

При подаче двух управляющих напряжений  $E_1$  и  $E_2$  одновременно  $I_H = (E_1 - E_2)/R$ , т.е. источник тока управляется дифференциальным сигналом.

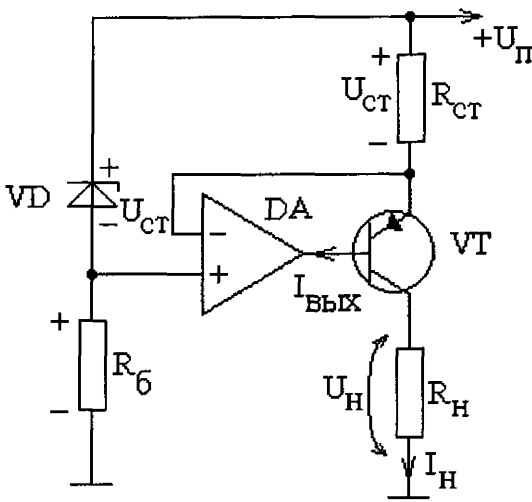


Рис. 2.31. Источник тока с заземленной нагрузкой

Ещё одна схема ПНТ с заземленной нагрузкой и с фиксированным значением выходного тока представлена на рис. 2.31.

Согласно правилу 1 напряжение на резисторе  $R_{CT}$  равно напряжению стабилизации стабилитрона  $VD$   $U_{CT}$ . Эмиттерный ток транзистора  $VT$   $I_Э = U_{CT}/R_{CT}$ . Учитывая, что для транзистора  $VT$   $I_K \approx I_Э$ , ток нагрузки равен  $I_H = U_{CT}/R_{CT}$ . Благодаря применению транзистора ток нагрузки может быть в  $\beta$  раз больше максимального выходного тока ОУ  $I_{ВЫХ\ MAX}$ , где  $\beta$  – коэффициент передачи тока транзистора. Необходимым

условием работы источника тока является выполнение неравенства  $U_H < U_П - U_{CT} - U_{КЭ\ НАС}$ , где  $U_{КЭ\ НАС}$  – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $VT$  в режиме насыщения.

Рассмотренная схема не является ПНТ в «чистом виде», поскольку выходной ток  $I_H$  задается либо изменением напряжения стабилизации  $U_{CT}$  (сменой стабилитрона), либо изменением сопротивления резистора  $R_{CT}$ .

## 2.5. Применение ОУ в измерительной технике

**Вольтметр постоянного тока.** Основным требованием к прибору для измерения напряжения (вольтметру) является высокое входное сопротивление. От величины этого сопротивления зависит ошибка измерения напряжения (методическая погрешность). Пусть, например, необходимо измерить напряжение на резисторе  $R_2$  делителя напряжения, рис. 2.32. Оба резистора имеют равные сопротивления 300 кОм. Сопротивление стрелочного вольтметра (выполненного на основе головки магнитоэлектрической системы с током полного отклонения 50 мкА) на пределе измерения 10 В равно 200 кОм.

Очевидно, что напряжение на резисторе  $R_2$  равно 5 В. Вольтметр шунтирует резистор  $R_2$ . Сопротивление нижнего плеча делителя становится равным  $R_2 || R_{ИЗМ} = 120$  кОм. Вольтметр показывает напряжение около 2.8 В, то есть методическая погрешность измерения напряжения превышает 50%.

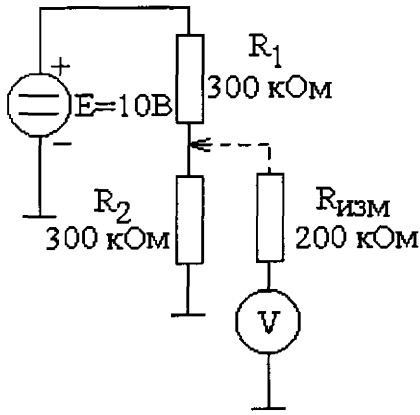


Рис. 2.32. Измерение напряжения на резисторе стрелочным вольтметром с низким входным сопротивлением

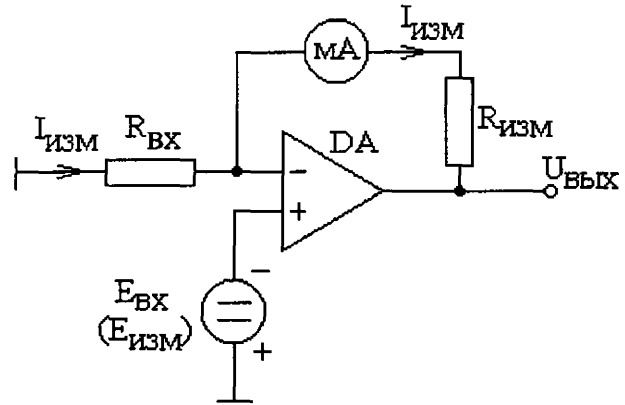


Рис. 2.33. Вольтметр постоянного тока

Значительного увеличения входного сопротивления вольтметра можно добиться, используя ОУ в неинвертирующем включении, рис. 2.33.

Сопротивление ОУ со стороны входа (+) очень велико (десятки мегаом). Согласно правилу 1  $I_{изм} = E_{вх}/R_{вх}$ . Этот же ток (правило 2) протекает и через измерительную головку магнитоэлектрической системы с сопротивлением  $R_{изм}$ . Причем величина  $R_{изм}$  не оказывает никакого влияния на  $I_{изм}$ . Шкалу прибора можно градуировать в вольтах. С помощью резистора  $R_{вх}$  можно изменять предел измерений. Следует иметь в виду, что  $E_{вх}$  не должно превышать напряжения питания ОУ. В случае необходимости измерения больших напряжений  $E_{изм}$  может подаваться через соответствующий высокоомный делитель.

При использовании в схеме (рис. 2.33) прибора с нулевой отметкой на середине шкалы полярность измеряемого напряжения может быть любой. При этом стрелка отклоняется вправо или влево в зависимости от знака  $E_{вх}$ .

**Вольтметр переменного тока.** Введя в схему (рис. 2.33) мостовой диодный выпрямитель, можно производить измерение переменного напряжения, рис. 2.34.

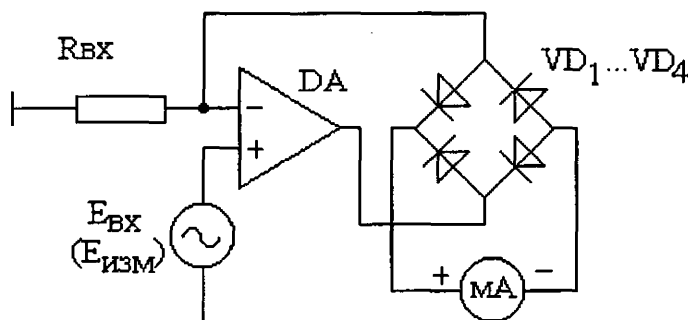


Рис. 2.34. Вольтметр переменного тока

Индикатор, в качестве которого используется головка магнитоэлектрической системы, реагирует на среднее значение выпрямленного тока:

$$I_{\text{ИЗМ}} = 0,636 \frac{E_{\text{ВХ}m}}{R_{\text{ВХ}}} = 0,9 \frac{E_{\text{ВХЭФФ}}}{R_{\text{ВХ}}},$$

где  $E_{\text{ВХ}m}$  – амплитудное значение измеряемого переменного напряжения;  $E_{\text{ВХЭФФ}}$  – эффективное (действующее) значение измеряемого напряжения. Эту схему можно также назвать *преобразователем переменного напряжения в постоянный ток*.

Рассмотрим пример расчета схемы. Пусть необходимо построить вольтметр, измеряющий действующее значение переменного напряжения. Ток полного отклонения стрелки прибора – 100 мкА, предел измерения вольтметра – 1 В. Расчетное значение сопротивления резистора  $R_{\text{ВХ}}$  определяется следующим образом:

$$R_{\text{ВХ}} = 0,9 \frac{E_{\text{ВХЭФФ}}}{I_{\text{ИЗМ}}} = \frac{(0,9 \cdot 1 \text{ В})}{100 \text{ мкА}} = 9 \text{ кОм}.$$

Эта же схема может использоваться и как вольтметр постоянного тока. Для этого необходимо лишь изменить сопротивление резистора  $R_{\text{ВХ}}$ . Например, для предела 1 В  $R_{\text{ВХ}}$  должен быть равен 10 кОм.

**Измерение тока короткого замыкания.** В ряде случаев необходимо

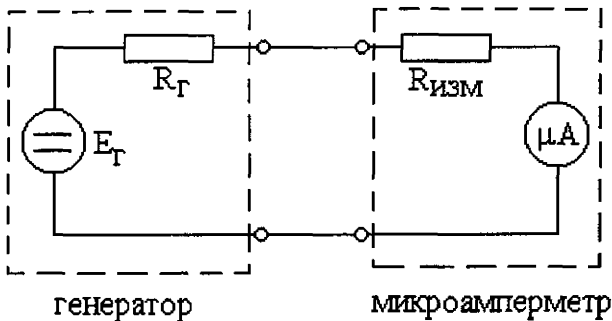


Рис. 2.35. Измерение тока короткого замыкания

производить измерения токов короткого замыкания различных генераторов сигнала, например, магнитных головок, измерительных преобразователей и др. Схема измерения тока короткого замыкания с помощью микроамперметра постоянного тока приведена на рис. 2.35. Пусть  $E_{\Gamma}=2,5 \text{ В}$ ,  $R_{\Gamma}=50 \text{ кОм}$ ,

$R_{\text{ИЗМ}}=5 \text{ кОм}$ . Тогда ток короткого замыкания генератора равен:

$$I_{\text{кз}} = \frac{2,5 \text{ В}}{50 \text{ кОм}} = 50 \text{ мкА}.$$

В действительности же прибор покажет значение тока  $I'_{\text{кз}} = 2,5 \text{ В} / (50 \text{ кОм} + 5 \text{ кОм}) = 45 \text{ мкА}$ . То есть имеет место методическая погрешность измерения  $I_{\text{кз}}$ , обусловленная наличием внутреннего сопротивления микроамперметра  $R_{\text{ИЗМ}}$ . Очевидно, что чем меньше  $R_{\text{ИЗМ}}$ , тем с большей точностью измеряется ток короткого замыкания. Для расчета погрешности измерения можно воспользоваться эквивалентной схемой Нортона, рис. 2.36.

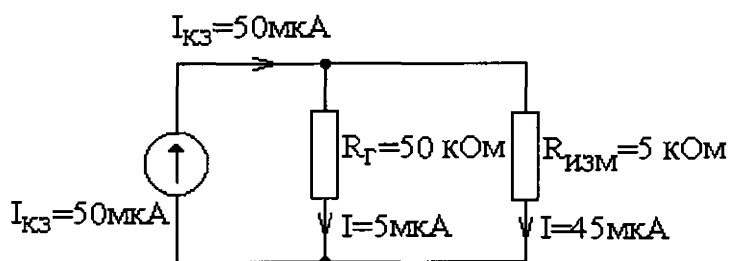


Рис. 2.36. Эквивалентная схема Нортона для цепи, рис. 2.35

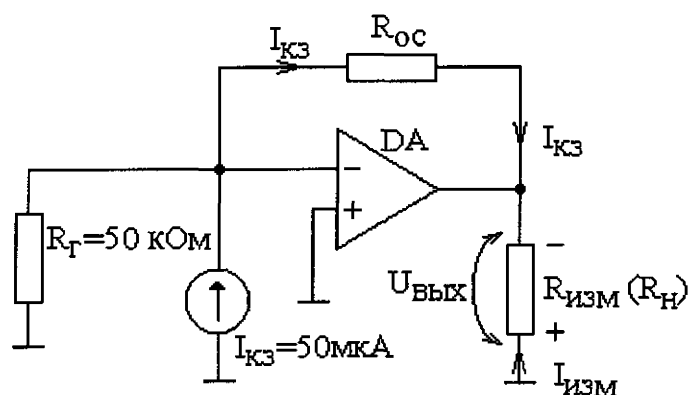


Рис. 2.37. Использование ОУ для измерения тока короткого замыкания

Согласно схеме Нортона генератор замыкается на параллельно соединенные резисторы  $R_{Г}$  и  $R_{изм}$ . Избежать расщепления тока  $I_{кз}$  можно, используя ОУ, рис. 2.37. Согласно правилу 1 вход (–) потенциально заземлен, поэтому генератор тока замыкается накоротко, что эквивалентно равенству нулю резистора  $R_{изм}$  в схеме, рис. 2.36. Весь ток короткого замыкания генератора протекает через  $R_{ос}$ , преобразуясь в выходное напряжение  $U_{вых}$ . Сопротивление вольтметра или осциллографа, подключенного к выходу ОУ  $R_{изм}$ , не оказывает никакого влияния на измерение  $I_{кз}$ , так как ток  $I_{изм}$  отдает выходная цепь ОУ, а не источник тока короткого замыкания.

**Дифференциальный усилитель.** Усилители сигналов применяются в различных электронных измерительных устройствах. Дифференциальный усилитель (рис. 2.38), дает возможность измерять и усиливать слабые сигналы. Все применяемые резисторы прецизионные (с допуском не более 1%). Положим, что источник напряжения  $E_1$  замкнут накоротко. Для источника  $E_2$  схема является инвертирующим усилителем с коэффициентом усиления  $-m$ , т.е.  $U_{вых} = -E_2 \cdot m$ .

Пусть закорочен источник  $E_2$ . Напряжение  $E_1$  делится резисторами  $R$  и  $mR$ . Напряжение на входе (+):

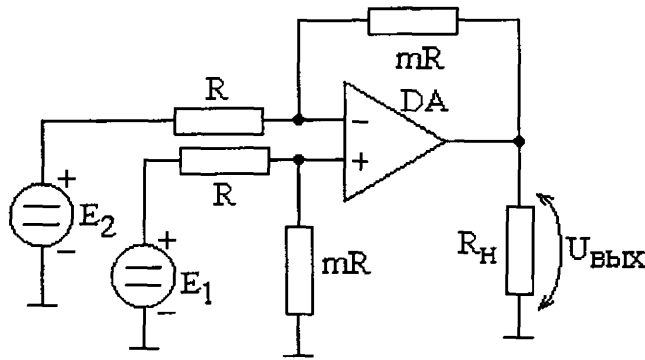


Рис. 2.38. Дифференциальный усилитель

$$U(+)=\frac{E_1}{R+mR}mR=E_1\cdot\frac{m}{1+m}.$$

Для напряжения  $U(+)$  схема является неинвертирующим усилителем с коэффициентом усиления  $(1+m)$ .

При наличии обоих источников напряжения ( $E_1 \neq 0$ ,  $E_2 \neq 0$ ) выходное напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = mE_1 - mE_2 = m \cdot (E_1 - E_2),$$

где  $m$  – дифференциальный коэффициент усиления.

Выходное напряжение дифференциального усилителя пропорционально разности напряжений, приложенных к инвертирующему и неинвертирующему входам.

При наличии  $E_1 - E_2 = 0$  выходное напряжение равно нулю, то есть для синфазного входного напряжения  $U_{\text{вых}} = 0$ . Схема подачи синфазного выходного сигнала  $E_{\text{синф}}$  представлена на рис. 2.39.

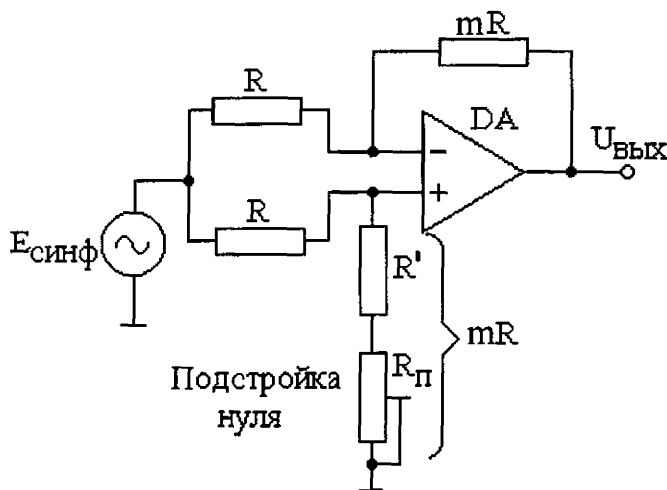


Рис. 2.39. Подача синфазного сигнала на дифференциальный усилитель

В идеале  $E_{\text{сиф}}$  никак не влияет на выходное напряжение усилителя. В действительности же за счёт отличия  $K_{\text{сиф}}$  от нуля  $U_{\text{вых}}$ , хотя и в очень незначительной степени, отслеживает изменения  $E_{\text{сиф}}$ . Резистором  $R_{\text{д}}$  обеспечивается балансировка схемы (установка нуля выходного напряжения при  $E_{\text{сиф}}=0$ ). Благодаря тому, что

$$K_{\text{сиф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{E_{\text{сиф}}} \ll K_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{E_{\text{диф}}},$$

усилитель позволяет выделить слабый сигнал на фоне сильной помехи. Для этого необходимо сделать так, чтобы для дифференциального усилителя помеха была синфазным напряжением, а полезный сигнал – дифференциальным.

Схема (рис. 2.39) имеет два основных недостатка:

- низкое входное сопротивление;
- трудность изменения коэффициента усиления, так как для этого надо одновременно изменять два сопротивления, которые должны быть точно согласованы.

Первый недостаток может быть преодолён изоляцией (развязкой) входов усилителя, рис. 2.40.

Согласно правилу 1 напряжения на выходе ОУ  $DA_1$  и  $DA_2$  соответственно равны  $E_1$  и  $E_2$ . Дифференциальное выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  приложено к нагрузке  $R_{\text{н}}$  ( $U_{\text{вых}}=E_1-E_2$ ). Отличительной особенностью рассмотренной схемы является то, что нагрузка не заземлена («плавающая»).

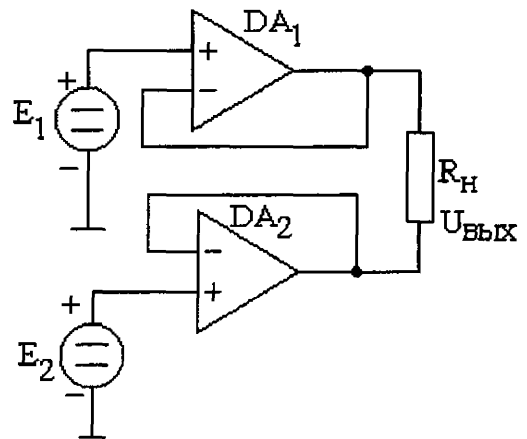


Рис. 2.40. Повышение входного сопротивления дифференциального усилителя

В схеме (рис. 2.41) регулировка коэффициента усиления осуществляется изменением сопротивления одного резистора  $kR$ . Пусть  $E_1 > E_2$ . Согласно правилу 1 потенциал точки А равен  $E_1$ , а точки Б –  $E_2$ . Следовательно, на резисторе  $kR$  падает напряжение  $(E_1 - E_2)$ , и через него протекает ток  $I = \frac{(E_1 - E_2)}{kR}$ . Этот же ток протекает через оба

резистора  $R$ , то есть  $U_{\text{вых}} = I(kR + 2R) = \frac{E_1 - E_2}{kR} (kR + 2R)$  или

$$U_{\text{вых}} = (E_1 - E_2) \left(1 + \frac{2}{k}\right).$$

Таким образом, изменяя величину только одного резистора  $kR$ , можно регулировать коэффициент передачи усилителя.

Недостатком схемы является отсутствие заземления одного из полюсов нагрузки (плавающая нагрузка). Для того чтобы схема могла работать на заземленную нагрузку, необходимо добавить к ней каскад, преобразующий дифференциальное входное напряжение в несимметричное напряжение на выходе. Роль такого каскада может выполнить дифференциальный усилитель, рассмотренный выше.

**Измерительный усилитель.** Измерительный, или инструментальный, усилитель – это один из наиболее широко применяемых, точных и многофункциональных усилителей. Идеальный инструментальный усилитель обладает следующими характеристиками: постоянный коэффициент усиления, не зависящий от времени, частоты и амплитуды входного сигнала, сопротивления нагрузки, температуры и влажности; бесконечный коэффициент подавления синфазного сигнала; нечувствительность к изменению напряжения питания; нулевые входное и выходное напряжения смещения и дрейфы этих смещений, а также нулевой выходной импеданс при любых амплитудах сигнала, отдаваемого усилителем в нагрузку. Обычно измерительный усилитель является первым каскадом измерительной или преобразовательной схемы, где основным

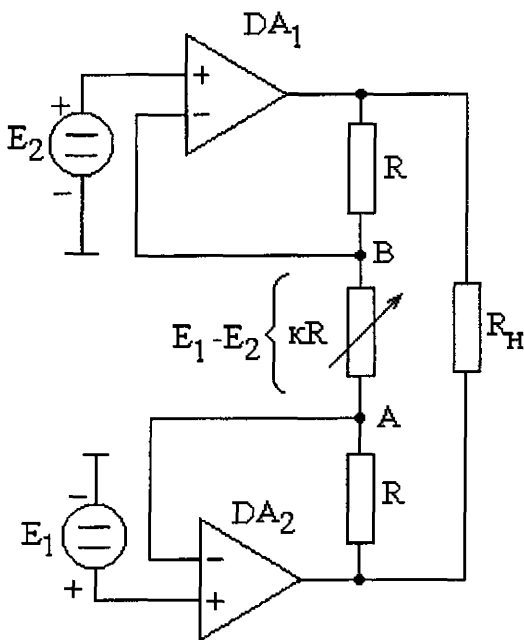


Рис. 2.41. Регулировка коэффициента усиления с помощью одного резистора

требованием является точность. Зачастую в измерительных системах входной сигнал подается на инструментальный усилитель с мостовой схемы или датчика, преобразующих какую-либо неэлектрическую величину в аналоговый электрический сигнал.

Измерительный усилитель с довольно хорошими параметрами можно создать на базе схемы (рис. 2.41), включая нагрузку через дифференциальный усилитель, рис. 2.42.

Измерительный усилитель состоит из дифференциального усилителя с буферными каскадами ( $DA_1$  и  $DA_2$ ), соединенного с дифференциальным усилителем ( $DA_3$ ). ОУ  $DA_3$  с четырьмя резисторами  $R$  образует дифференциальный усилитель с коэффициентом

усиления равным единице. Резистором  $R_p$  ( $R=R'+R_p$ ) устанавливается нулевое значение выходного напряжения для синфазного сигнала на входе схемы. Резистор  $kR$ , как и в схеме (рис. 2.41), задаёт коэффициент усиления по напряжению, величина которого равна:

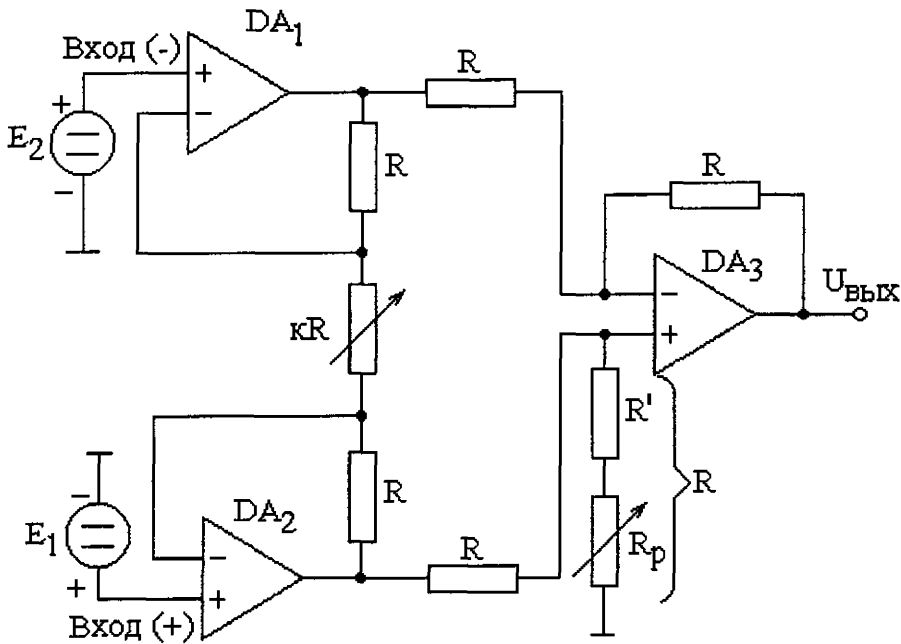


Рис. 2.42. Измерительный усилитель на трех ОУ

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_1 - E_2} = 1 + \frac{2}{k}.$$

Основные свойства схемы (рис. 2.42):

- коэффициент усиления дифференциального сигнала ( $E_1 - E_2$ ) задаётся одним резистором  $kR$ ;
- входное сопротивление схемы по обоим входам очень велико (особенно для ОУ с полевыми транзисторами на входе) и при регулировании коэффициента усиления не изменяется;
- выходное напряжение не зависит от напряжения, общего для  $E_1$  и  $E_2$  (синфазного напряжения), а зависит только от разности этих напряжений.

В ряде случаев возникает необходимость сдвига выходного сигнала инструментального усилителя относительно нулевого уровня выходного напряжения при  $E_1 - E_2 = 0$ . Такая задача может, например, возникнуть при потребности коррекции начального положения пера самописца регистрирующего прибора, подключённого к выходу схемы.

Изменение начального уровня

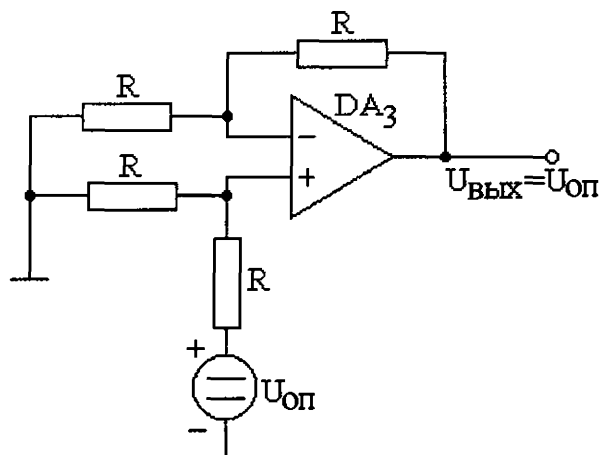


Рис. 2.43. Смещение начального уровня выходного напряжения.



выходного сигнала производится подключением источника опорного напряжения ( $U_{\text{оп}}$ ) к ОУ  $DA_3$ , рис. 2.43.

Согласно схеме включения, опорное напряжение делится пополам между резисторами  $R$  и прикладывается ко входу (+)  $DA_3$ . Для  $U_{\text{оп}}$  схема является неинвертирующим усилителем с коэффициентом передачи напряжения равным двум. Следовательно, выходное напряжение равно опорному ( $U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}$ ).

Сферу применения инструментального усилителя можно расширить, разорвав контур отрицательной обратной связи ОУ  $DA_3$  и выведя из него три зажима: выход (Вых.), измерительный (Изм.) и опорный (Оп.), рис. 2.44. Тогда схема может быть подключена к нагрузке через длинную соединительную линию, сопротивления проводов которой обозначено через  $R_{\text{лп}}$ . Транзистор  $VT$ , включённый между выходом усилителя и нагрузкой, является буфером, обеспечивающим необходимый ток нагрузки.

Для того чтобы исключить влияние падения напряжения на соединительных проводах, измерительный и опорный зажимы подключают непосредственно к нагрузке. При этом последовательно с резисторами в цепях измерительного и опорного зажимов включены равные сопротивления проводников, и эти цепи остаются симметричными. Важным для схемы (рис. 2.44) является то, что обратная связь обрабатывает напряжение нагрузки, а не выхода ОУ  $DA_3$ , благодаря чему напряжение на нагрузке точно соответствует входным сигналам усилителя.

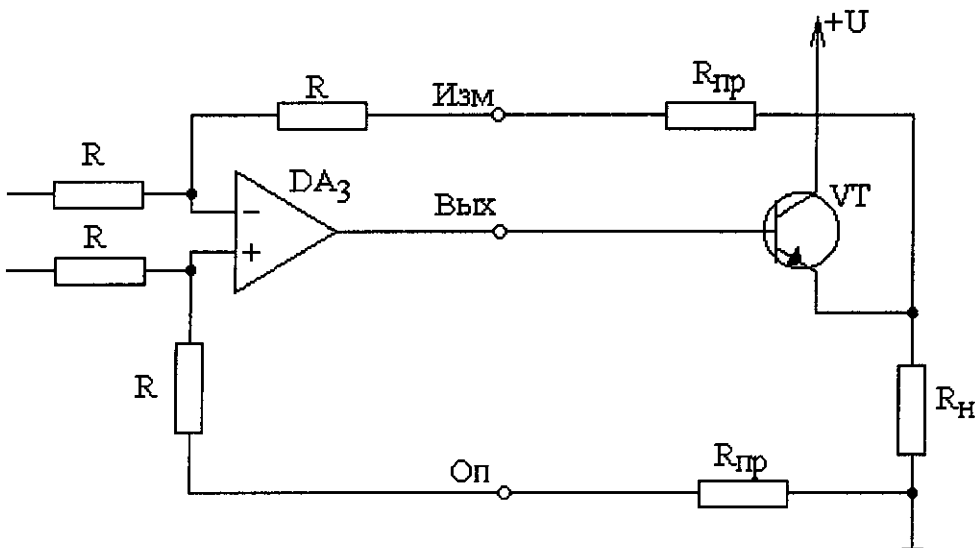


Рис. 2.44. Подключение инструментального усилителя к нагрузке через длинную линию и токовый буфер

Включение инструментального усилителя с тремя выведенными зажимами для измерения напряжения и тока показано на рис. 2.45. Измерив  $U_{\text{вых}}$  (нагрузкой усилителя является вольтметр), можно определить напряжение на резисторе  $R$ :

$$E_1 - E_2 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{1 + \frac{2}{K}}$$

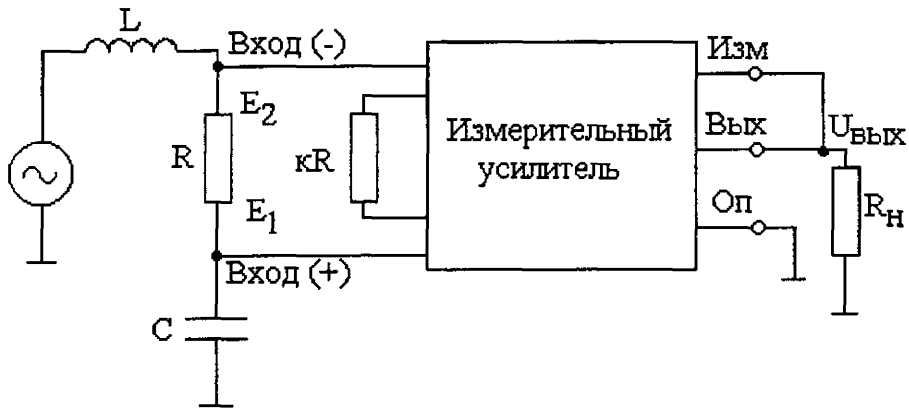


Рис. 2.45. Включение инструментального усилителя для измерения напряжения и тока

При достаточно больших величинах  $K$  можно измерять очень малые напряжения, используя вольтметр обычной чувствительности. Если в качестве резистора  $R$  использовать образцовый резистор достаточно малого сопротивления, можно измерять ток, протекающий в цепи:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{(1 + 2/K)R}$$

Промышленностью выпускаются однокристалльные измерительные усилители с различными функциональными возможностями, в том числе и цифровым управлением, которые наиболее удобны для микропроцессорных систем. Таковыми являются например: AD624; AD625; INA101; INA105; AMP-01; AMP-05; PGA200; LH0084C и др. Основные электрические параметры инструментальных усилителей данного класса следующие:

- стандартное напряжение питания  $\pm 15$  В;
- потребляемый ток 1,5...12 мА;
- входное напряжение смещения (при температуре 25 °С) 25...500 мкВ и его дрейф 0,3...10 мкВ/°С;
- входные токи смещения (при температуре 25°С) 0,03...100 нА и ток сдвига 0,01...40 нА;
- напряжение шумов (в полосе частот от 0,1 до 10 Гц) 0,2...6 мкВ;
- входное сопротивление (входная емкость) от единиц мегаом до нескольких гигаом (1...100 пФ);
- диапазон значений коэффициента усиления 0,1...10000 и точность его установки 0,02...0,4 %;

- коэффициент ослабления синфазного сигнала на постоянном токе 80...120 дБ;
- скорость нарастания выходного напряжения от единиц до десятков и сотен вольт на микросекунду.

При выборе промышленного измерительного усилителя для решения конкретной технической задачи необходимо, прежде всего, оценить вклад в погрешность преобразования сигнала всех основных параметров микросхемы и вычислить максимальную погрешность во всём температурном диапазоне. Анализ погрешностей интегрального инструментального усилителя рассмотрим на примере AD624, рис. 2.46. Параметры микросхемы, учитываемые при расчёте погрешности, представлены в табл. 2.1.

Предполагается, что диапазон рабочих температур равен 0 °С...+40 °С, в котором обычно производители гарантируют параметры своих изделий. Предполагаются также следующие условия: максимальный входной сигнал 10 мВ; максимальное выходное напряжение 1 В и полоса частот сигнала 10 Гц; мост сбалансирован при температуре 20°С.

Таблица 2.1

Параметры промышленного инструментального усилителя AD624

Параметр (источник погрешности)	Типовое значение параметра
1. Погрешность усиления	0,1 %
2. Дрейф усиления	0,001 %/°С
3. Нелинейность	0,001 %
4. Входное сопротивление	10 <sup>9</sup> Ом
5. Входное напряжение смещения	± 25 мкВ
6. Дрейф входного смещения	± 0,25 мкВ/°С
7. Выходное напряжение смещения	± 2 мВ
8. Дрейф выходного смещения	± 10 мкВ/°С
9. Разность входных токов смещения	±10 нА
10. Дрейф разности входных токов смещения.	0,1 нА/°С
11. Коэффициент подавления синфазного сигнала	110 дБ
12. Входное напряжение шума (в полосе частот 0,1...10 Гц)	0,3 мкВ
13. Входной ток шума (в полосе частот 0,1...10 Гц)	0,06 нА

Выходное напряжение усилителя равно нулю (отсутствует смещение). Результаты расчёта погрешностей, вносимых параметрами микросхемы, сведены в табл. 2.2 (подробно порядок расчёта погрешностей рассматривается в разделе 3 настоящего пособия). Рассмотрим четыре возможных случая.

Случай 1. Усилитель используется без подстройки коэффициента усиления и смещения. Результирующая погрешность  $\delta U_{\text{ВЫХ}}$  определяется как сумма всех построчных погрешностей, табл. 2.2:

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = 0,1 + 0,02 + 0,001 + 0,00001 + 0,25 + 0,05 + 0,2 + 0,02 + 0,006 + 0,0012 + 0,08 + 0,003 + 0,00004 = 0,73\%$$

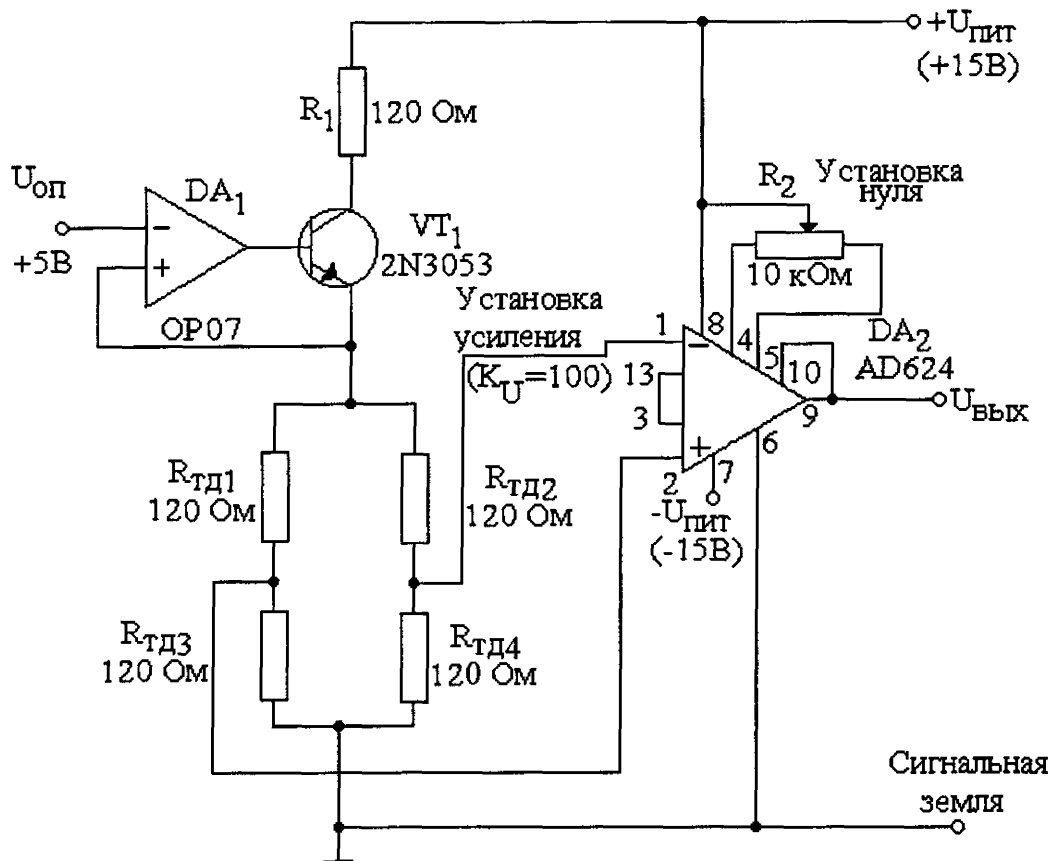


Рис. 2.46. Включение микросхемы AD624 для усиления сигналов мостового тензодатчика ( $R_{ТД1} \dots R_{ТД4}$  – тензорезисторы)

Случай 2. Усилитель используется с подстроечными резисторами для установки коэффициента усиления и балансировки. Температурные дрейфы коэффициента усиления и напряжений смещения не устраняются.

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = 0,02 + 0,001 + 0,05 + 0,02 + 0,0012 + 0,003 + 0,0000004 = 0,095\%$$

Случай 3. Усилитель входит в состав микропроцессорной системы, которая между измерениями калибрует схему непосредственно по входному сигналу, применяя точно известные стандарты. Здесь важна абсолютная точность. В этом случае не надо учитывать температурные уходы, так как они учитываются при калибровке. Калибровка не устраняет только такие погрешности, как нелинейность и шум.

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = 0,001 + 0,003 + 0,00004 = 0,004\%$$

Случай 4. Усилитель является частью системы, в которой необходимо измерять только отклонения сигнала за небольшой промежуток времени, например, за несколько секунд. В этом случае основной вклад в погрешность вносит только шум.

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = 0,003 + 0,00004 = 0,003\%$$

Погрешности, вносимые параметрами усилителя AD624

Параметр (номер строки табл. 2.1)	Расчёт погрешностей	Погрешность, %
1	-----	0,1
2	$0,001 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}} \cdot 20^{\circ}\text{C}$	0,02
3	-----	0,001
4	$\frac{120 \text{ Ом}}{10^9 \text{ Ом}} \cdot 100$	0,00001
5	$\frac{25 \cdot 10^{-6} \text{ В}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \cdot 100$	0,25
6	$\left[ \frac{0,25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 20^{\circ}\text{C} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3}} \right]$	0,05
7	$\frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ В}}{1 \text{ В}} \cdot 100$	0,2
8	$\left[ \frac{10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{В}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 20^{\circ}\text{C} \cdot 100}{1 \text{ В}} \right]$	0,02
9	$\left[ \frac{10 \cdot 10^{-9} \text{ А} \cdot 60 \text{ Ом} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right]$	0,006
10	$\left[ \frac{0,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{А}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 20^{\circ}\text{C} \cdot 60 \text{ Ом} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right]$	0,0012
11	$\left[ \frac{\frac{110}{10^{20}} \cdot 2,5 \text{ В} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right]$	0,08
12	$\left[ \frac{0,3 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right]$	0,003
13	$\left[ \frac{0,06 \cdot 10^{-9} \text{ А} \cdot 60 \text{ Ом} \cdot 100}{10 \cdot 10^{-3} \text{ В}} \right]$	0,00004

Значение анализа погрешностей состоит в том, что он позволяет разработчику выявить наиболее значимые погрешности и определить необходимость введения автоматической калибровки или настройки.

**Мостовой усилитель.** Усилитель (рис. 2.47) предназначен для преобразования изменения сопротивления в электрический сигнал. В обратную связь ОУ может быть включён датчик с потенциометрическим выходом, сопротивление которого в отсутствие сигнала равно  $R$ , а в процессе преобразования физической величины получает приращение  $\Delta R$ . Перед измерением схема балансируется резистором  $R_p$  (устанавливается нулевое вы-

ходное напряжение). Выходное напряжение определяется опорным напряжением  $E$  и приращением сопротивления обратной связи  $\Delta R$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = -E \frac{\Delta R}{R_1 + R}.$$

Знак « $\rightarrow$ » показывает, что при увеличении сопротивления датчика на выходе увеличивается отрицательное напряжение.

Если необходимо заземление датчика, используют схему, рис. 2.48. В этом случае при увеличении сопротивления датчика увеличивается положительное выходное напряжение. Балансировка осуществляется аналогично с помощью резистора  $R_p$ . Выходное напряжение связано с  $\Delta R$  следующим образом

$$U_{\text{ВЫХ}} = E \frac{\Delta R}{R_1 + \Delta R + R}.$$

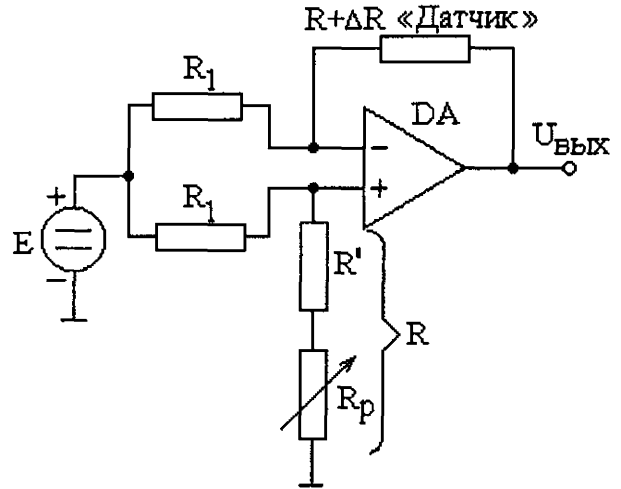


Рис. 2.47. Мостовой усилитель

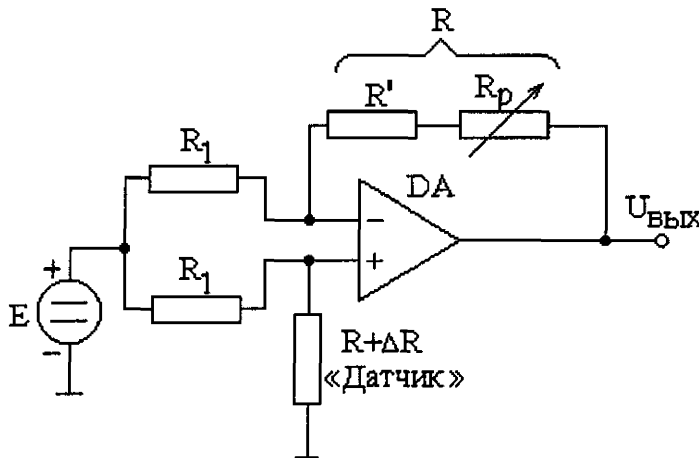


Рис. 2.48. Подключение мостового усилителя к заземлённому датчику

В схеме (рис. 2.48) через датчик может протекать значительно больший ток, чем ток, отдаваемый выходной цепью ОУ. Иногда это требуется для нормальной работы датчика. Необходимый ток может быть обеспечен соответствующим выбором резисторов усилителя, рис. 2.49.

Выбор резисторов схемы производится исходя из необходимого тока датчика  $I$  и максимального выходного тока ОУ:

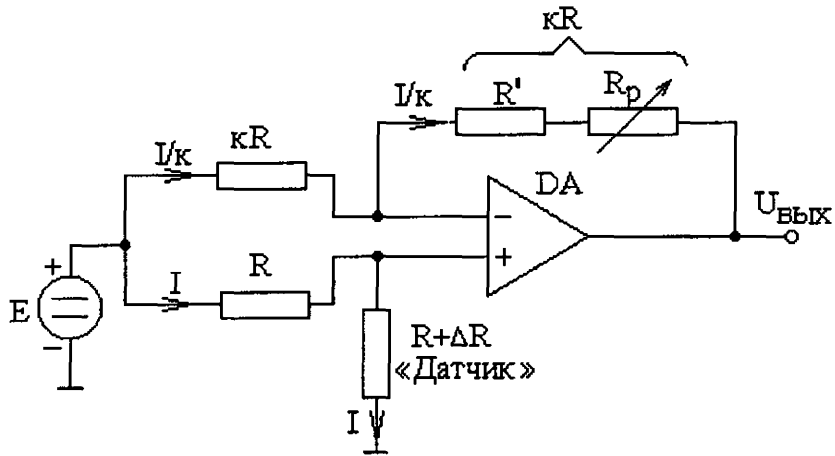


Рис. 2.49. Увеличение тока, протекающего через заземлённый датчик

$$I = \frac{E}{2R + \Delta R}, \quad U_{\text{вых}} = \frac{E \cdot \Delta R}{2R + \Delta R}, \quad K = \frac{I_{\text{вых}}}{I}.$$

Если датчик даёт малое относительное изменение сопротивления, целесообразно вместо мостового усилителя использовать резисторную мостовую схему и измерительный усилитель, рис. 2.50. На каждом резисторе  $R_1$  моста падает напряжение  $E/2$ , то есть  $E_1 = E/2$ , напряжение

$$E_2 = \frac{E \cdot R}{(2R + \Delta R)}.$$

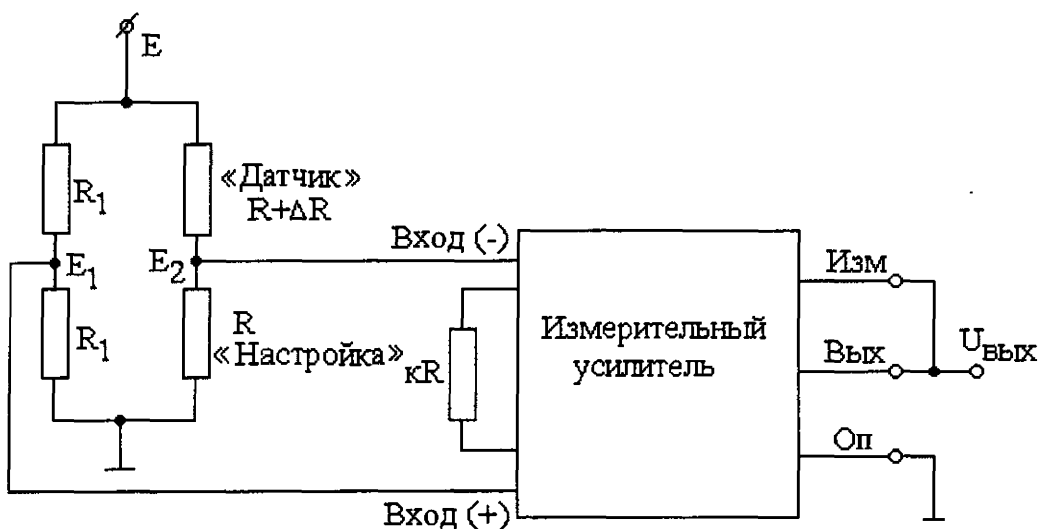


Рис. 2.50. Преобразование малых относительных изменений сопротивления датчика в электрический сигнал

Дифференциальный сигнал мостовой схемы:

$$E_1 - E_2 = \frac{E}{2} \cdot \left( \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \right).$$

Учитывая, что в знаменателе дроби  $2R \gg \Delta R$ , последнее можно переписать в виде:

$$E_1 - E_2 = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}.$$

Если коэффициент усиления инструментального усилителя равен 400 ( $U_{\text{ВЫХ}} = 400(E_1 - E_2)$  и  $E = 1$  В), то напряжение на выходе, выраженное в вольтах, численно равно изменению сопротивления в процентах:

$$U_{\text{ВЫХ}} = 100 \text{ В} \cdot \frac{\Delta R}{R}.$$

## 2.6. Усилитель мощности

Усилители мощности осуществляют усиление сигнала как по напряжению, так и по току. ОУ являются хорошими усилителями напряжения, в то время как их выходные цепи, в типовом случае, способны отдавать ток на уровне единиц или десятков миллиампер.

Используя типовой ОУ, можно получить хороший усилитель мощности, включив между выходом инвертирующего или неинвертирующего усилителя напряжения и нагрузкой токовый буфер, рис. 2.51.

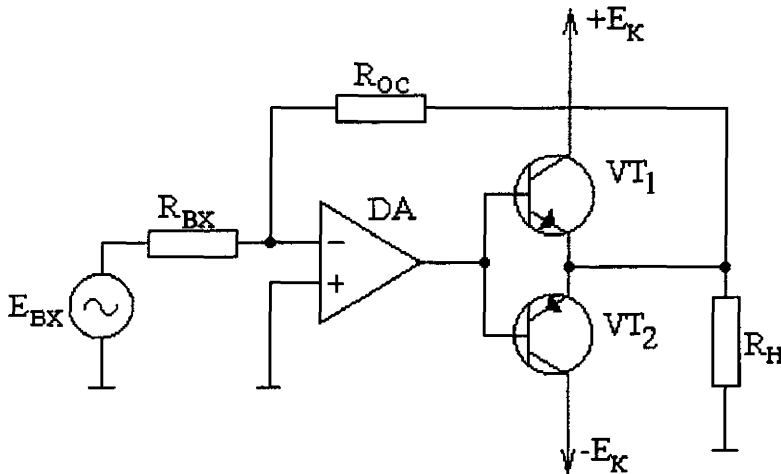


Рис. 2.51. Усилитель мощности

Подключение резистора обратной связи к нагрузке обеспечивает коэффициент усиления по напряжению  $K_U = -R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}}$ . Необходимый ток нагрузки обеспечивается транзисторами  $VT_1, VT_2$ .