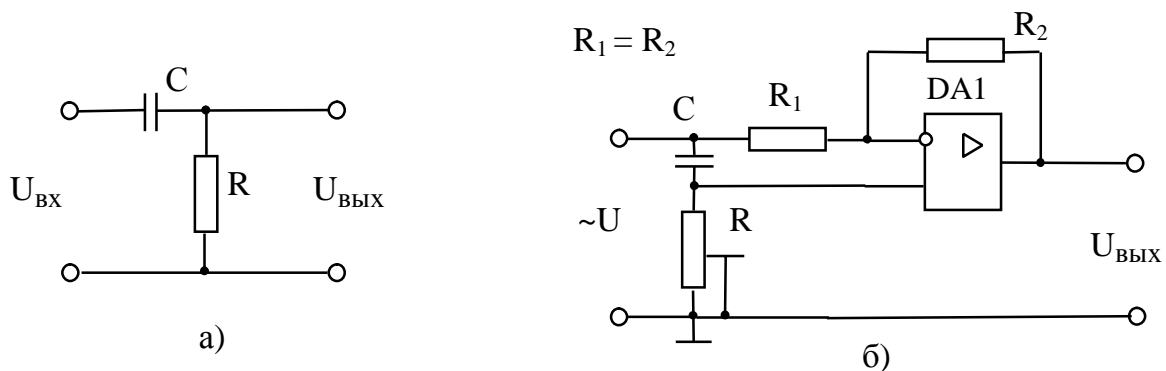


Рис. 10. Дифференцирующая RC- цепь (а) и фазосдвигающее устройство на основе ОУ (б)

При использовании ОУ можно создать простые фазосдвигающие устройства, у которых амплитуда выходного сигнала постоянна, а фаза может быть изменена в пределах  $180^\circ$  (рис. 10, б). Сигнал на неинвертирующем входе ОУ

$$U_{\text{ВХ}1} = U R / [R + 1 / (j\omega C)] .$$

Так как у идеализированного ОУ  $U_{\text{ВХ}1} = U_{\text{ВХ}2}$ , а  $R_{\text{ВЫХ}} = 0$  то ток резистора  $R_1$  определяют из уравнения

$$I = (U - U_{\text{ВХ}1}) / R_1 = (U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{ВЫХ}}) / R_2, \text{ откуда } U_{\text{ВЫХ}} = 2U_{\text{ВХ}1} - U.$$

Подставив выражение для  $U_{\text{ВХ}1}$  и выполнив преобразования, получим

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U = (1 - j\omega RC) / (1 + j\omega RC)$$

Таким образом, коэффициент передачи по напряжению не зависит от значения сопротивления R, а фаза выходного напряжения при изменении R от нуля до бесконечности меняется в пределах от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ .

Резистор R и конденсатор C можно поменять местами, при этом от изменения R фаза выходного напряжения меняется в пределах от 0 до  $180^\circ$ .

## 2.7. Интегрирующие устройства

2.7.1. *Пассивные линейные интегрирующие цепи.* Обычная RC - цепь является наиболее простым интегрирующим устройством. Если в момент времени  $t = 0$   $U_{\text{ВЫХ}} = 0$  напряжение на выходе такой цепи

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{RC} \int_0^t (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}) dt.$$

$$\text{Если } |U_{\text{ВЫХ}}| \ll |U_{\text{ВХ}}|, \text{ то } U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt.$$

При  $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$   $U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}} t / RC$ . Следовательно, при использовании RC - цепи для интегрирования входного сигнала необходимо, чтобы ее постоянная времени  $\tau = RC$  была много больше времени интегрирования  $t$ .

Рассмотрим прохождение прямоугольного импульса с максимальным значением  $U_{\text{ВХ}}$  через интегрирующую RC - цепь (рис. 11, б). Выходное напряжение нарастает по экспоненциальному закону

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}} (1 - e^{-t/\tau}).$$

Ошибка интегрирования при  $t = t_{\text{и}}$   $\Delta U = U_{\text{ВХ}} t_{\text{и}}^2 / 2\tau^2$ . Относительная погрешность интегрирования  $\delta = t_{\text{и}}/2\tau$ . Например, для интегрирования прямоугольного импульса с погрешностью, не превышающей 1%, необходимо брать такую цепь, постоянная времени которой в 50 раз больше длительности входного импульса, при этом максимальное выходное напряжение интегрирующей цепи в 50 раз меньше значения входного напряжения.

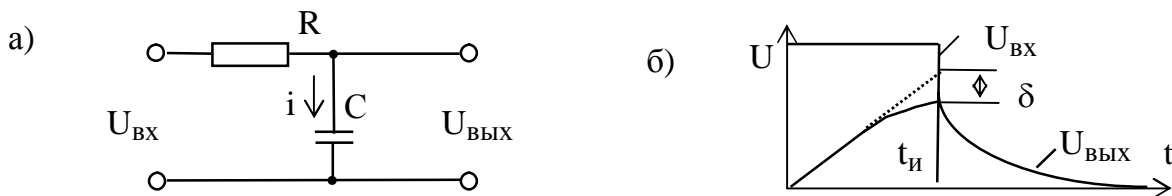


Рис. 11. Интегрирующая RC - цепь (а) и диаграммы входного и выходного напряжений (б)

В идеальном интеграторе выходной сигнал должен оставаться постоянным после окончания входного импульса. В рассматриваемой цепи он уменьшается и через промежуток времени  $(2 - 5) \tau$  равен нулю.

2.7.2. *Интеграторы на основе операционных усилителей.* Схема простейшего интегратора на ОУ показана на рис. 12, а. Так как коэффициент усиления ОУ велик, то при работе в линейном режиме разность потенциалов между его входами стремится к нулю. Не инвертирующий вход соединен с общей шиной, следовательно, потенциал инвертирующего входа близок к потенциалу общей шины. Входной ток  $i_R = U_{\text{ВХ}} / R$ . Этот ток при высоком входном сопротивлении ОУ полностью протекает через конденсатор С. Напряжение на конденсаторе  $U_c$  и выходное напряжение усилителя изменяются по закону

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt.$$

При подаче на вход скачка напряжения постоянного значения  $U_{ВХ} = \text{const}$

$$U_{ВЫХ}(t) = -U_{ВХ} t / RC = -U_{ВХ} t / \tau.$$

Таким образом, если ОУ близок к идеальному, то данная схема обеспечивает прецизионное интегрирование входного сигнала.

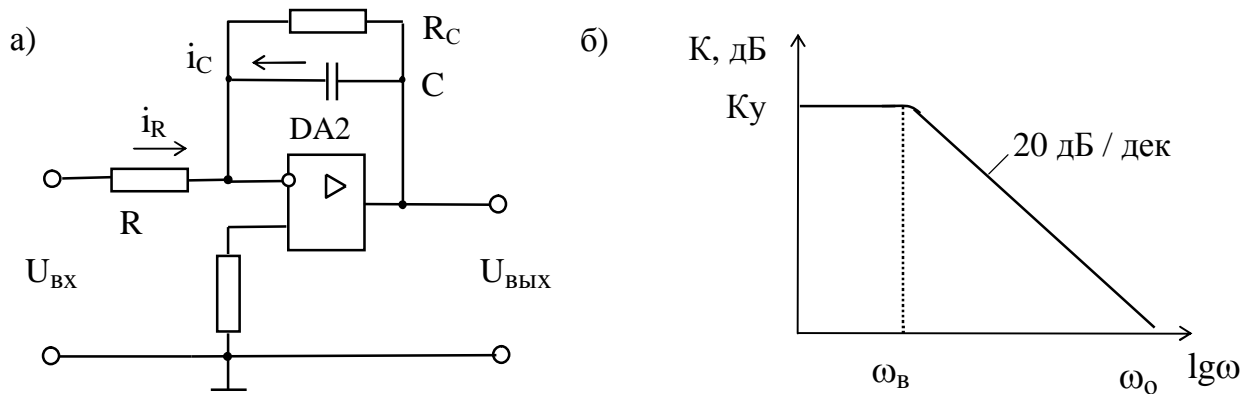


Рис. 12. Схема интегратора на ОУ (а) и его логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (б)

В реальном ОУ наличие напряжения смещения нуля  $U_{см}$  и входных токов приводит к ограничению максимальной длительности интегрирования полезного сигнала, так как с течением времени напряжение ошибки постепенно нарастает. В итоге ОУ может попасть в режим насыщения.

Перед началом интегрирования интеграторы необходимо “сбросить” на ноль, для этого параллельно конденсатору  $C$  включают электронный ключ, выполненный на полевом транзисторе. Длительность разряда конденсатора  $C$  зависит от его емкости и внутреннего сопротивления открытого транзистора.

В практических схемах интеграторов параллельно конденсатору  $C$  включают резистор  $R_C$ , при этом снижается коэффициент усиления по напряжению и, следовательно, смещение нуля выходного напряжения (рис. 12, а).

При конечном значении коэффициента усиления  $K_u = -R_C / R$  интегратор эквивалентен обычной  $RC$ -цепи, у которой значение емкости конденсатора  $C$  увеличено в  $1 + K_u$  раз, а падение напряжения на нем увеличено в  $K_u$  раз. Так, например, при подаче на вход постоянного напряжения выходное напряжение

$U_{ВЫХ}(t) = -U_{ВХ} t K_u / RC (1 + K_u)$ . Соответственно частота  $\omega_B$  на ЛАЧХ (рис 12, б) равна  $\omega_B = 1 / RC (1 + K_u)$ .

Так же как и в пассивной  $RC$ -цепи, при подаче на вход интегратора прямоугольного импульса напряжения, выходное напряжение изменяется по экспоненциальному закону, а погрешность интегрирования приблизительно в  $K_u$  раз меньше по сравнению с простой  $RC$ -цепью при тех же номиналах  $R$  и  $C$ .

Из-за конечного значения коэффициента усиления ОУ интегратор в полосе низких частот работает как усилитель. Только с частотой  $\omega_B$  начинают проявляться его интегрирующие свойства.

Интеграторы применяют при создании генераторов линейно изменяющегося напряжения, точных фазосдвигающих устройств, обеспечивающих получение  $90^\circ$  фазового сдвига, в качестве фильтров низких частот.

## 2.8. Детекторы электрических сигналов.

Принято различать детекторы средневыпрямленного, пикового и действующего (эффективного) значений.

**2.8.1. Детекторы средневыпрямленного значения** выполняются по схемам обычных выпрямительных устройств. При больших уровнях входного сигнала применяют пассивные преобразователи на полупроводниковых диодах. Диодные детекторы обладают значительной нелинейностью при малых входных сигналах, низкой точностью, изменением характеристик преобразования при смене диодов.

Значительно лучшие характеристики можно получить при использовании детекторов средневыпрямленного значения на основе ОУ. В них диоды включаются в цепь отрицательной ОС, при этом примерно в  $\gamma_{Ku}$  раз уменьшается входное напряжение, при котором диоды открываются.

На рис. 13, а изображен однополупериодный выпрямитель на основе инвертирующего усилителя. При подаче на вход отрицательного напряжения диод VD1 закрыт, а диод VD2 открыт. Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} R_{15}/R_{14}.$$

При положительной полярности входного напряжения открыт диод VD1. Выходное напряжение операционного усилителя равно напряжению на открытом диоде VD1 (для кремниевых диодов приблизительно - 0,6 В относительно общей точки). Диод VD2 закрыт и выход выпрямителя соединен через резистор  $R_{15}$  с инвертирующим входом ОУ, следовательно,  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ .

Если на вход подать напряжение синусоидальной формы, то на выход пройдут только положительные полуволны.

На рис. 13, б показан двухполупериодный выпрямитель, имеющий при любом знаке входного сигнала близкое к нулю выходное сопротивление. При  $U_{\text{ВХ}} < 0$  диод VD1 открыт, диод VD2 закрыт и выходное напряжение формируется в результате усиления инвертирующим усилителем на основе DA3 напряжения, поступающего с выхода повторителя на основе DA2.  $R_{15} = R_{16}$ , поэтому  $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}}$ .

При  $U_{\text{ВХ}} > 0$  сигнал проходит на выход через усилитель DA2, диод VD2, усилитель DA3, а обратная связь замыкается через резисторы  $R_{15}$  и  $R_{16}$  и общий коэффициент передачи равен единице. В результате  $U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВХ}}|$ .

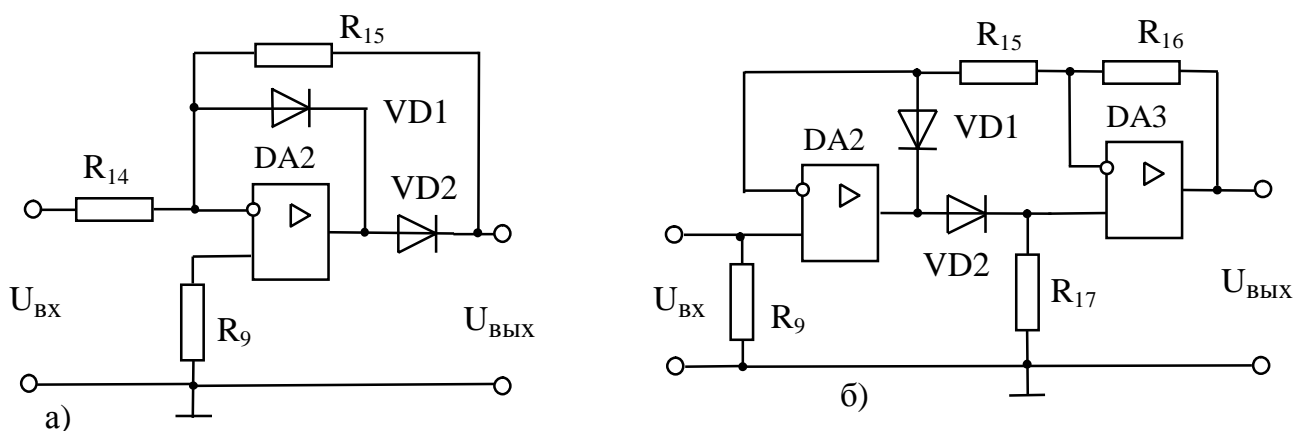


Рис. 13. Однополупериодный (а) и двухполупериодный (б) детекторы средневыпрямленных напряжений

**2.8.2. Пиковые детекторы.** Преобразователи электрических сигналов, выходное напряжение которых равно максимальному значению модуля входного сигнала, называют пиковыми или амплитудными детекторами.

Различают пиковые детекторы с открытым и закрытым входами. В детекторах с открытым входом выходной сигнал пропорционален сумме постоянной и максимального значения переменной составляющих входного напряжения. В детекторах с закрытым входом выходной сигнал пропорционален только переменной составляющей входного сигнала.

При больших входных напряжениях схемы пиковых детекторов выполняют на пассивных элементах, при этом  $U_{вх} \gg U_{пор}$ , где  $U_{пор}$  - пороговое напряжение, при котором открывается диод.

Пусть на вход пикового детектора с открытым входом (рис. 14, а) подано входное напряжение  $U_{вх}$ , имеющее постоянную составляющую  $U_0$  (рис. 14, б). При первой положительной полуволне диод VD открывается и конденсатор C заряжается до напряжения  $U_c = U_m + U_0$ . Как только напряжение, приложенное к диоду, становится меньше порогового, диод запирается и начинается разряд конденсатора через сопротивление нагрузки  $R_H$ .

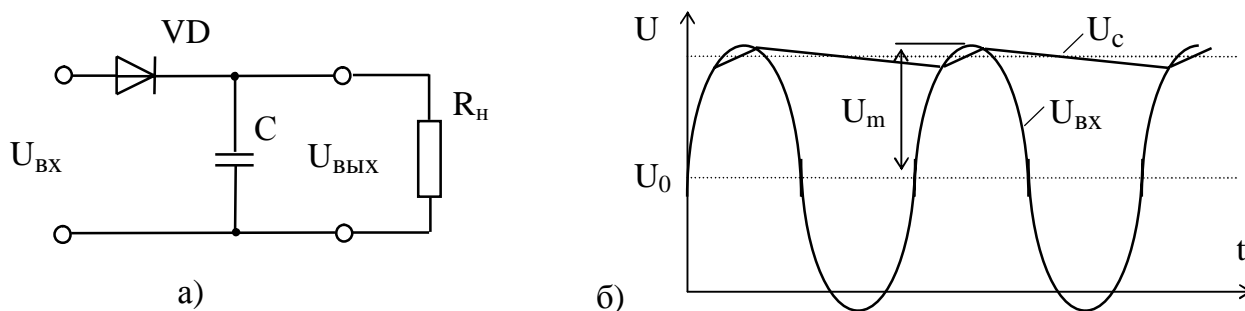


Рис. 14. Пиковый детектор с открытым входом (а) и диаграмма напряжений (б)

Для нормальной работы детектора необходимы малое сопротивление источника сигнала и большое сопротивление нагрузки, притом должны выполняться условия  $\tau_z \ll \tau_p = R_H C$  и  $\tau_p \gg T$ , где  $\tau_z$  и  $\tau_p$  - соответственно постоянные времени заряда и разряда конденсатора;  $T$  - длительность периода входного сигнала. При следующей положительной полуволне входного напряжения диод снова откроется на короткий промежуток времени и подзарядит конденсатор.

У пиковых детекторов с пассивными компонентами при малых входных напряжениях наблюдается существенная нелинейность характеристики преобразования.

В диапазоне частот до 100 кГц лучшими характеристиками обладают пиковые детекторы на основе операционных усилителей (рис. 15), при этом влияние порогового напряжения диода VD2 на выходной сигнал уменьшится примерно в  $K_y$  раз. При положительной полуволне входного сигнала диод смещается в прямом направлении, и конденсатор заряжается до напряжения

$$U_{вых} = U_{вх м} (1 - 1/K_y).$$

Постоянная времени цепи заряда конденсатора  $\tau_z = R_{вых} C / (1 + K_y)$ , где  $R_{вых}$  - выходное сопротивление ОУ.

При напряжении меньшем  $U_{вх\ m}$  диод VD2 запирается, и конденсатор разряжается обратным током диода. К конденсатору С подключен повторитель напряжения DA3 с большим входным сопротивлением, это повышает стабильность сохранения заряда на конденсаторе. Диод VD1 вводит отрицательную ОС для отрицательной полярности входного сигнала, по этому усилитель DA2 не попадает в ограничение и, следовательно, повышается его быстродействие.

Пиковые детекторы используются в импульсных вольтметрах и в электронных устройствах, в которых используется информация об экстремальных значениях сигнала.

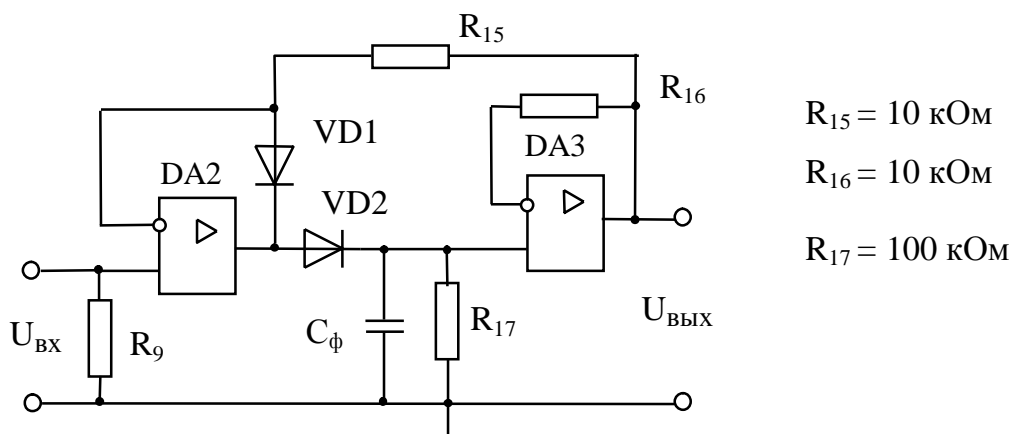


Рис. 15. Пиковый детектор с операционными усилителями

### 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы назначение и особенности ОУ ?
2. Из каких каскадов состоит схема усилителя К140УД6 ?
3. Как определить напряжение смещения нуля ?
4. Назовите входные и выходные параметры ОУ ?
5. Изобразите АЧХ разомкнуто ОУ с внутренней коррекцией.
6. Какие обратные связи применяют в ОУ ? .
7. Что такое масштабные усилители ?
8. Как определить коэффициент усиления по напряжению инвертирующего и неинвертирующего усилителей ?
9. Чему равно входное сопротивление инвертирующего усилителя и почему ?
10. Какие цепи обратной связи необходимо использовать в ОУ, чтобы получить инвертор и повторитель ?
11. Как изменяются характеристики ОУ при введении отрицательной обратной связи ?
12. Чему равно выходное напряжение вычитателя, если на оба входа подано одинаковое напряжение ?
13. Для чего нужны цепи балансировки и коррекции ?
14. Поясните работу ОУ в режиме преобразователя напряжение - ток.
15. В чем преимущества фазосдвигающих устройств на ОУ ?
16. Как определить относительную погрешность интегрирования RC -цепи ?
17. Изобразите АЧХ и ФЧХ интегратора.
18. Объясните работу двухполупериодного выпрямителя.

## 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Определить основные входные параметры операционного усилителя: напряжение смещения нуля и входные токи.

4.2. Определить выходное сопротивление ОУ.

4.3. Исследовать характеристики передачи ОУ: коэффициент усиления по напряжению, скорость нарастания выходного напряжения, амплитудно-частотную характеристику.

4.4. Исследовать инвертирующий и неинвертирующий усилители, сумматор напряжений, вычитающее устройство. Рассчитать коэффициенты усиления и сравнить с полученными данными.

4.5. Изучить преобразователи напряжение-ток и фазосдвигающие устройства.

4.6. Исследовать интеграторы и детекторы электрических сигналов на основе операционных усилителей.

## 5. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Операционные усилители и схемы, выполненные на их основе, расположены на макете. Питание операционных усилителей осуществляется от источника напряжения “Сура”. Подключение отдельных элементов осуществляется с помощью перемычек. В качестве источника сигнала используются генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109 и генератор импульсов Г5-54. Кроме того, в лабораторной работе используется электронно-лучевой осциллограф С1-55, универсальный вольтметр В7-35 и микроамперметр М2001.

Обозначение элементов на макете совпадает с обозначением элементов схем на рисунках раздела 2.

## 6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

**ВНИМАНИЕ !** Сборку схем на операционных усилителях проводить при выключенном источнике питания +/- 12 В.

### 6.1. Определение входных параметров ОУ.

Напряжение смещения  $U_{см}$  и входные токи определяются для операционного усилителя DA1. Схема для определения этих параметров изображена на рис. 3, а. Процедура измерения подробно изложена в пункте 2.1. Вместо ключей S1 и S2 используются перемычки со специальными зажимами.  $R = 10$  кОм.

### 6.2. Определение характеристик передачи.

Коэффициент усиления по напряжению и амплитудно-частотную характеристику определяют по схеме рис. 3, б в диапазоне частот от 20 Гц до 1 кГц.

Подключить генератор ГЗ-109 и установить  $E_{вх} = 100$  мВ. С учетом делителя напряжение на входе операционного усилителя  $U_{вх} = E_{вх} R_{11} / (R_{11} + R_9)$ .  $E_{вх}$  и выходное напряжения измерять цифровым прибором В7-35. При измерении напряжения  $U_{вых}$  для уменьшения помех от сетевого напряжения (50 Гц) одной рукой необходимо коснуться общей точки схемы. Коэффициент усиления выражать в децибелах (дБ)  $K_u = 20 \lg (U_{вых} / U_{вх})$ . При снятии АЧХ необходимо следить за искажениями выходного напряжения, подключив к выходу ОУ осциллограф С1-55.

Для определения скорости нарастания выходного напряжения  $V_{\text{ВЫХ}}$  на вход повторителя напряжения (рис. 4) с генератора Г5-54 подать импульсы положительной полярности амплитудой 7,5 В, длительностью 50 мкс и частотой повторения 10 кГц. Длительность фронта и амплитуду выходных импульсов измерять осциллографом.

**6.3. Выходное сопротивление** определяется для усилителя DA2, используя схему рис. 3, б. Входное напряжение  $E_{\text{ВХ}} = 50$  мВ частотой 20 Гц подается с выхода 1 генератора ГЗ-109 на вход делителя  $R_9, R_{11}$ . Выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$  рассчитать по формуле, приведенной в разделе 2.2.3. Сопротивление  $R_H = 2,4$  кОм подключать переключкой. При измерении выходных напряжений ОУ необходимо следить за искажениями выходного напряжения осциллографом С1-55.

#### 6.4. Исследование масштабных усилителей.

Усилители собираются на микросхеме DA1. Для неинвертирующего усилителя (рис. 6, а) определяется максимальное выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ МАХ}}$ , для этого с генератора ГЗ-109 на вход усилителя подается синусоидальное напряжение частотой 500 Гц. Плавное изменение амплитуды входного напряжения, следят за искажениями формы выходного напряжения по экрану осциллографа С1-55, подключенного к выходу усилителя. Амплитуда максимального неискаженного напряжения равна максимальному выходному напряжению  $U_{\text{ВЫХ МАХ}}$ .

Амплитудно-частотная характеристика снимается для двух, предварительно рассчитанных, коэффициентов усиления в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц. Коэффициент усиления выражать в децибелах (дБ)

$$K_U = 20 \lg (U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}).$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя  $R_{\text{ВХ ОС}}$  определить на частоте 1 кГц по формуле

$$R_{\text{ВХ ОС}} = R_{18} U_{\text{ВЫХ 2}} / (U_{\text{ВЫХ 1}} - U_{\text{ВЫХ 2}}),$$

где  $U_{\text{ВЫХ 1}}$  - выходное напряжение усилителя при подаче входного напряжения непосредственно на вход усилителя, а  $U_{\text{ВЫХ 2}}$  - при подаче напряжения через резистор  $R_{18} = 100$  кОм. В усилителе использовать  $R_5$  и  $R_2$ ,  $U_{\text{ВЫХ 1}} \approx 1$  В.

Сравнить полученное значение  $R_{\text{ВХ ОС}}$  с паспортным значением входного сопротивления  $R_{\text{ВХ}} = 2$  МОм.

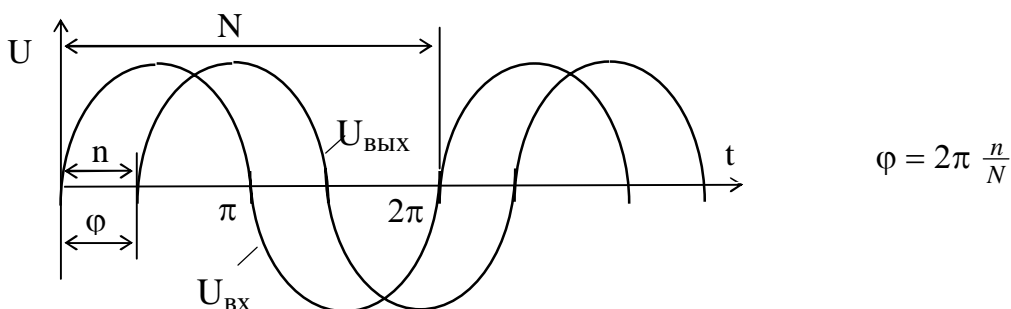


Рис. 16. Временные диаграммы напряжений при определении фазового сдвига

Для инвертирующего усилителя (рис. 6, б) для заданных  $R_1$  и  $R_2$  рассчитать коэффициент усиления  $K_u$ . Экспериментально определить коэффициент  $K_u$  и фазу выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  относительно входного напряжения  $U_{\text{ВХ}} = 1$  В частотой 1 кГц. Фаза выходного напряжения относительно входного определяется осциллографом С1-55, для этого входной сигнал подается на вход “Y1”, а выходной -

на вход “Y2” осциллографа. Угол фазового сдвига  $\varphi$  определяется из выражения, приведенного на рис. 16.

Собрать сумматор по схеме, приведенной на рис. 8, а. В качестве входных напряжений использовать падения напряжения на диодах VD3 и VD4. Соединить перемычками входы сумматора с анодами диодов. Измерить входные и выходное напряжения сумматора. Рассчитать выходное напряжение для данных значений резисторов и сравнить полученное значение с измеренным вольтметром В7-35. Определить относительную погрешность суммирования напряжений.

Собрать вычитающее устройство по схеме, приведенной на рис. 8, б. Подать на входы 1 и 2 напряжение с диодов VD3 и VD4. Измерить выходное напряжение и сравнить с расчетным. На оба входа подать одно и тоже напряжение, измерить входное и выходное напряжения. Определить относительную погрешность вычитающего устройства.

**6.5. Исследование преобразователя напряжение - ток.** Собрать на операционном усилителе DA1 схему преобразователя, изображенную на рис. 9, б. В качестве входного напряжения использовать падение напряжения на диоде VD4. Рассчитать выходной ток (ток нагрузки) по формуле, приведенной в подпункте 2.5. ( $R_2 = R_7 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_5 = R_6 = 1,6 \text{ кОм}$ ). Снять зависимость тока от сопротивления нагрузки  $R_H$ . Ток измерять прибором В7-35.  $R_H$  менять дискретно от 0 до 2,4 кОм.

**6.6. Фазосдвигающие устройства.** Рассчитать и определить экспериментально коэффициент передачи и угол фазового сдвига дифференцирующей RC - цепи для частоты  $f = 1 \text{ кГц}$  ( $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,05 \text{ мкФ}$ ). Измерения проводить при включенном источнике питания. В качестве источника сигнала использовать генератор ГЗ-109. Сравнить полученные данные с рассчитанными значениями. Для частоты входного сигнала 1 кГц снять зависимость амплитуды и фазы выходного напряжения от сопротивления R при его изменении от 150 Ом до 10 кОм.

Собрать фазосдвигающее устройство на операционном усилителе DA1 (рис. 10, б). Для частоты входного сигнала 1 кГц снять зависимость амплитуды и фазы выходного напряжения от сопротивления R, значения которого менять дискретно (5 - 7 точек, используя резисторы  $R_H$ ,  $R_4$ ,  $R_6$ ).

**6.7. Интегрирующие устройства.** Подать с генератора Г5-54 на интегрирующую RC-цепь (рис.11,а) прямоугольные импульсы напряжения амплитудой 4 В, длительностью импульса  $t_H = 1 \text{ мс}$ , и периодом повторения  $T = 100 \text{ мс}$ . В эксперименте использовать элементы  $R_3 = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,05 \text{ мкФ}$ . Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. Рассчитать относительную погрешность интегрирования.

Собрать на операционном усилителе DA2 интегратор, схема которого приведена на рис 12, а. Подать с генератора Г5-54 прямоугольные импульсы с параметрами, приведенными выше. Снять временные диаграммы входного и выходного напряжений и сравнить их с диаграммами для пассивной RC - цепи.

Подать на вход интегратора с генератора ГЗ - 109 напряжение 0,5В. Снять амплитудно-частотную характеристику интегратора. Определить фазу  $U_{\text{вых}}$  при частоте входного сигнала 1 кГц.

#### **6.8. Детекторы электрических сигналов.**

Для однополупериодного и двухполупериодного детекторов средне-выпрямленных напряжений (рис. 13) снять временные диаграммы  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  при

амплитуде входного напряжения 1,0 В частотой 200 Гц. Измерения проводить осциллографом.

6.8.1. На основе двухполупериодного детектора и микроамперметра М2001 с пределом измерения 200 мкА рассчитать вольтметр действующего значения с пределом измерения 1 В (Рис. 17). Собрать вольтметр и сравнить его показания с показаниями цифрового прибора В7-35. Определить погрешность измерения.

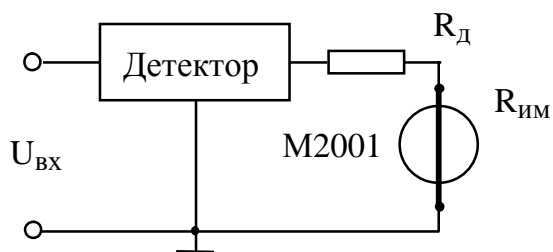


Рис. 17. Схема вольтметра

Добавочный резистор  $R_d$  рассчитывается по формуле

$$R_d = R_{им} \left( \frac{U}{k_f U_{cp}} - 1 \right), \text{ где}$$

$R_{им}$  - сопротивление измерительного механизма М2001;  $U$  - действующее значение измеряемого напряжения;  $k_f$  - коэффициент формы;  $U_{cp} = I_N R_{им}$  - номинальное среднее

значение напряжения на измерительном приборе при  $I_N$  - номинальном среднем токе через прибор.

6.8.2. Собрать *пиковый детектор*, изображенный на рис. 15. Снять зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$  при изменении амплитуды входного синусоидального напряжения от 0 до 5 В частотой 1 кГц. Входное и выходное напряжения измерять вольтметром В7-35 и наблюдать осциллографом.

Подать на вход детектора с генератора Г5-54 прямоугольные импульсы положительной полярности амплитудой 2 В и длительностью  $t_{и} = 1$  мс. Снять осциллограммы напряжений.

Рассчитать и собрать импульсный вольтметр на основе пикового детектора и микроамперметра М2001. Экспериментально определить его характеристики. Подать на вход импульсного вольтметра одиночные импульсы и объяснить полученные результаты.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

7.1. Название и цель работы.

7.2. Схемы для определения параметров и характеристик ОУ, принципиальные схемы усилителей, интеграторов, детекторов, фазосдвигающих устройств.

7.3. Экспериментально измеренные параметры и характеристики ОУ.

7.4. Графики амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик масштабных усилителей.

7.5. Расчет выходных напряжений сумматора, вычитающего устройства, расчет выходного тока преобразователя напряжение - ток.

7.6. Экспериментально полученные характеристики фазосдвигающих устройств, представленные графически.

7.7. Графики амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик интегрирующих устройств, осциллограммы напряжений.

7.8. Расчетные и экспериментальные данные исследования детекторов.

7.9. Анализ полученных результатов, основные выводы по работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основы метрологии и электрические измерения. Уч.для ВУЗов. / Под ред. Е.М.Душина. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 480 с.
2. Информационно-измерительная техника и технологии: Учеб. для ВУЗов. / Под ред. Г.Г.Раннева. - М.: Высш. шк., 2002. - 454 с.
3. Измерение электрических и неэлектрических величин: Уч. пособие. для ВУЗов. / Под ред. Евтихьева Н.Н. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352 с.
4. Метрология и электрорадиотзмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для ВУЗов / Под ред. В.И.Нефёдова. - М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.
5. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 1998. – 400 с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. : Учеб. для ВУЗов. - М.: Высш. шк., 1991. - 624 с.
7. Ленк Дж. Электронные схемы: Практическое руководство. /Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 343 с.
8. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергоатомиздат, 1988. - 304 с.
9. Найденов А.И., Новопольский В.А. Электронно-лучевые осциллографы. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Лабораторные работы по основам промышленной электроники. Уч. пос. для Вузов. /Под ред. В.Г.Герасимова. - М.: Высш. шк., 1977. - 181 с.
11. Измерения в электронике: Справочник. / Под ред. В.А.Кузнецова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512 с.
12. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник /Под ред. А.В. Голомедова. - М.: Радио и связь, 1988. 528 с. , 1987. - 352 с.
13. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. / Под ред. В.Г.Герасимова. - М.: Высшая школа, 1989. - 288 с.
14. Основы промышленной электроники. Уч. пос. для ВУЗов / Под ред. В.Г.Герасимова. - М.: Высш. шк., 1986. - 336 с.
15. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учеб. Пособие. 3-е изд., перераб. И доп. – Ростов н/Д: изд-во «Феникс», 2002. – 576 с.