

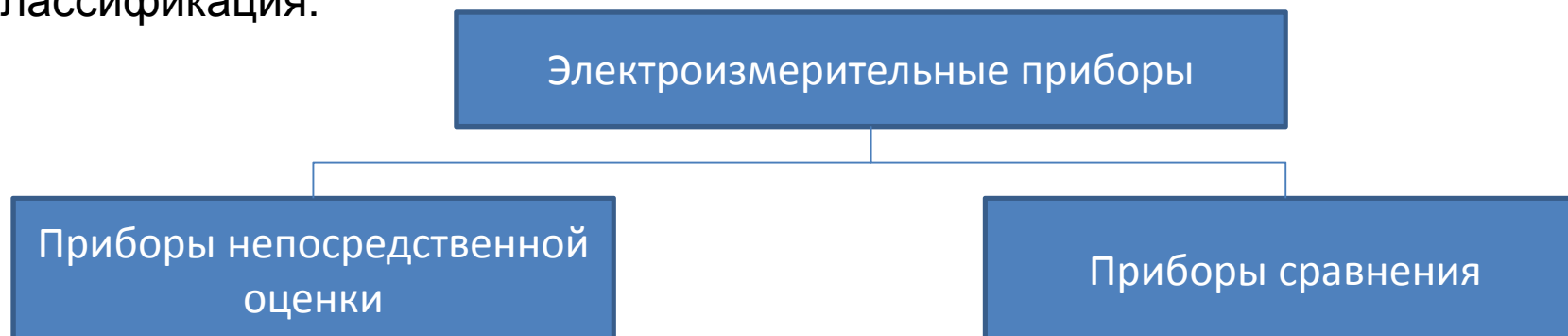
# Электроизмерительные приборы

*Электроизмерительные приборы* – приборы для измерения электрических величин:

- сила тока – амперметры
- напряжение – вольтметры
- электроэнергия – ваттметры
- частота переменного тока – частототмеры
- сдвига фаз – фазометры
- сопротивление – омметры
- емкость – фарадометры
- и т. д.

*Измерить электрическую величину* – значит сравнить ее с однородной величиной, принятой за единицу.

Классификация:



*Приборы сравнения* - измеряемая величина определяется по сравнению с известной однородной величиной:

- компенсаторы
- электроизмерительные мосты

Приборы непосредственной оценки – используют физические процессы, создающие вращающий момент и перемещение подвижной системы прибора; шкала проградуирована в единицах измеряемой величины. Градуировку производят с использованием образцовых мер.

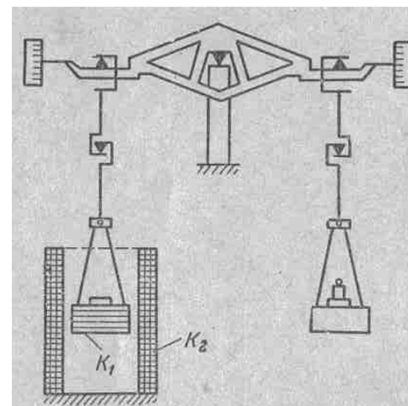
*Образцовая мера* – устройство воспроизводящее единицы измерения.

Образцовые меры сверяют с эталонами.

*Эталоны* – это образцовые меры, изготовленные с наивысшей точностью, достижимой при данном уровне развития науки и техники.

### Меры электрических величин:

- *мера тока* - токовые весы, определяющие силу взаимодействия двух последовательно включенных катушек с током



- *мера напряжения* - ЭДС нормального элемента Вестона, которая составляет при 20°C 1,0185 – 1,0187 В;

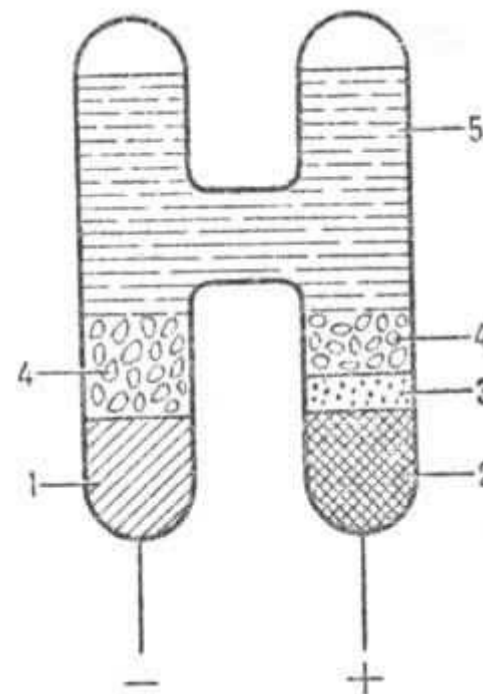
1 – 8-12,5%-ая амальгама кадмия;

2 - металлическая ртуть;

3 – паста из кристаллов  $\text{Hg}_2\text{SO}_4$ ;

4 – паста из кристаллов  $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ;

5 – насыщенный раствор  $\text{CdSO}_4$ .



- *мера электрического сопротивления* - образцовые резисторы из манганиновой проволоки намотанной, бифилярно на латунный или фарфоровый цилиндр;
- *мера индуктивности* - образцовые катушки, выполненные из медного провода, намотанного на пластмассовый или фарфоровый каркас;
- *мера емкости* – образцовые конденсаторы с плоскими или цилиндрическими пластинами с воздушной или смоляной изоляцией между ними.

Физические процессы, создающие вращающий момент и перемещение подвижной системы приборов непосредственной оценки:

- взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и тока в катушке;
- взаимодействие магнитного поля катушки с током и ферромагнетика;
- взаимодействие магнитных полей катушек с токами;
- взаимодействие заряженных тел и т. д.

Классификация приборов непосредственной оценки по типу физ. процессов:

- магнитоэлектрические,
- электромагнитные,
- электродинамические,
- индукционные,
- электростатические,
- термоэлектрические,
- детекторные,
- вибрационные.

## Характеристики приборов и измерений:

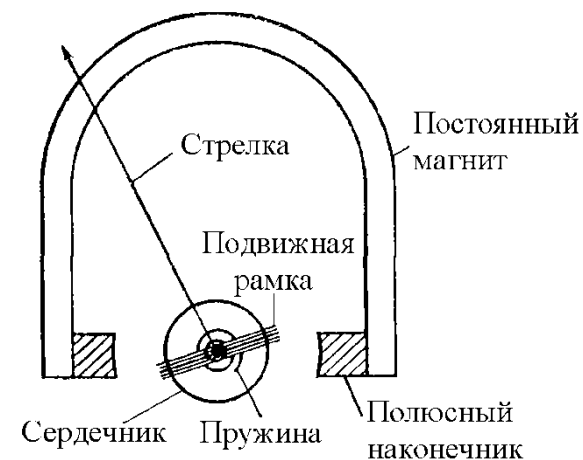
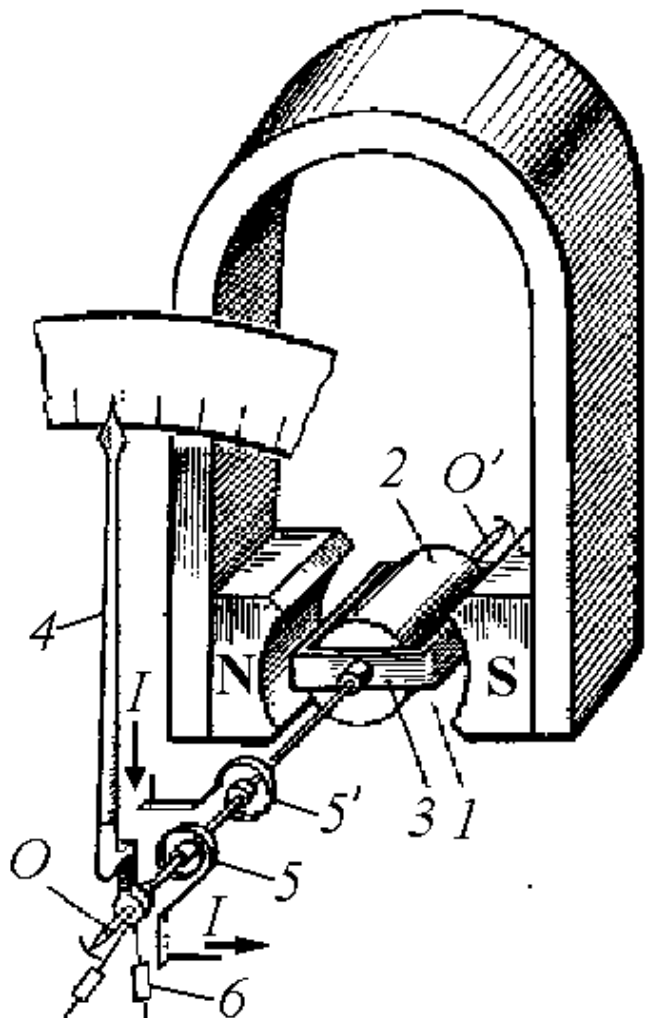
- *Абсолютная погрешность* – разность между измеренным и действительным значением измеряемой величины ( $\Delta A$ ).
- *Приведенная погрешность* – отношение абсолютной погрешности измеряемой величины к верхнему пределу шкалы прибора, выраженное в процентах.
- *Относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженной в процентах.
- *Чувствительность прибора* – отношение отмеченного стрелкой числа делений шкалы к численному значению измеряемой величины:

$$s = \frac{n}{A_{\text{изм}}}$$

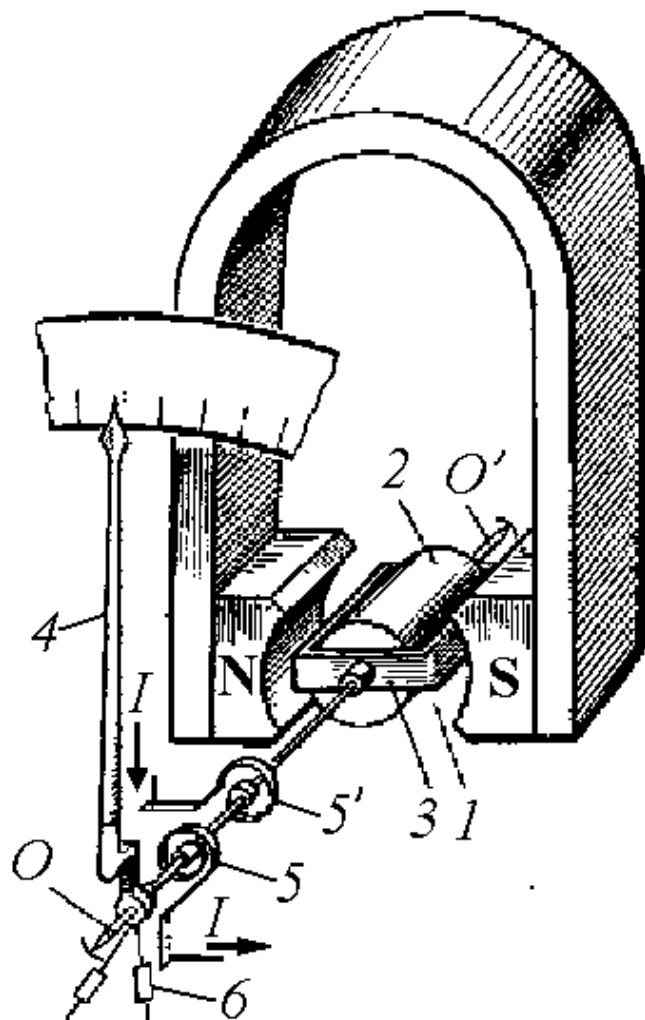
- *Цена деления* или постоянная прибора - величина, обратная чувствительности.

# Магнитоэлектрические приборы

Принцип действия - взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и обмотки с током.



- 1 – воздушный зазор;
- 2 – стальной цилиндр;
- 3 – алюминиевая рамка с обмоткой;
- 4 – указательная стрелка;
- 5 и 5' – спиральные пружины, через которые к обмотке подводится измеряемый ток;
- 6 – противовесы



Полюсные наконечники  $NS$  и стальной цилиндр  $2$  обеспечивают в зазоре  $1$  равномерное радиальное магнитное поле с индукцией  $B$ . В результате взаимодействия магнитного поля с током в проводниках обмотки  $3$  создается вращающий момент. Рамка с обмоткой при этом поворачивается и стрелка отклоняется на угол  $\alpha$ . Электромагнитная сила  $F$  (Н), действующая на обмотку равна

$$F = wBI$$

где  $w$  – число витков обмотки;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $l$  – длина рамки, м;  $I$  – сила тока, А. Вращающий момент  $M$  (Н·м), создаваемый этой силой равен:

$$M_{\text{вр}} = Fr = wBIld = k_1 I$$

где  $r$  – радиус обмотки, м;  $k_1$  – коэффициент, зависящий от числа витков, размеров обмотки и магнитной индукции.

При вращении катушки спиральные пружины  $5$  и  $5'$  создают противодействующий момент, пропорциональный углу закручивания:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}} = k_2 \alpha = k_1 I$$

Отсюда угол поворота стрелки будет пропорционален величине тока в катушке:

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = kI$$



Достоинства магнитоэлектрических приборов:

- равномерность шкалы,
- высокая чувствительность,
- высокий класс точности,
- малая чувствительность к воздействию внешних магнитных полей.

Недостатки:

- чувствительность к перегрузкам (спиральные пружины при больших токах нагреваются и теряют упругие свойства или перегорают);
- непригодность для непосредственных измерений в цепи переменного тока (необходимо использовать выпрямители).

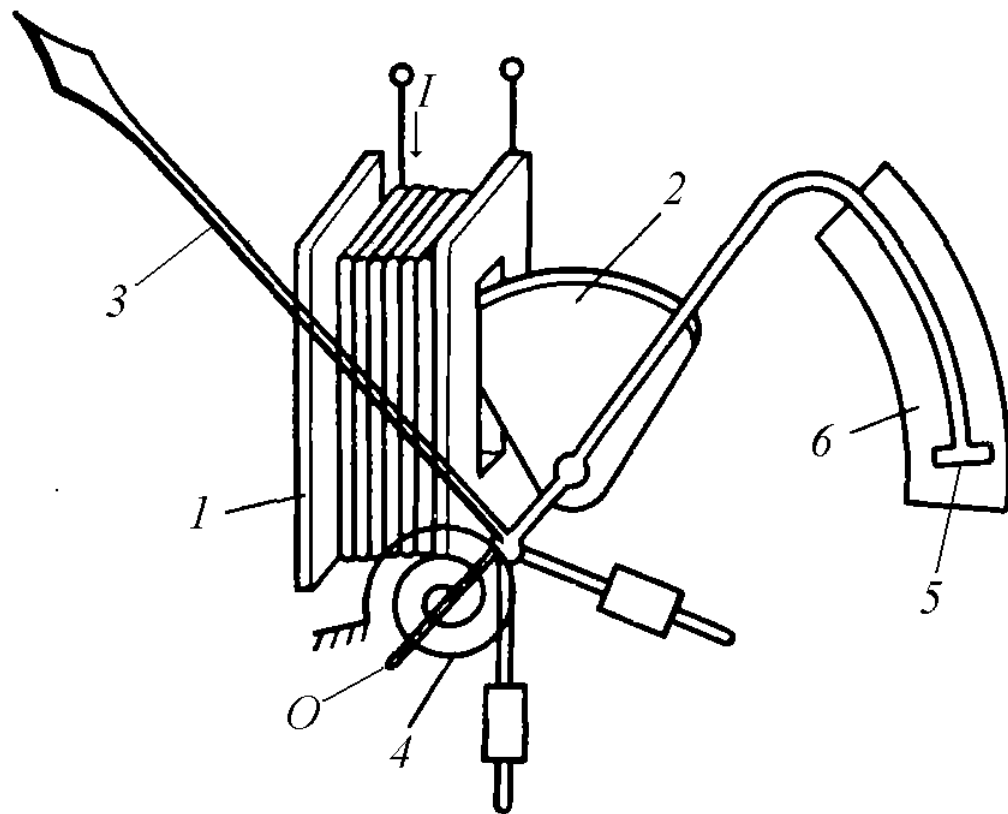
Увеличение чувствительности магнитоэлектрических приборов:

уменьшение противодействующего момента - подвижную систему крепят на растяжках (бронзовых проволочках), закручивание которых создает противодействующий момент.

Для измерения очень малых токов ( $10^{-8}$  –  $10^{-14}$  А) применяются гальванометры с подвешенной катушкой. Катушка подвешивается на тонкой металлической или кварцевой проволочке.

# Электромагнитные приборы

Принцип действия - взаимодействию магнитного поля катушки с током и железного сердечника.



- 1 – обмотка с током;
- 2 – стальной сердечник;
- 3 – указательная стрелка;
- 4 – спиральная пружинка;
- 5 – поршень;
- 6 – цилиндр

# Описание устройства и принципа действия прибора

Неподвижный элемент прибора – обмотка 1, выполненная из изолированной проволоки, включается в электрическую цепь. Подвижный элемент – стальной сердечник 2, имеющий форму лепестка, – эксцентрично укреплен на оси  $O$ . С этой же осью жестко соединены указательная стрелка 3, спиральная пружинка 4, обеспечивающая противодействующий момент, и поршень 5 успокоителя. Ток  $I$  в витках обмотки образует магнитный поток, сердечник 2 намагничивается и втягивается в обмотку. При этом ось  $O$  поворачивается и стрелка прибора отклоняется на угол  $\alpha$ .

Магнитная индукция в сердечнике пропорциональна току обмотки. Сила  $F$ , с которой сердечник втягивается в обмотку, зависит от тока и магнитной индукции  $B$  в сердечнике. Приближенно можно принять, что сила  $F$ , а следовательно, и обусловленный ею вращающий момент пропорциональны квадрату тока в катушке:

$$M_{\text{вр}} = k_3 I^2$$

Противодействующий момент, уравнивающий вращающий момент, пропорционален углу  $\alpha$ . При равенстве моментов имеем:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}} = k_2 \alpha = k_3 I^2$$

Тогда угол поворота стрелки находится в квадратичной зависимости от силы тока и шкала прибора оказывается неравномерной:

$$\alpha = \frac{k_3}{k_2} I^2$$

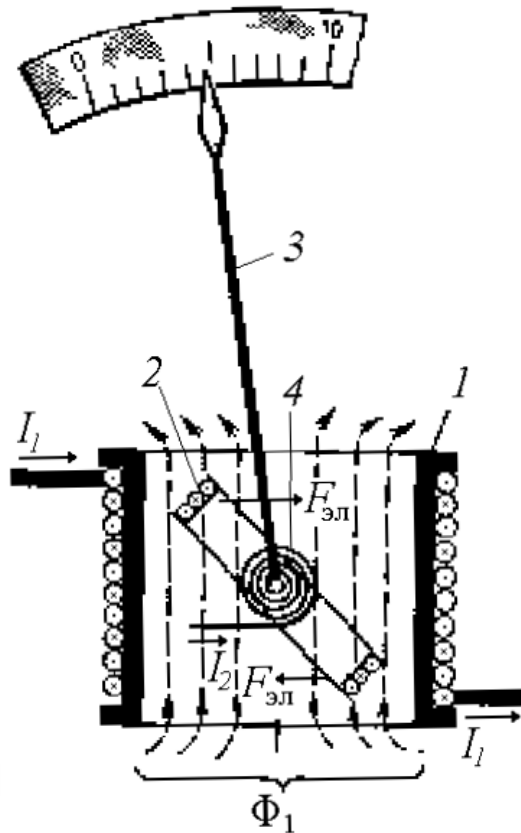
Для успокоения подвижной части прибора применяют воздушный демпфер. Он состоит из цилиндра 6 и поршня 5, шток которого укреплен на оси  $O$ . Сопротивление воздуха, оказываемое перемещением поршня в цилиндре, обеспечивает быстрое успокоение стрелки.

# Достоинства и недостатки

- Достоинства:
  - простота конструкции,
  - пригодность для измерения в цепях переменного тока
  - надежность в эксплуатации.
- Недостатки:
  - неравномерность шкалы,
  - влияние посторонних магнитных полей на точность измерений,
  - невысокий класс точности (используются для технических измерений)

# Электродинамические приборы

Принцип действия - взаимодействие тока подвижной обмотки с магнитным потоком неподвижной обмотки.



- 1 – неподвижная катушка;
- 2 – подвижная катушка;
- 3 – стрелка;
- 4 – спиральные пружинки

## Описание устройства и принципа действия прибора

Электродинамические приборы имеют две катушки. Одна из них неподвижная 1, а другая – подвижная 2. Подвижная обмотка укрепляется на оси  $OO'$  и расположена внутри неподвижной обмотки. На этой же оси укреплены указательная стрелка 3 и спиральные пружинки 4, через которые подводится ток к обмотке 2. Эти же пружинки создают противодействующий момент, пропорциональный углу закручивания  $\alpha$ .

При постоянном токе электромагнитная сила  $F_{\text{эл}}$ , действующая на проводники подвижной обмотки, пропорциональна току и магнитному потоку  $\Phi_1$ . Поскольку поток  $\Phi_1$  пропорционален току  $I_1$  неподвижной обмотки, вращающий момент, действующий на подвижную обмотку, пропорционален произведению токов обмоток

$$M_{\text{вр}} = C' \Phi_1 I_2 = C'' I_1 I_2$$

Значит и угол отклонения стрелки будет пропорционален произведению токов, а шкала прибора будет неравномерная.

# Достоинства и недостатки

- Достоинства:
  - пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока,
  - обладают высокой точностью.
- Недостатки:
  - низкая чувствительность,
  - влияние внешних магнитных полей на точность измерений,
  - чувствительность к перегрузкам (ток подводится через спиральные пружинки),
  - неравномерность шкалы (кроме ваттметра)

Цифровые измерительные  
приборы. Аналоговые  
преобразователи.



# Структурная схема цифрового измерительного прибора



АП - аналоговый преобразователь, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ЦОУ - цифровое отсчетное устройство.

АП изменяет масштаб входной величины  $x$  или преобразует ее в другую величину  $y = f(x)$ , более удобную для дальнейшей обработки.

АЦП – центральный элемент цифрового прибора - осуществляет преобразование непрерывной аналоговой величины в цифровой код.

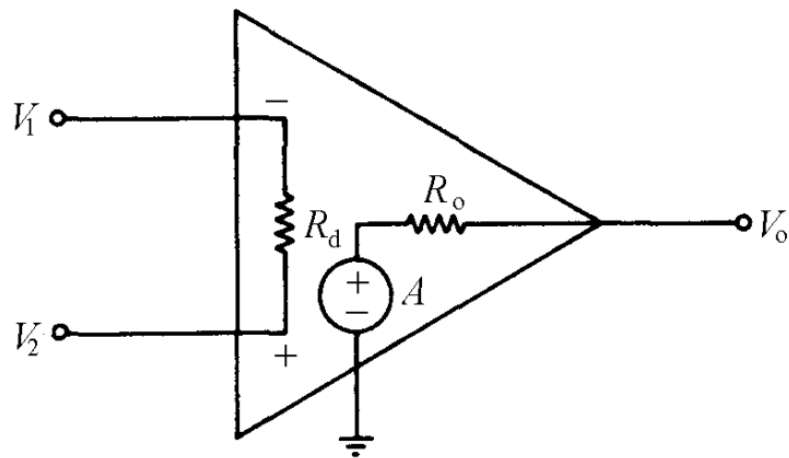
ЦОУ преобразует цифровой код в цифровые символы десятичной системы счисления (представляет собой цифровое табло или монитор компьютера)

# Операционные усилители

Схемы АП обычно строятся на основе специальных интегральных микросхем – операционных усилителей (ОУ).

*Операционные усилители* – аналоговые интегральные микросхемы, позволяющие производить преобразования непрерывных аналоговых электрических величин в другие аналоговые величины.

ОУ представляют собой наборы электрических элементов (транзисторов, конденсаторов, резисторов, диодов и т. д.), сформированных на кристалле кремния. Внутренне устройство ОУ весьма сложно. Однако для практического использования достаточно знать работу микросхемы в целом, которая определяется двумя небольшими правилами. Упрощенная эквивалентная схема ОУ:



Важнейшие контакты ОУ: входы  $V_1$  и  $V_2$  на схеме помечаются знаком минус (инверсионный вход) и плюс (неинверсионный вход); выход  $V_o$  на схеме выходит из вершины треугольника, расположенной справа; контакты питания микросхемы от источника постоянного напряжения (+15 и -15 В) на схеме обычно не показываются.

# Принципы работы и использования ОУ

ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень большим коэффициентом усиления  $A$ . На входы микросхемы подается дифференциальный сигнал с напряжениями  $V_2$  и  $V_1$  относительно некоторого общего провода (земли), на выходе получается напряжение величиной  $V_o$  относительно земли. Основное свойство операционного усилителя выражается формулой:

$$V_o = A(V_2 - V_1)$$

Для типичных ОУ коэффициент усиления составляет  $10^4$ – $10^8$ . Входное сопротивление ( $R_d$ ) –  $10^5$ – $10^7$  Ом. ОУ на схеме обозначается в виде треугольника (или наконечника стрелы), что символизирует усиление и направление от входа к выходу.

Для понимания принципов работы ОУ и схем АП предполагается, что используемый ОУ является **идеальным**, т. е. обладает следующими характеристиками: 1) коэффициент усиления  $A$  равен бесконечности; 2) входное сопротивление равно бесконечности; 3) выходное сопротивление равно 0; 4) ширина полосы пропускания равна бесконечности; 5) отсутствует напряжение смещения нуля, т.е.  $V_o = 0$ , если  $V_1 = V_2$ .

Для понимания принципов работы схем на основе ОУ будем рассматривать их как идеальные и использовать **два правила**:

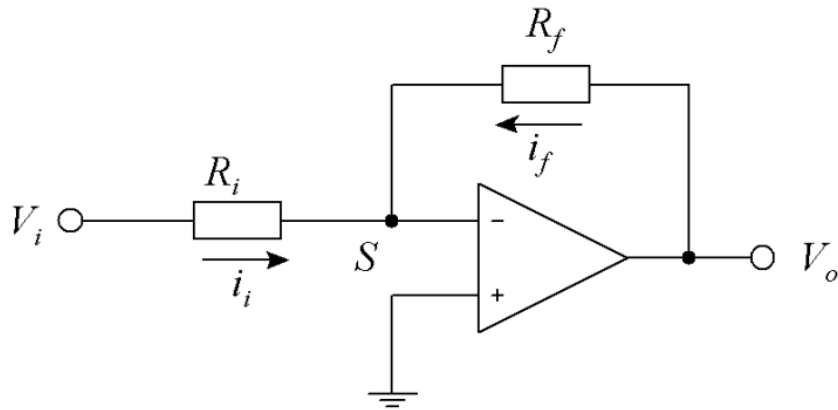
1. На двух входах ОУ действуют одинаковые напряжения;
2. Входные токи ОУ для обоих входов равны нулю.

# Базовые схемные блоки на основе ОУ

При построении схем с использованием ОУ всегда применяются *цепи с обратной связью*, в которых выходной сигнал ОУ соединяется с одним из его входов. Рассмотрим схемы и принципы действия базовых блоков используемых для построения АП.



# Инвертирующий усилитель



Используется для масштабирования входного сигнала поступающего на инверсионный вход ОУ.

Поскольку неинверсионный вход заземлен, его потенциал равен 0. Согласно правилу 1, потенциал инверсионного входа также равен 0 (виртуальная земля).

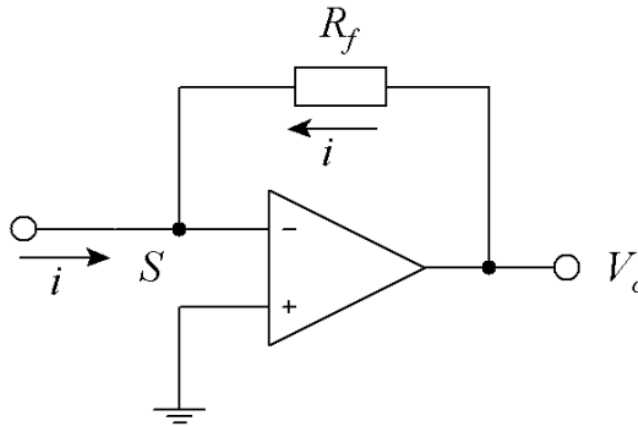
Согласно правилу 2, входной ток ОУ равен нулю. Применяя первое правило Кирхгофа к точке  $S$ , можно записать:  $i_i = -i_f$

Применяя закон Ома для участка цепи, запишем:  $\frac{V_i}{R_i} = -\frac{V_o}{R_f}$ , или  $V_o = -\frac{R_f}{R_i}V_i$

Таким образом, данная схема инвертирует входной сигнал и масштабирует с коэффициентом усиления  $R_f/R_i$ . Подбором сопротивлений резисторов можно задать масштаб изменения входного сигнала. Входное сопротивление инвертирующего усилителя  $R_i$  обычно невелико, что является недостатком для измерения напряжения.

Если  $R_f = R_i$ , то коэффициент усиления будет равен  $-1$  и такую схему называют *инвертором*.

## Преобразователь ток – напряжение



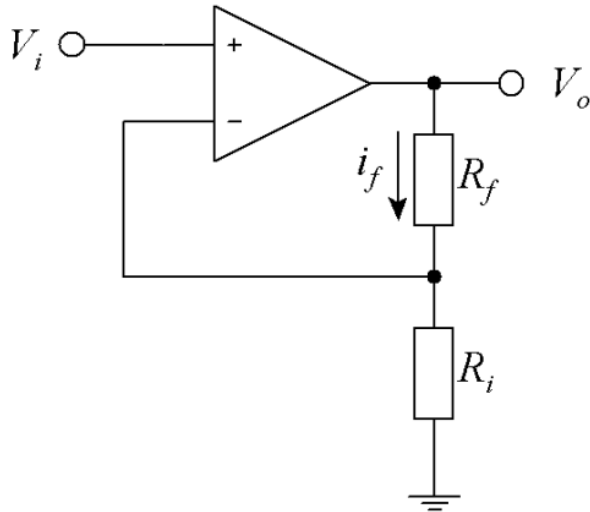
Эта схема - частный случай инвертирующего усилителя когда входное сопротивление отсутствует ( $R_i = 0$ ).

По правилу 1, напряжение на неинверсионном входе ОУ равно нулю, а согласно правилу 2, весь ток  $i$  протекает через резистор  $R_f$ , следовательно, напряжение на выходе ОУ будет равно:

$$V_o = -iR_f$$

Преобразователь необходим для измерения тока с помощью высокоомного вольтметра, например, в цепи рабочий – вспомогательный электрод.

## Неинвертирующий усилитель



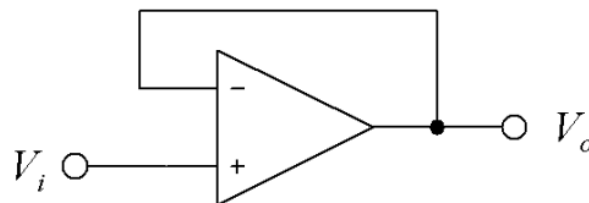
Входной сигнал подается на неинверсионный вход ОУ.

Согласно правилу 1, на инвертирующем входе ОУ также действует входное напряжение  $V_i$ . По правилу 2, ток  $i_f$  должен течь через резистор  $R_i$  на землю, не ответвляясь в ОУ:

$$i_f = \frac{V_i}{R_i} = \frac{V_o}{R_f + R_i} \quad \text{или} \quad V_o = \frac{R_f + R_i}{R_i} V_i = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i$$

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя положителен и всегда больше или равен 1. Входной сигнал можно только увеличивать. Входное сопротивление усилителя очень большое ( $10^5 - 10^7$  Ом).

## Повторитель напряжения



Эта схема - частный случай неинвертирующего усилителя, когда  $R_i = \infty$ , а  $R_f = 0$ .

Согласно правилу 1, на инвертирующем входе действует напряжение  $V_i$ , которое непосредственно передается на выход схемы:

$$V_o = V_i$$

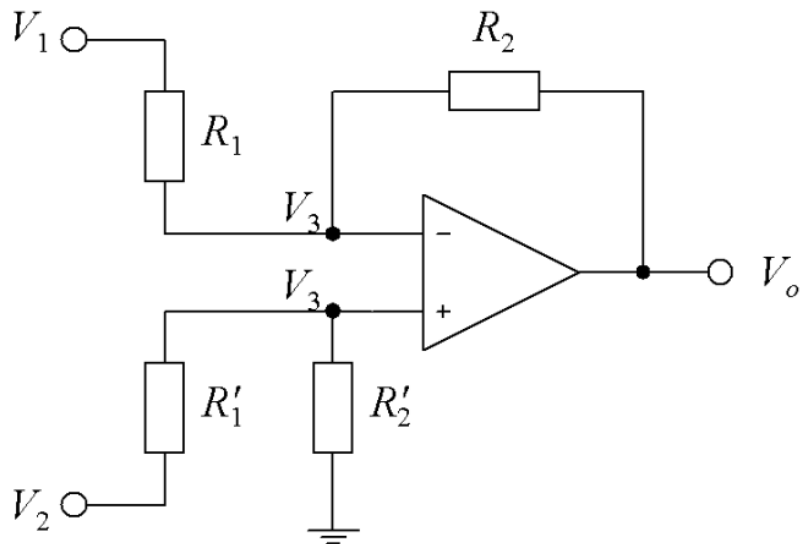
Это же соотношение получится, если воспользоваться предыдущей формулой для неинвертирующего усилителя:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i = \left(1 + \frac{0}{\infty}\right) V = V$$

Повторитель напряжения используется в качестве буферного усилителя или преобразователя сопротивлений при подключении высокоомного источника сигнала к низкоомной нагрузке. Данная схема может быть использована на входе вольтметра с высоким входным сопротивлением.



# Дифференциальный усилитель



Представляет собой комбинацию инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

Согласно правилу 2, входные токи для обоих входов ОУ равны 0. Поэтому ток, определяемый напряжением  $V_2$ , протекает через резисторы  $R'_1$  и  $R'_2$  на землю. На неинвертирующем входе ОУ будет напряжение:

$$V_3 = \frac{R'_2}{R'_2 + R'_1} V_2$$

Согласно правилу 1, напряжение на инвертирующем входе должно быть равно также  $V_3$ . Ток, определяемый напряжением  $V_1$ , выразим по закону Ома для участка цепи:

$$\frac{V_1 - V_3}{R_1} = \frac{V_3 - V_o}{R_2}$$

Подставляя в последнее уравнение выражение для  $V_3$ , найдем значение напряжения на выходе усилителя  $V_o$

$$V_o = \frac{R'_2 (R_1 + R_2)}{R_1 (R'_1 + R'_2)} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1$$

Если взять  $R'_1 = R_1$  и  $R'_2 = R_2$ , то выходное напряжение будет пропорционально разности входных напряжений:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

Дифференциальный усилитель способен подавлять сигналы помех, одинаковые для обоих его входов.

# Инструментальный (измерительный) усилитель

Состоит из двух неинвертирующих усилителей, подключенных к входам дифференциального усилителя.

Ток, текущий через резистор  $R_3$  равен

$$i = \frac{V_4 - V_3}{R_3} = \frac{V_2 - V_1}{R_4 + R_3 + R_4}$$

Коэффициент усиления входного каскада:

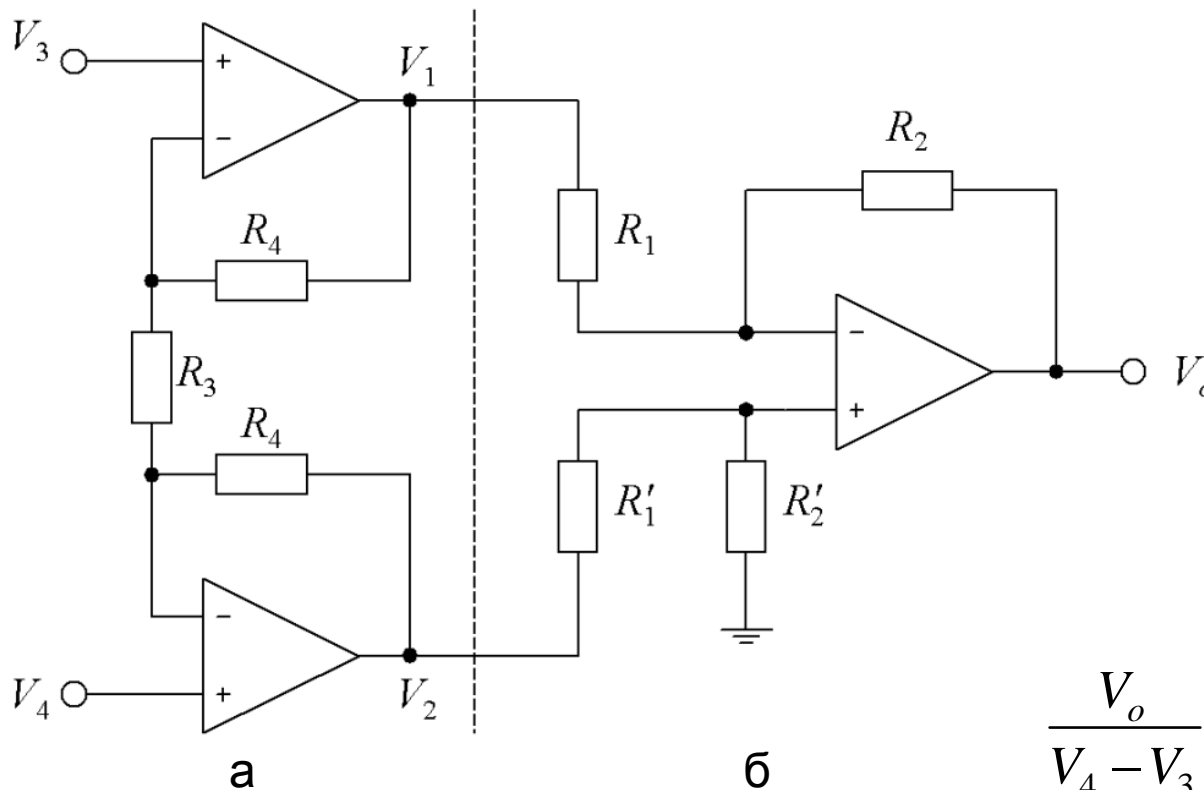
$$\frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3} = \frac{2R_4 + R_3}{R_3}$$

Выходной сигнал дифференциального усилителя:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

Общий коэффициент усиления:

$$\frac{V_o}{V_4 - V_3} = \frac{R_2}{R_1} \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R_4 + R_3}{R_3}$$



**а** – входной каскад, состоящий из двух неинвертирующих усилителей;  
**б** – выходной каскад (дифференциальный усилитель)

# Сумматор

Инвертирующий усилитель может суммировать несколько входных напряжений. Так как ток, втекающий в ОУ равен нулю, то

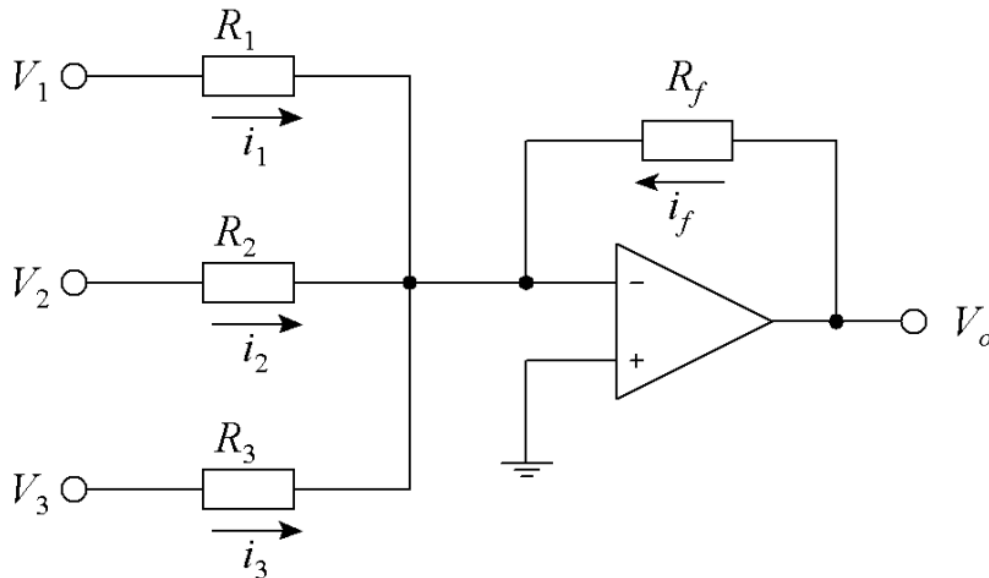
$$i_f = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

Поскольку напряжение на инвертирующем входе равно нулю, то токи можно выразить по закону Ома:

$$i_1 = \frac{V_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{V_2}{R_2}, \quad \dots, \quad i_n = \frac{V_n}{R_n}, \quad i_f = -\frac{V_o}{R_f}$$

Тогда выходное напряжение сумматора будет равно:

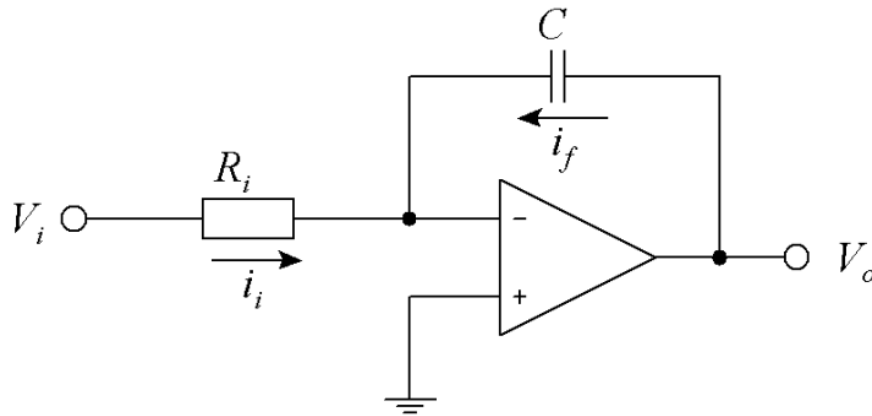
$$V_o = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$



Резистор  $R_f$  определяет общее усиление схемы. Сопротивления  $R_i$  задают значения весовых коэффициентов и входных сопротивлений соответствующих каналов. Если значения всех сопротивлений выбрать одинаковыми, то выходное напряжение будет равно сумме входных напряжений.

# Интегратор

Вырабатывает выходной сигнал, пропорциональный интегралу (по времени) от входного сигнала. В цепь обратной связи ОУ включается конденсатор.



Ток, протекающий через резистор  $R_i$ , приводит к зарядке конденсатора  $C$ , что ведет к увеличению выходного напряжения с обратным знаком.

Емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{V_o} = \frac{i_f t}{V_o}$$

Выходное напряжение будет зависеть от времени прохождения постоянного тока:

$$V_o = \frac{i_f t}{C}$$

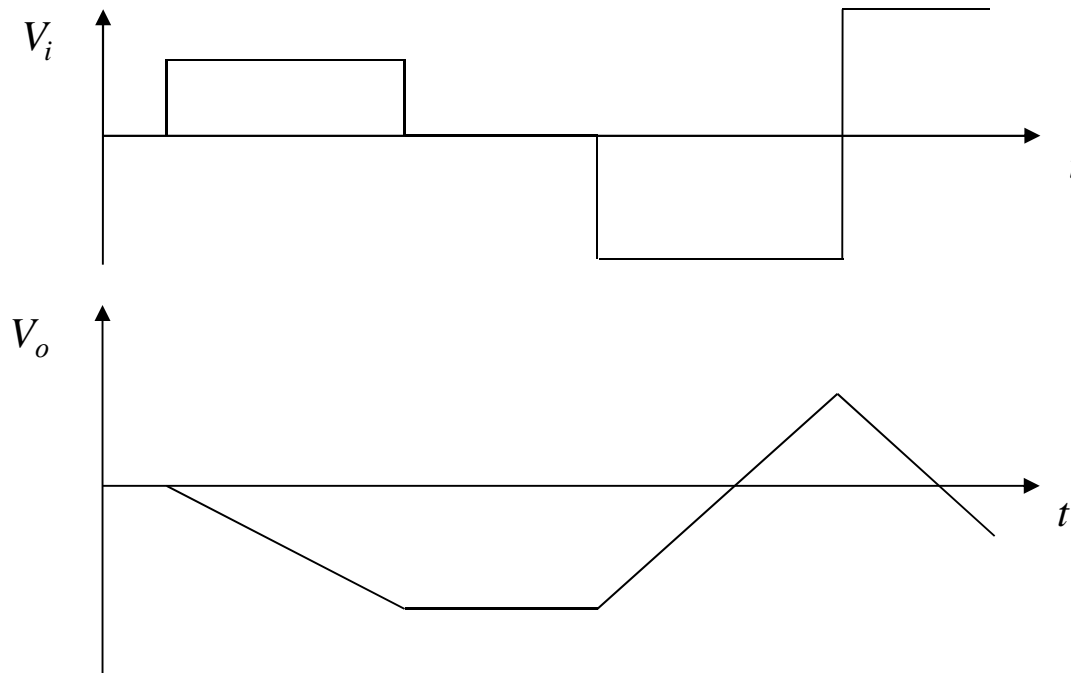
Величина тока будет определяться входным напряжением:

$$i_i = \frac{V_i}{R} = -i_f$$

Тогда зависимость выходного сигнала схемы от входного будет иметь вид:

$$V_o = -\frac{V_i t}{RC}$$

При действии на входе постоянного напряжения  $V_i$  выходное напряжение будет монотонно и линейно со временем изменяться:



Интегратор можно использовать для построения *генератора линейной развертки потенциала*. Скорость развертки зависит от величины входного сигнала, сопротивления и емкости:

$$V_o = vt = -\frac{V_i}{RC}t \Rightarrow v = -\frac{V_i}{RC}$$

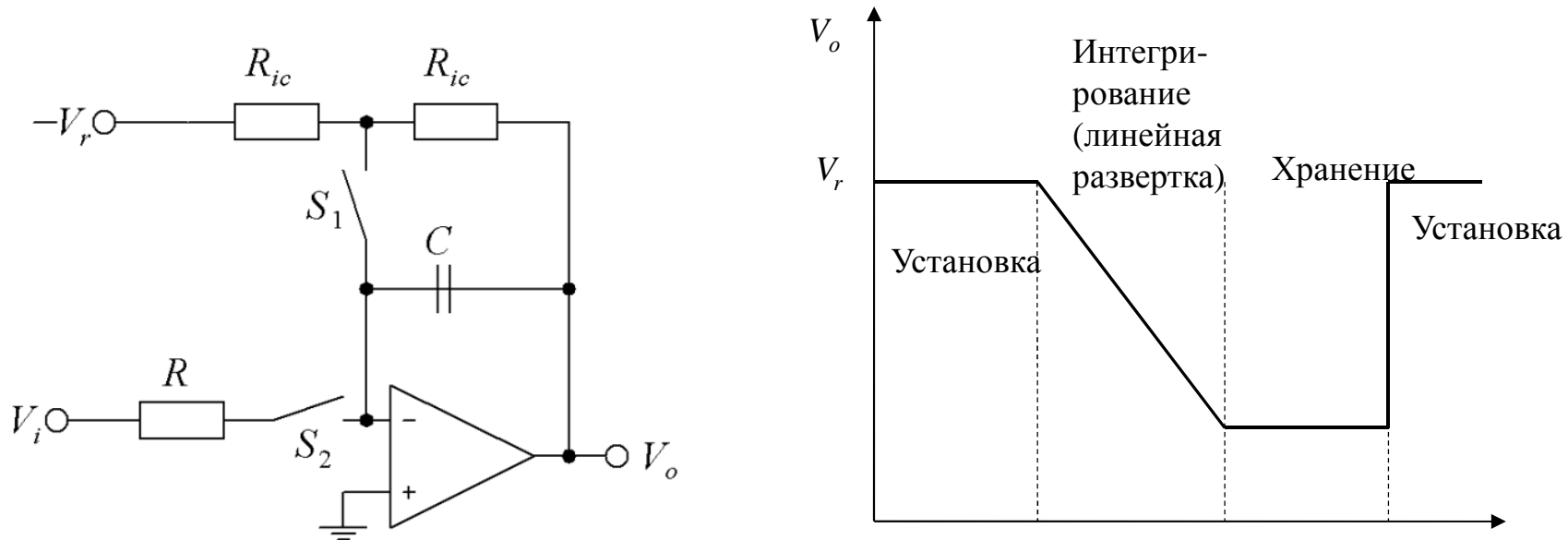
Если входное напряжение интегратора меняется во времени, то выходное напряжение уже нельзя представить простым алгебраическим выражением. Выходное напряжение в таком случае выразится интегралом от входного напряжения по времени:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt + V_{ic}$$

$V_{ic}$  – напряжение на конденсаторе в начальный момент времени.

# Практический интегратор и режимы его работы

Практическая схема интегратора содержит ключи, позволяющие задавать различные режимы работы интегратора и предотвратить насыщение ОУ.



Режим *установки* в начальное состояние - ключ  $S_1$  замкнут, а ключ  $S_2$  разомкнут.

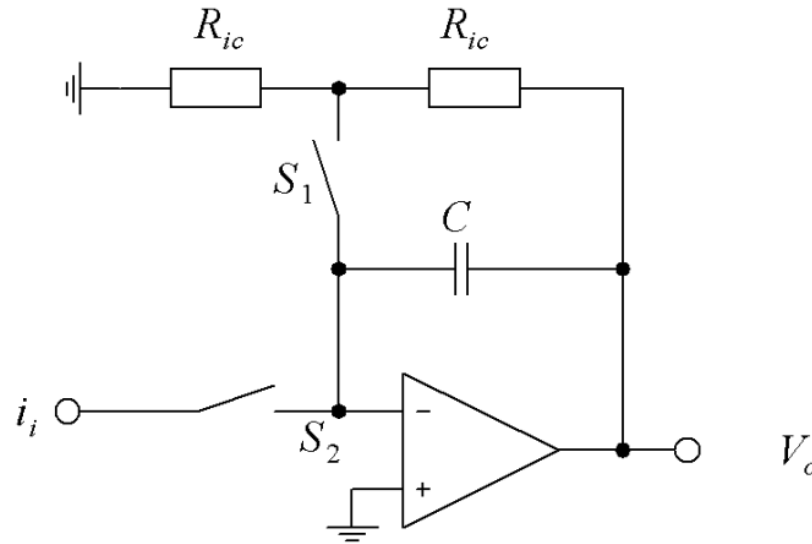
Схема работает как инвертор, который заряжает конденсатор до напряжения, равного взятому с обратным знаком опорному напряжению ( $-V_r$ ):  $V_{ic} = V_r$

Режим *интегрирования* - ключ  $S_1$  разомкнут, а ключ  $S_2$  замкнут. Происходит интегрирование входного напряжения.

Режим *хранения* - оба ключа разомкнуты, и выходное напряжение поддерживается на постоянном уровне для считывания или последующей обработки.

# Интегратор входного тока (кулонометр)

Если в схеме интегратора входное сопротивление  $R = 0$ , то получим интегратор входного тока

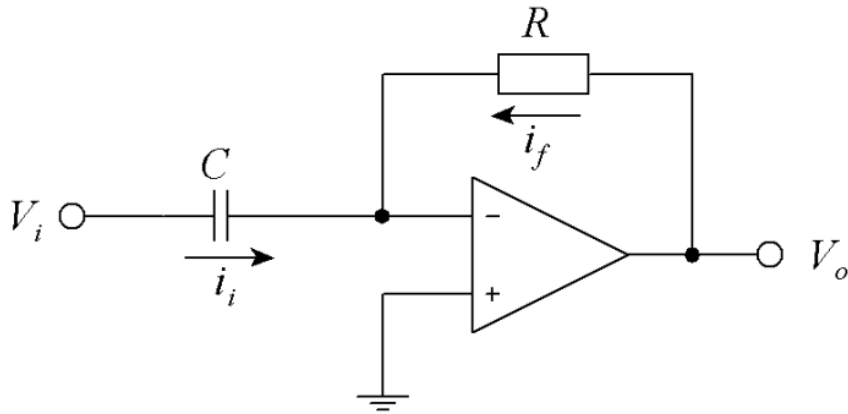


Связь между выходным напряжением и током запишется в следующем виде:

$$V_o = -\frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

# Дифференциатор

Вырабатывает выходной сигнал, пропорциональный скорости изменения во времени входного сигнала



Ток через конденсатор протекает также по цепи обратной связи:

$$i_i = C \frac{dV_i}{dt} = -\frac{V_o}{R}$$

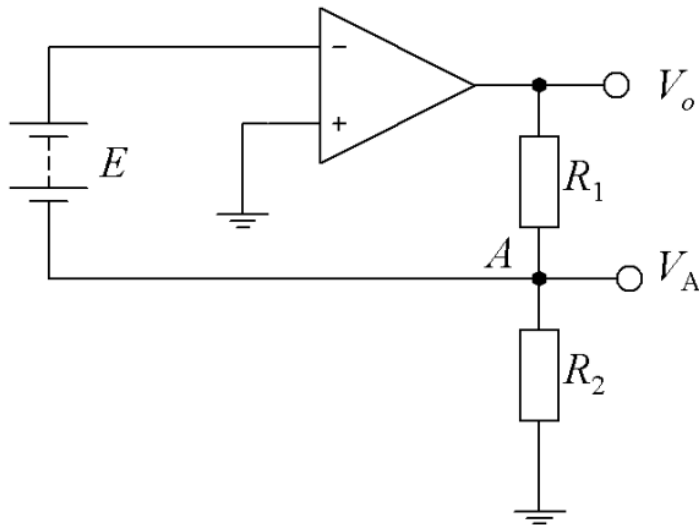
Отсюда величина выходного сигнала будет прямо пропорциональна скорости изменения входного сигнала:

$$V_o = -RC \frac{dV_i}{dt}$$



# Стабилизатор напряжения

Представляет собой инвертирующий усилитель, в цепь обратной связи которого включен источник постоянного напряжения



Поскольку верхний конец источника имеет напряжение  $+E$  по сравнению с нижним, а неинверсионный вход заземлен, то напряжение  $V_A$  должно быть равно «минус»  $E$ :

$$V_A = -E$$

Напряжение в точке  $A$  определяется только напряжением источника питания и не зависит от резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Данная схема позволяет поддерживать постоянное напряжение в точке  $A$ .

Рассчитаем выходное напряжение стабилизатора. Ток, текущий через резисторы  $R_1$  и  $R_2$  на землю будет равен:

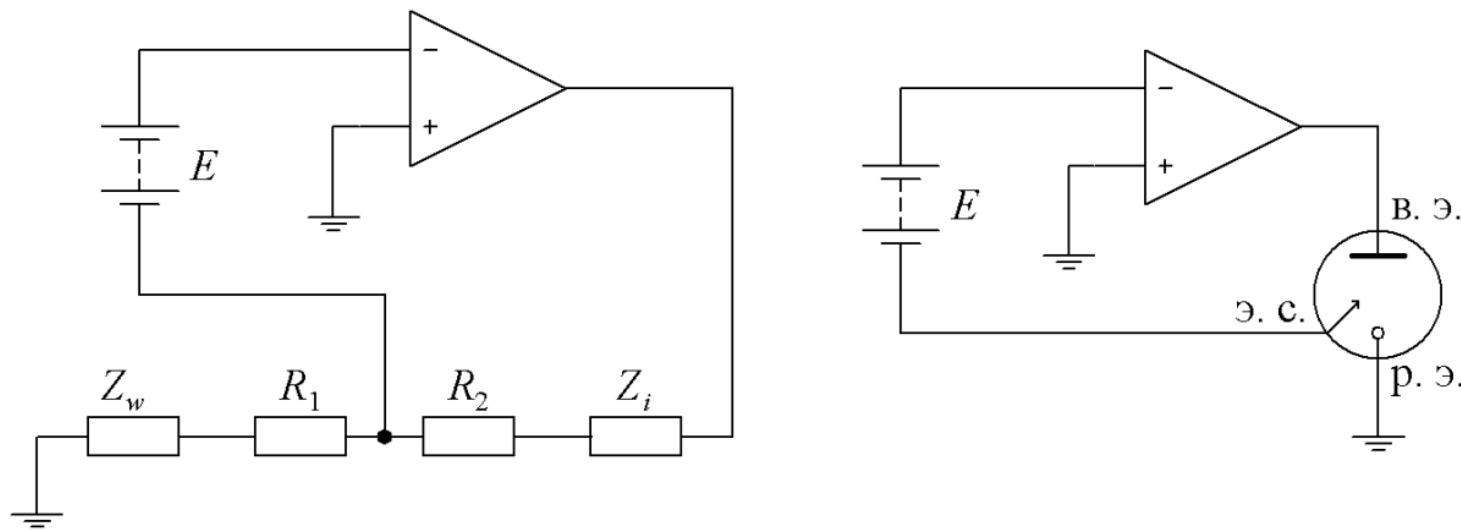
$$i = \frac{V_A}{R_2} = -\frac{E}{R_2} = \frac{V_o}{R_1 + R_2}$$

Выходное напряжение будет равно:

$$V_o = -E \frac{R_1 + R_2}{R_2} = -E \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

# Простейший потенциостат

Схема потенциостата основана на схеме стабилизатора напряжения. Свойство стабилизатора поддерживать постоянное напряжение в точке А предыдущей схемы используется для поддержания постоянного (заданного) потенциала рабочего электрода относительно электрода сравнения.

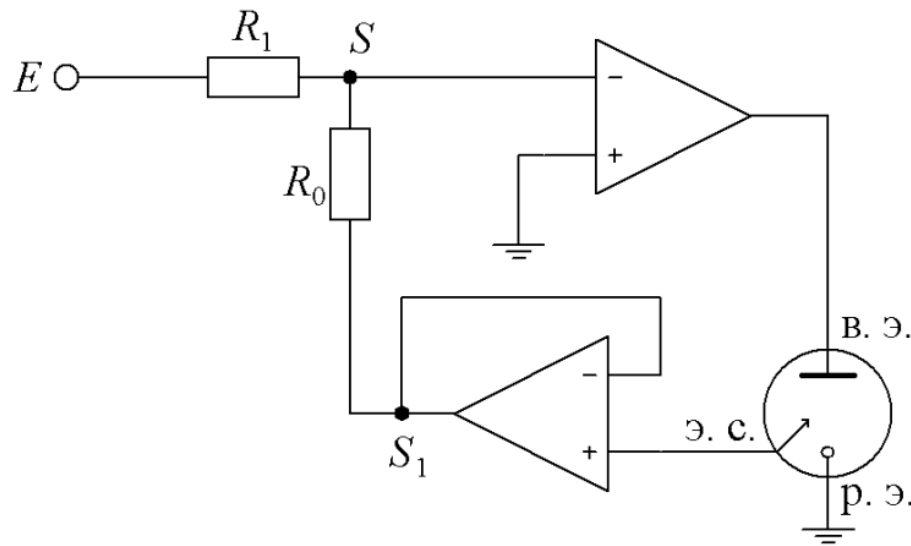


Электрод сравнения подключен к точке, которая разбивает сопротивление раствора на две части, зависящие от положения кончика капилляра Лuggина в растворе. Электрод сравнения подключен к точке постоянного напряжения стабилизатора, а рабочий электрод заземлен.

Электрод сравнения находится при потенциале  $-E$  относительно земли. Так как рабочий электрод заземлен, его потенциал относительно электрода сравнения равен  $+E$  и не зависит от импедансов рабочего ( $Z_w$ ), вспомогательного ( $Z_i$ ) электродов и от части сопротивления раствора  $R_2$ . Операционный усилитель будет поддерживать такой ток между рабочим и вспомогательным электродом, чтобы потенциал рабочего электрода относительно электрода сравнения был равен  $E$ .

Основной *недостаток* такого потенциостата состоит в том, что ни один из выводов источника напряжения не является истинной землей. Генератор (задатчик) напряжения для такого потенциостата должен обладать дифференциальным плавающим выходом. Большинство задатчиков этому условию не удовлетворяют и вырабатывают выходной сигнал относительно земли.

## Схема потенциостата с датчиком, имеющим заземленный выход



Входное напряжение относительно земли подается на инверсионный вход ОУ. В точке  $S$ , которая является виртуальной землей, суммарный ток должен быть равен нулю. Следовательно, через  $R_0$  должен течь ток, равный току, протекающему через  $R_1$ , и обратный ему по знаку.

Чтобы избежать протекания тока в цепи электрода сравнения, последний подключается к повторителю напряжения, и потенциал электрода сравнения совпадает с потенциалом точки  $S_1$ . Условие равенства токов на входе и в цепи обратной связи:

$$i = \frac{E}{R_1} = -\frac{E_{\text{э. с.}}}{R_0}$$

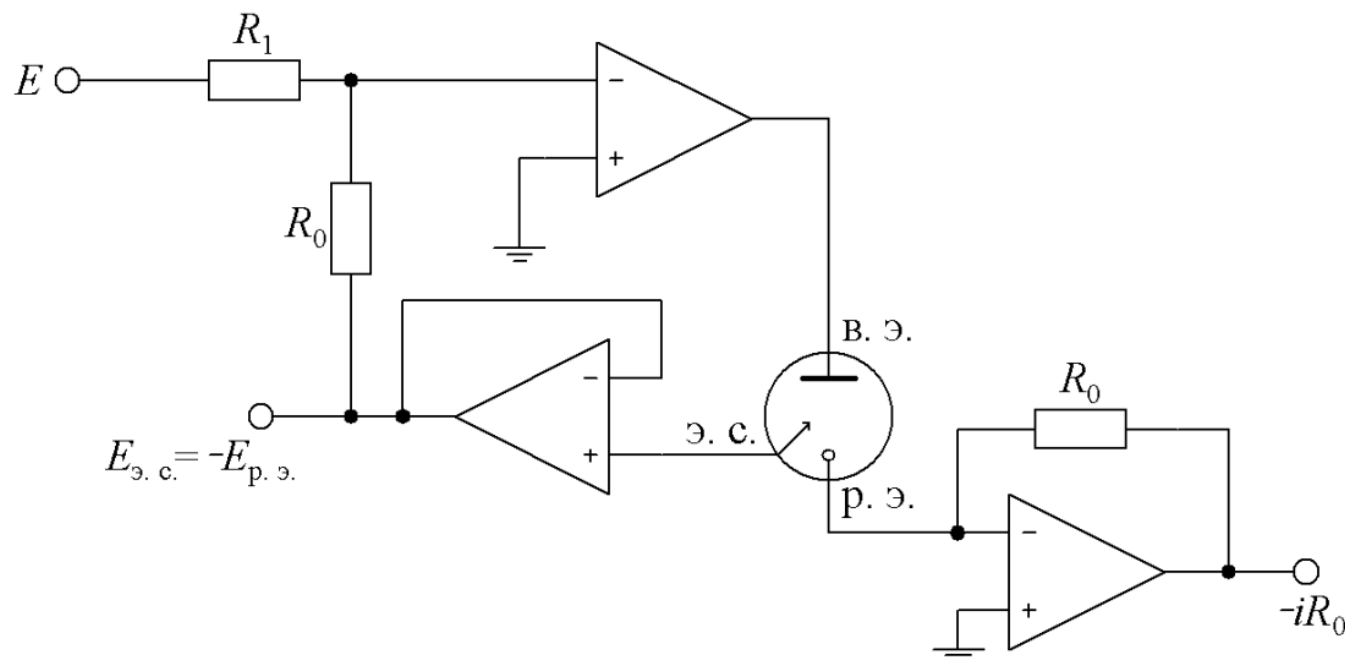
Тогда потенциал рабочего электрода относительно электрода сравнения будет равен:

$$E_{\text{р. э.}} = -E_{\text{э. с.}} = E \frac{R_0}{R_1}$$

Если выбрать сопротивления такие, что  $R_0 = R_1$ , то потенциал рабочего электрода будет равен входному напряжению:

$$E_{\text{р. э.}} = E$$

## Схема потенциостата с выводами для контроля тока и потенциала



Потенциал электрода можно измерять, подключив вольтметр к выходу повторителя напряжения. Потенциал в этой точке будет равен потенциалу электрода сравнения относительно земли или потенциалу рабочего электрода относительно электрода сравнения с обратным знаком. Если «минус» вольтметра подключить к выходу повторителя напряжения, а «плюс» – к общему проводу (земле), то вольтметр будет показывать потенциал рабочего электрода относительно электрода сравнения.

Ток через рабочий электрод поступает на вход преобразователя ток-напряжение, который позволяет измерять напряжение, пропорциональное току, через ячейку с обратным знаком. Если «минус» вольтметра для измерения тока подключить к выходу преобразователя ток – напряжение, а «плюс» – к земле, то вольтметр будет показывать напряжение, пропорциональное току:

$$E_i = iR'_0$$

При таком измерении тока рабочий электрод находится при потенциале земли, хотя напрямую с землей не связан (виртуальный нуль). Это является существенным условием работы схемы потенциостата.

Рабочие характеристики такого потенциостата будут ограничены параметрами ОУ. Это выходное напряжение  $\pm(12-13\text{ В})$  и выходной ток около 10 мА. Однако и таких параметров для многих измерений бывает достаточно. Например, если использовать электроды малой площади или микроэлектроды, то такого тока хватит. Более мощные потенциостаты требуют включения в выходную цепь перед вспомогательным электродом специальных усилителей: неинвертирующие усилители на полевых транзисторах с небольшим коэффициентом усиления способны давать большие токи и напряжения.

Цифровые измерительные  
приборы. Аналого-цифровые  
преобразователи (АЦП).

# Цифровые коды

- При обработке и хранении результатов измерения в ЭВМ используют двоичные цифровые коды:

– *Десятичный* цифровой код:

- $123 = 1 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$

3 разряда

– *Двоичный* цифровой код:

- $123 = 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 1111011$

7 разрядов



# Цифровые коды

- Разрядность – важнейшая характеристика АЦП:
  - В 8-разрядном двоичном коде можно представить числа в диапазоне:
    - от  $0 = 00000000$  до  $255 = 11111111$
  - В 10-разрядном коде:
    - от  $0 = 0000000000$  до  $1023 = 1111111111$

# Цифровые коды

- Для представления на цифровых табло измеряемой величины в десятичном виде используют *двоично-десятичный код* - каждая десятичная цифра кодируется 4-разрядным двоичным кодом:

0 – 0000;    1 – 0001;    2 – 0010;    3 – 0011;    4 – 0100;  
5 – 0101;    6 – 0110;    7 – 0111;    8 – 1000;    9 – 1001.

# Цифровые коды

- Для представления положительных и отрицательных чисел в двоичном коде используют биполярные двоичные коды. Для хранения информации о знаке используют старший разряд числа (0-положительное число; 1 – отрицательное число).

# Биполярные двоичные коды

- Дополнительный код
- Обратный код
- Прямой код
- Смещенный код

# Дополнительный код

Положительное число представляется с нулевым значением знакового разряда. Код отрицательного числа формируется путем дополнения каждого разряда соответствующего положительного числа единицей с последующим прибавлением 1 к полученной двоичной комбинации.

3-хразрядный код:

$000 = 0$	$001 = +1$	$010 = +2$	$011 = +3$
$100 = -4$	$101 = -3$	$110 = -2$	$111 = -1$

# Дополнительный код

- Достоинства
  - возможность выполнения операции вычитания путем простого сложения кодов положительных и отрицательных чисел;
  - единственность представления 0.
- Недостаток
  - резкое изменение кодовой комбинации при переходе через 0

# Обратный код

отрицательное число получается путем простой замены всех «нулей» на «единицы», а «единиц» на «нули» в соответствующем положительном числе.

3-хразрядный код:

000 = 0+	001 = +1	010 = +2	011 = +3
100 = -3	101 = -2	110 = -1	111 = 0-

# Обратный код

- Достоинство
  - упрощение логических операций
- Недостатки
  - наличие двух нулей (с нулевыми и единичными значениями всех разрядов);
  - для сложения чисел в обратном коде может понадобиться два этапа



# Прямой код

для одинаковых по абсолютной величине положительных и отрицательных чисел значения всех разрядов совпадают, за исключением знакового разряда.

3-хразрядный код:

000 = 0+	001 = +1	010 = +2	011 = +3
100 = 0-	101 = -1	110 = -2	111 = -3

# Прямой код

- Достоинство
  - при переходе через 0 кодовая комбинация меняется плавно
- Недостаток
  - наличие двух нулей

# Смещенный код

похож на дополнительный, отличается только значениями старшего значащего разряда – для положительных чисел и 0 старший разряд равен 1, а для отрицательных – 0. Смещенный код фактически представляет собой натуральный код, нуль которого смещен на отрицательный конец полного диапазона представляемых чисел

3-хразрядный код:

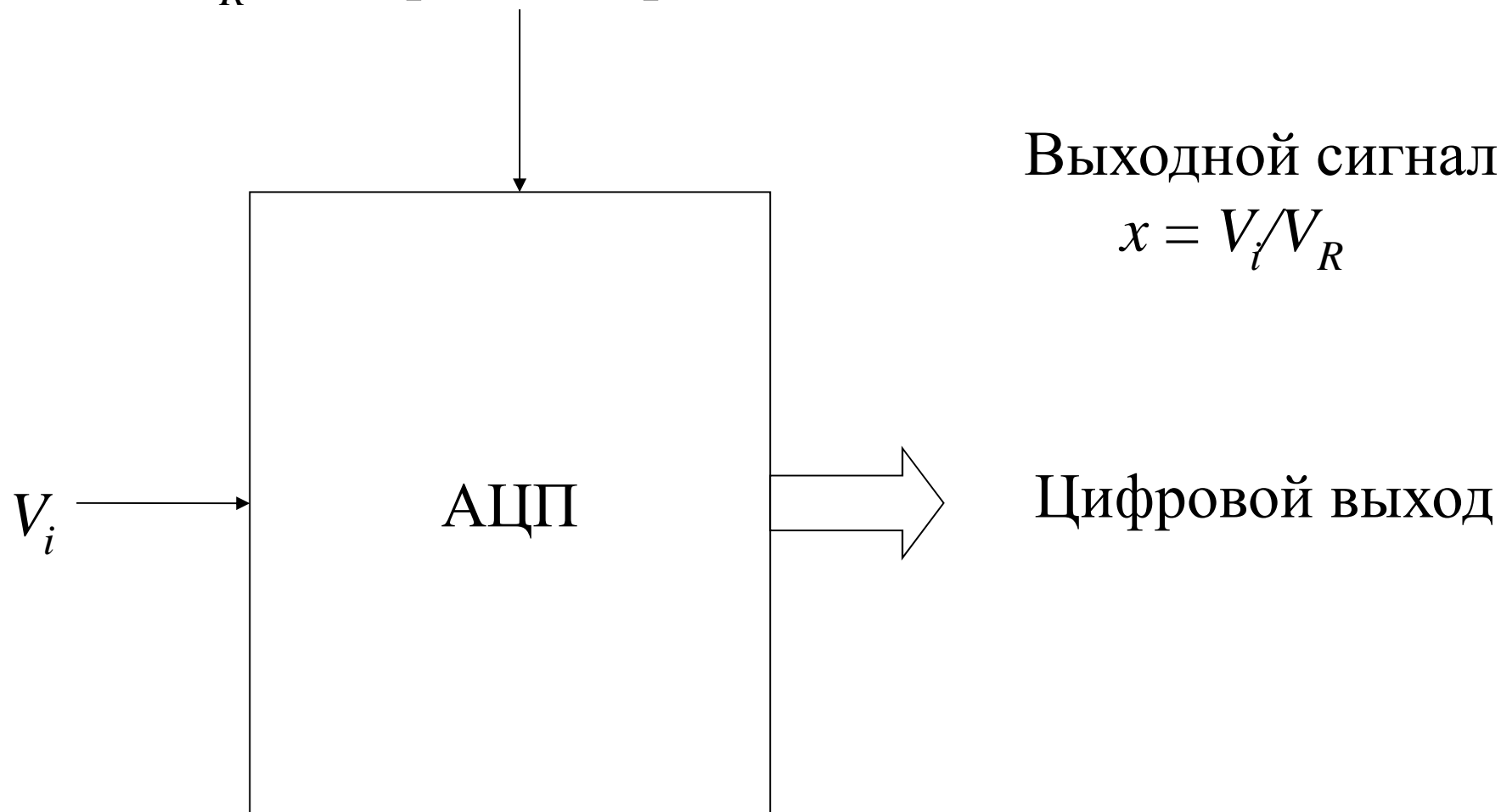
000 = -4	001 = -3	010 = -2	011 = -1
100 = 0	101 = 1	110 = 2	111 = 3

# Смещенный код

- Достоинство
  - при переходе через 0 кодовая комбинация меняется плавно
- Недостаток
  - для сложения чисел в обратном коде может понадобиться два этапа

# Принцип работы АЦП

$V_R$  – опорное напряжение



# Принцип работы АЦП

- Величина опорного сигнала задает диапазон изменения входного сигнала АЦП
- Разрядность определяет разрешение преобразования:

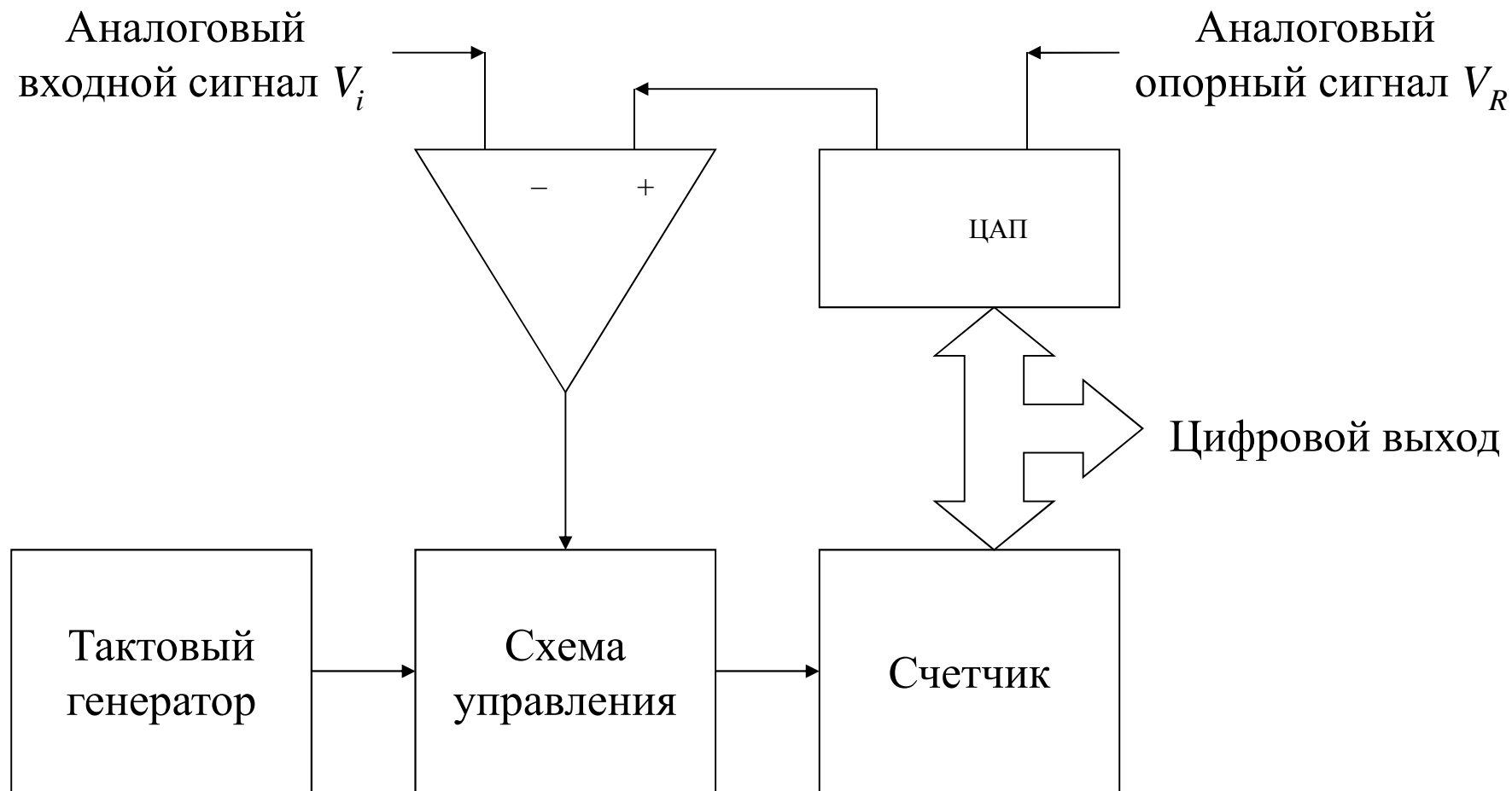
3-разрядный АЦП - весь диапазон входного сигнала может быть разбит на  $2^3 = 8$  уровней. Наименьшая величина аналогового сигнала, которую можно представить при этом, будет составлять  $1/8$  от полного диапазона.  $1/8$  называется *младший значащий разряд* (МЗР).
- Время преобразования:  $\sim 10^{-9} - 10^{-3}$  с.

# Принцип работы АЦП

- Входной диапазон АЦП – от 0 до +5 В
  - Разрядность – 6
    - Младший значащий разряд:  $1/2^6 = 1/64 = 0,015625$
    - Миним. представимое напряжение:  $5 * 1/64 = 78,125$  мВ
  - Разрядность – 8
    - Младший значащий разряд:  $1/2^8 = 1/256 \approx 0,0039$
    - Миним. представимое напряжение:  $5 * 1/256 \approx 19,53$  мВ
  - Разрядность – 10
    - Младший значащий разряд:  $1/2^{10} = 1/1024 \approx 0,001$
    - Миним. представимое напряжение:  $5 * 1/1024 \approx 4,9$  мВ

# Принцип работы АЦП

## Структурная схема АЦП с использованием ЦАП



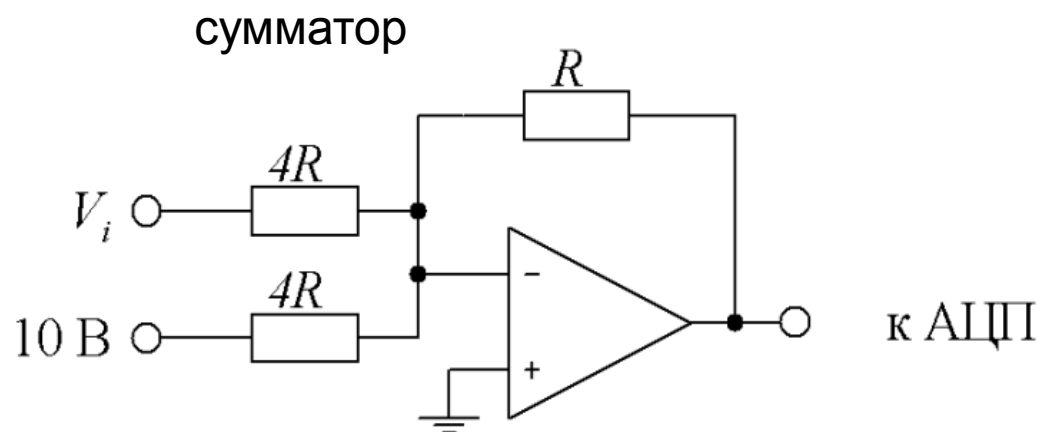
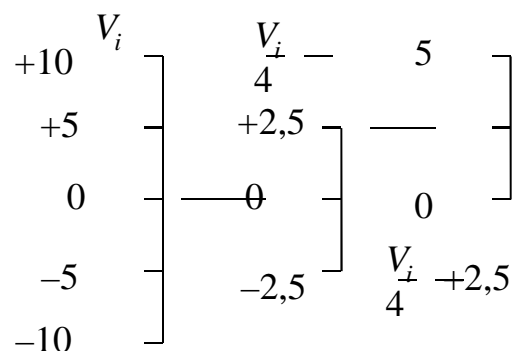


# Источники стабильного опорного напряжения

В виде интегральных схем – 2 вида источников:

- Стабилитроны,  $\sim 6,9\text{В}$
- «Скрытые» зенеровские диоды (лучшие характеристики)  $\sim 1,2\text{ В}$ .

# Схема согласования биполярного сигнала с униполярным АЦП



$$V_o = -R \left( \frac{V_i}{4R} + \frac{10}{4R} \right) = -\frac{V_i}{4} + 2,5$$

$$\text{Если } V_i = +10 \text{ В: } V_o = -\frac{10}{4} + 2,5 = 0$$

$$\text{Если } V_i = -10 \text{ В: } V_o = -\frac{-10}{4} + 2,5 = 5 \text{ В}$$

# Основы статистической обработки данных.

# Погрешности измерения

- Абсолютные

$$\Delta X = |X_{\text{изм}} - X_{\text{ист}}|$$

- Относительные

$$\delta = \frac{\Delta X}{|X_{\text{изм}}|} \cdot 100\%$$

# Погрешности измерения по происхождению

- Систематические - повторяются многократно при измерениях и вызваны дефектами или недостаточной чувствительностью измерительной аппаратуры.
- Случайные - при повторных измерениях проявляются по-разному и вызваны различными причинами, учесть которые заранее невозможно.
- Грубые - проявляются в виде сильного отклонения от ожидаемого значения и вызваны, как правило, ошибками в проведении эксперимента.

# Систематические погрешности

Минимизируются настройкой и регулировкой аппаратуры, соблюдением условий измерений и т.д.

# Грубые погрешности

Можно выявить и отбросить проведением статистической обработки данных.

Используется критерий грубых ошибок.

# Случайные погрешности

- Можно количественно оценить проведением статистической обработки данных.
- Можно уменьшить увеличением числа повторных опытов.



# Случайные погрешности

Для оценки случайных ошибок необходимы результаты нескольких повторных измерений:

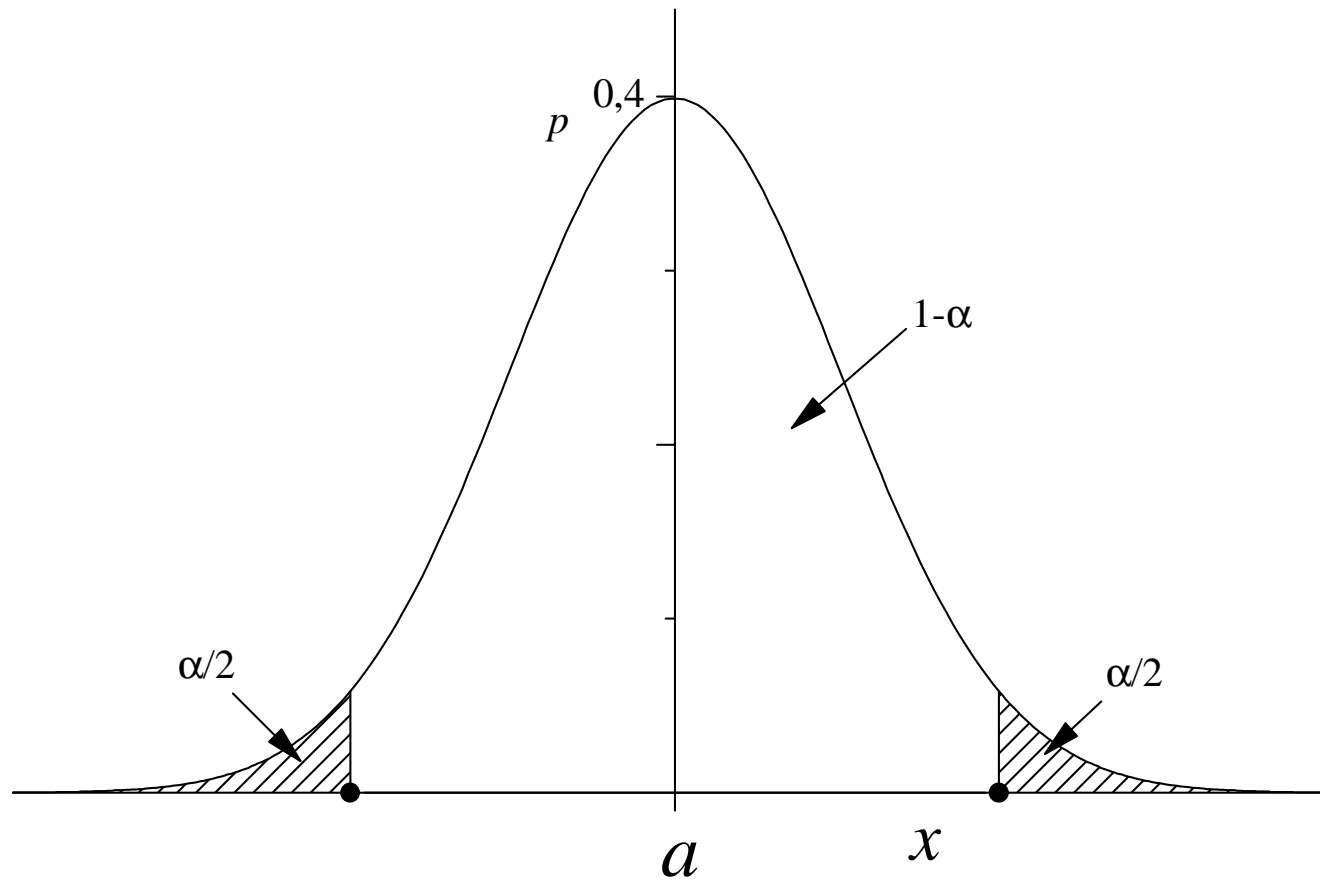
$X_i$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

$n$  – число повторных измерений величины  $X$ .

# Случайные погрешности

Распределение случайных ошибок измерения величины  $x$ : вероятность больших отклонений измеренного значения от истинного значительно меньше, вероятности малых отклонений – *нормальный закон распределения*

# Нормальный закон распределения



$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$

# Случайные погрешности

При оценке погрешности необходимо задать доверительную вероятность  $p$  с которой измеренное значение попадает в некоторый интервал значений. Этот интервал и определяет величину случайной погрешности. Вместо доверительного интервала иногда задают уровень значимости  $\alpha$ :  $\sigma = 1-p$

Обычно выбирают доверительные вероятности 0,95; 0,90; 0,99 (уровни значимости 0,05; 0,10; 0,01).

# Случайные погрешности

- В качестве наиболее достоверного результата берется среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Разброс измеренных значений относительно среднего характеризуется

- дисперсией  $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
- среднеквадратичным отклонением

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

# Случайные погрешности

Измеренное значение  $x$  с учетом случайных ошибок можно представить в виде  $\bar{x} \pm \Delta$

Где 
$$\Delta = t(p_0, n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$t(p_0, n-1)$  – коэффициент Стьюдента приводится в таблицах для разных доверительных вероятностей  $p_0$  и разного числа измерений.

Случайная ошибка с ростом  $n$  уменьшается обратно пропорционально корню из числа опытов

# Значения коэффициента Стьюдента

$\alpha$ $n-1$	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
1	6,314	12,706	63,657	127,321	636,619
2	2,920	4,303	9,925	14,089	31,599
3	2,353	3,182	5,841	7,453	12,924
4	2,132	2,776	4,604	5,598	8,610
5	2,015	2,571	4,032	4,773	6,869
6	1,943	2,447	3,707	4,317	5,959
7	1,895	2,365	3,499	4,029	5,408
8	1,860	2,306	3,355	3,833	5,041
9	1,833	2,262	3,250	3,690	4,781
10	1,812	2,228	3,169	3,581	4,587
$\infty$	1,645	1,960	2,576	2,807	3,291