

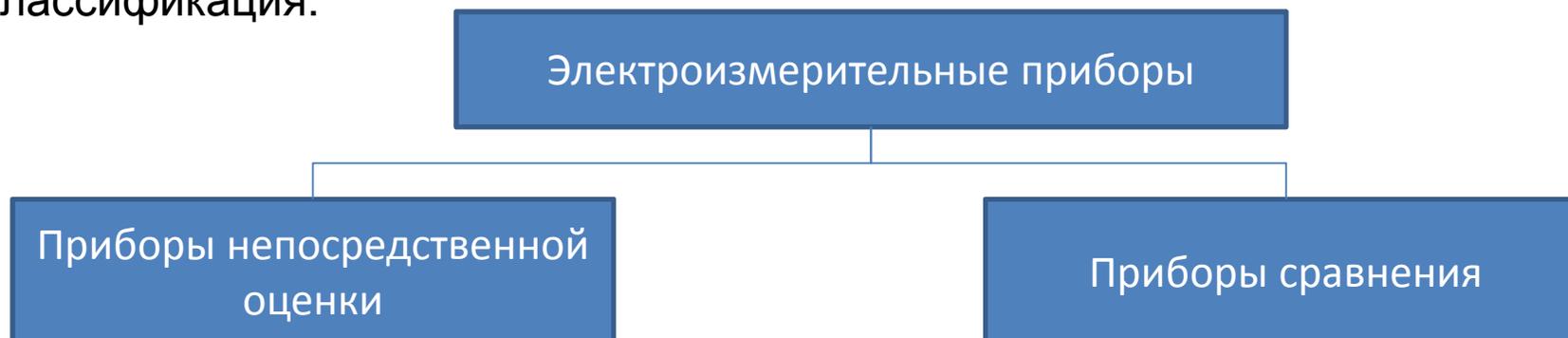
Электроизмерительные приборы

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.

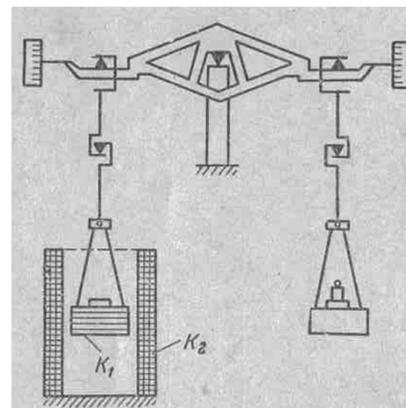
Образцовая мера – устройство воспроизводящее единицы измерения.

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;

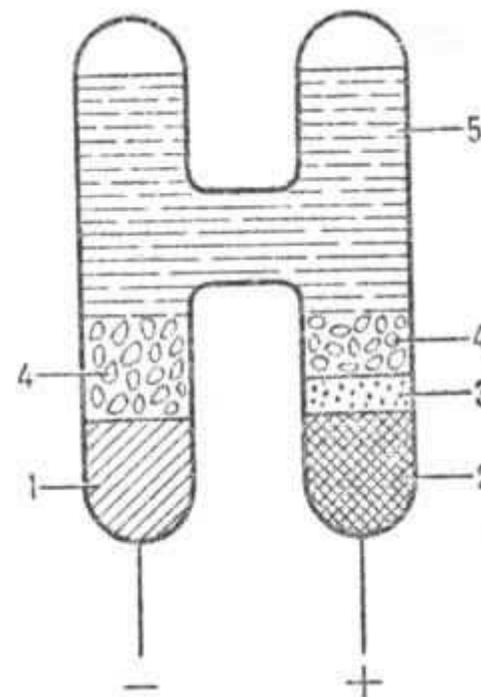
1 – 8-12,5%-ая амальгама кадмия;

2 - металлическая ртуть;

3 – паста из кристаллов Hg_2SO_4 ;

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

5 – насыщенный раствор 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:

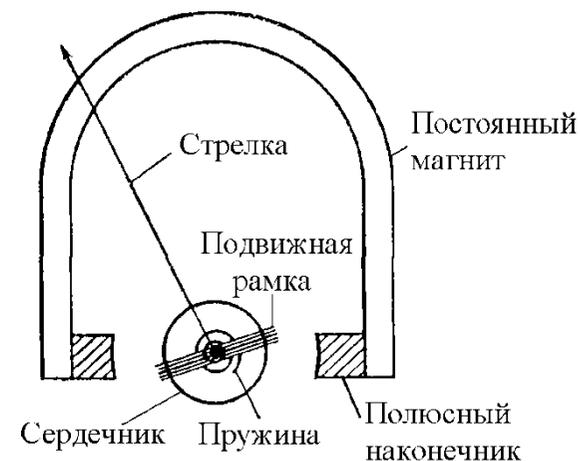
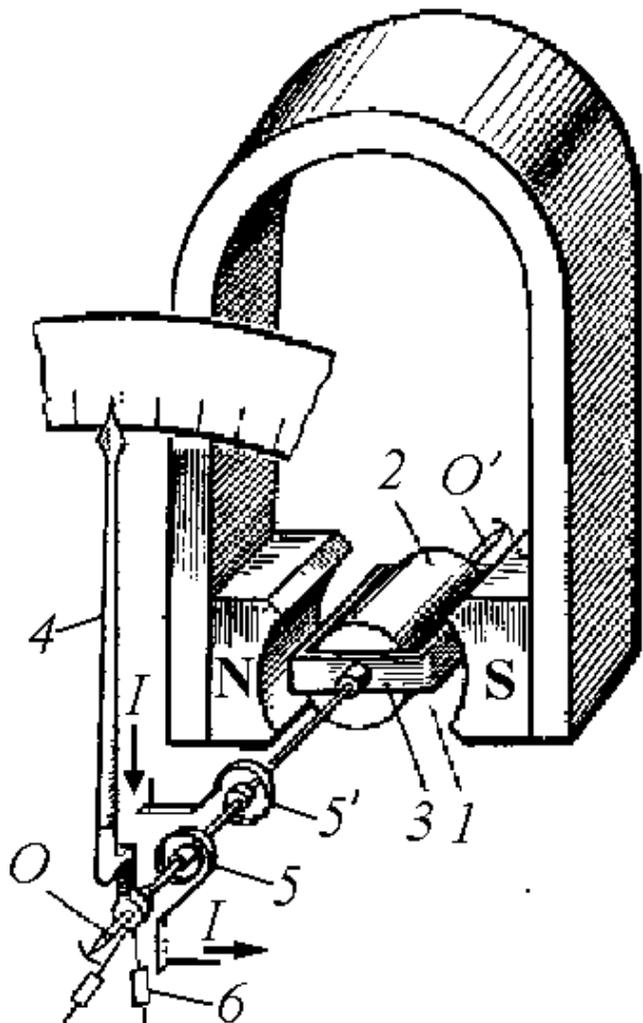
- *Абсолютная погрешность* – разность между измеренным и действительным значением измеряемой величины (ΔA).
- *Приведенная погрешность* – отношение абсолютной погрешности измеряемой величины к верхнему пределу шкалы прибора, выраженное в процентах.
- *Относительная погрешность* – отношение абсолютной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

$$s = \frac{n}{A_{\text{изм}}}$$

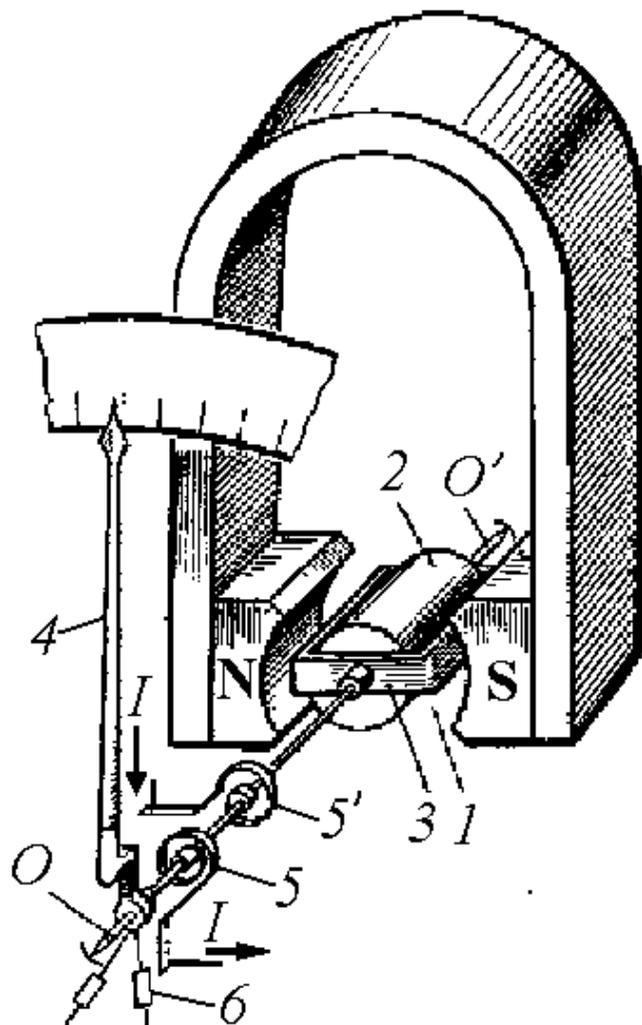
- *Цена деления* или постоянная прибора - величина, обратная чувствительности.

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 α . 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).

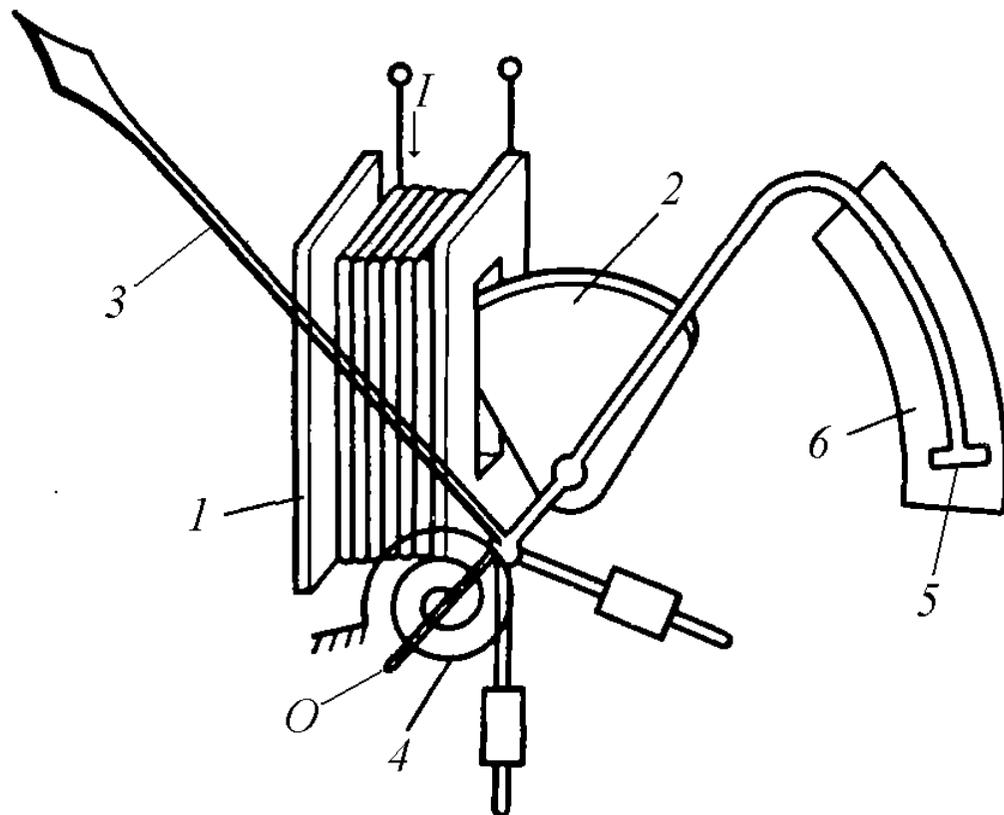
Увеличение чувствительности магнитоэлектрических приборов:

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 α .

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 α . 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:

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

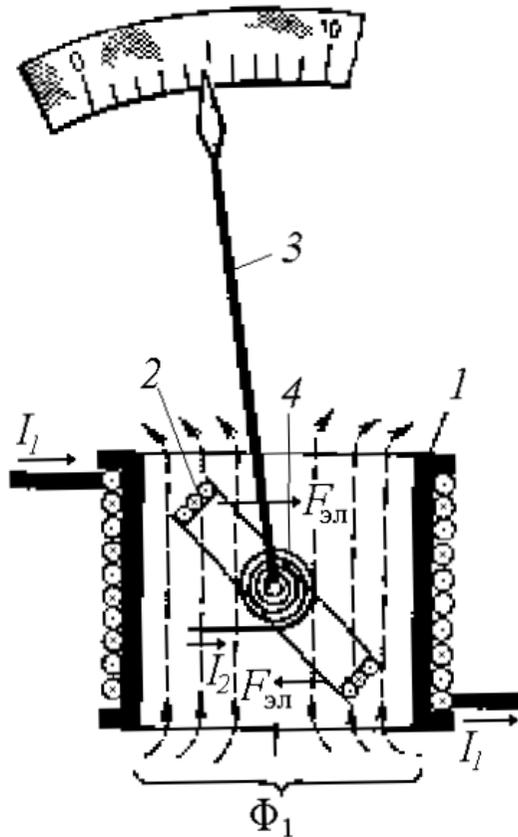
Для успокоения подвижной части прибора применяют воздушный демпфер. Он состоит из цилиндра 6 и поршня 5, шток которого укреплен на оси O . Сопротивление воздуха, оказываемое перемещением поршня в цилиндре, обеспечивает быстрое успокоение стрелки.

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 α .

При постоянном токе электромагнитная сила $F_{эл}$, действующая на проводники подвижной обмотки, пропорциональна току и магнитному потоку Φ_1 . Поскольку поток Φ_1 пропорционален току I_1 неподвижной обмотки, вращающий момент, действующий на подвижную обмотку, пропорционален произведению токов обмоток

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

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.

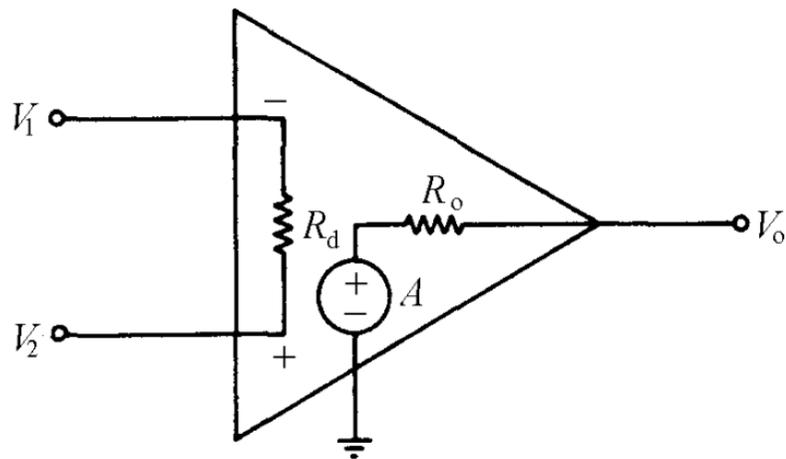
ЦОУ преобразует цифровой код в цифровые символы десятичной системы счисления (представляет собой цифровое табло или монитор компьютера)

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**:

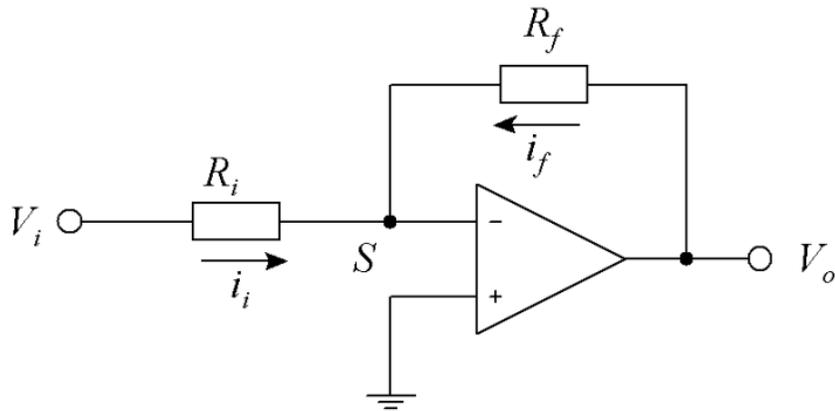
1. На двух входах ОУ действуют одинаковые напряжения;
2. Входные токи ОУ для обоих входов равны нулю.

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).

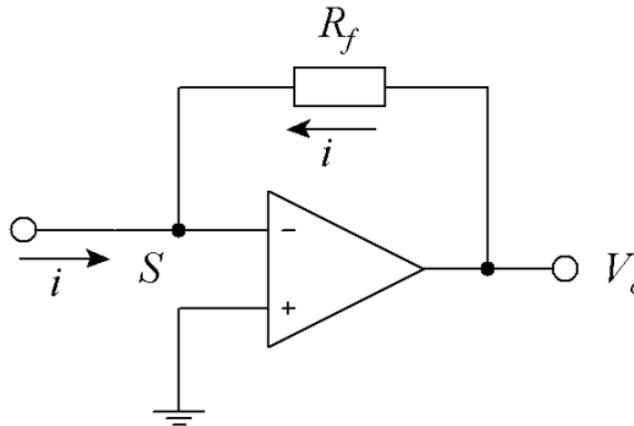
Согласно правилу 2, входной ток ОУ равен нулю. Применяя первое правило Кирхгофа к точке S , можно записать: $i_i = -i_f$

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



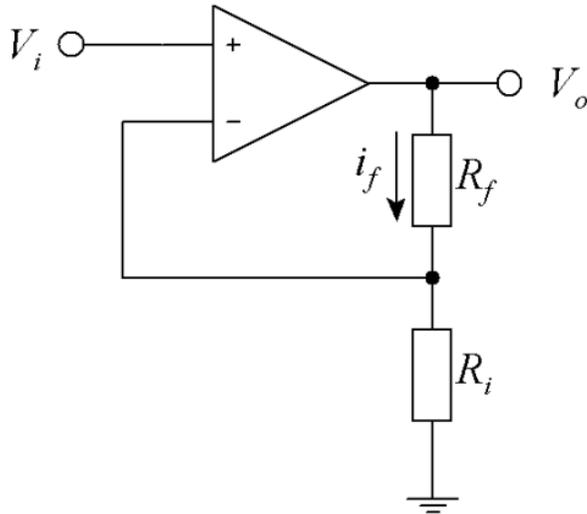
Эта схема - частный случай инвертирующего усилителя когда входное сопротивление отсутствует ($R_i = 0$).

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



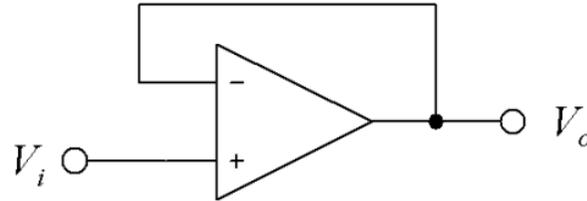
Входной сигнал подается на неинверсионный вход ОУ.

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:

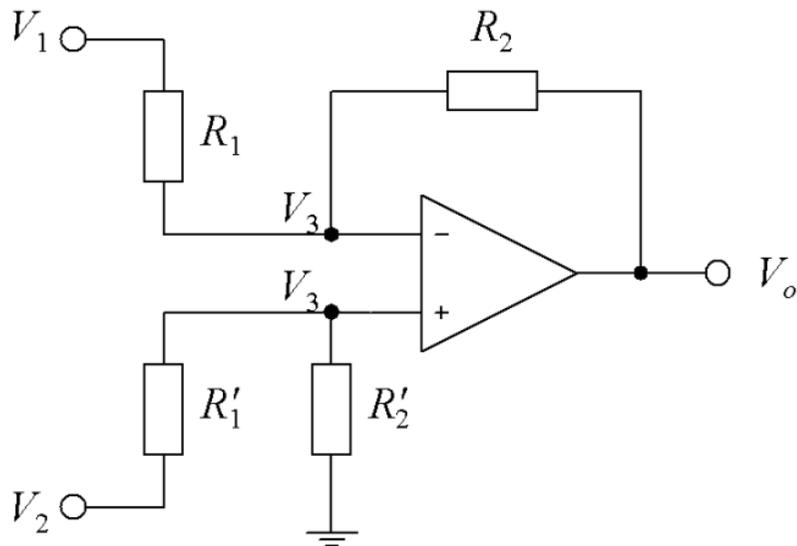
$$V_o = V_i$$

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:

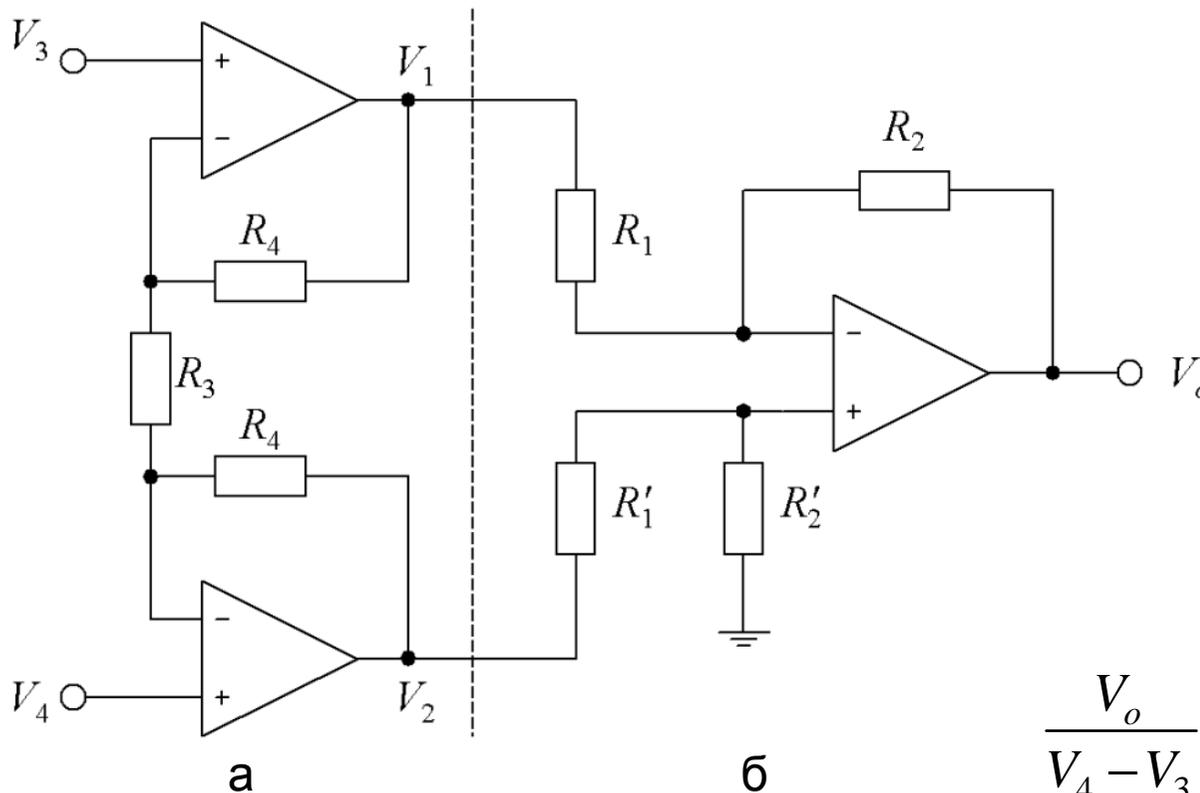
$$\frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3} = \frac{2R_4 + R_3}{R_3}$$

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

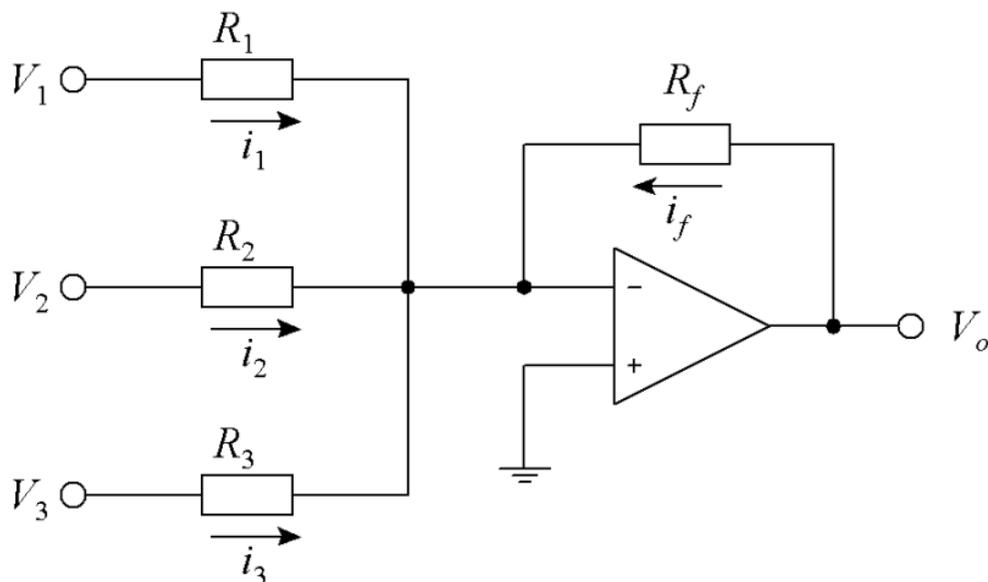
$$i_f = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

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:

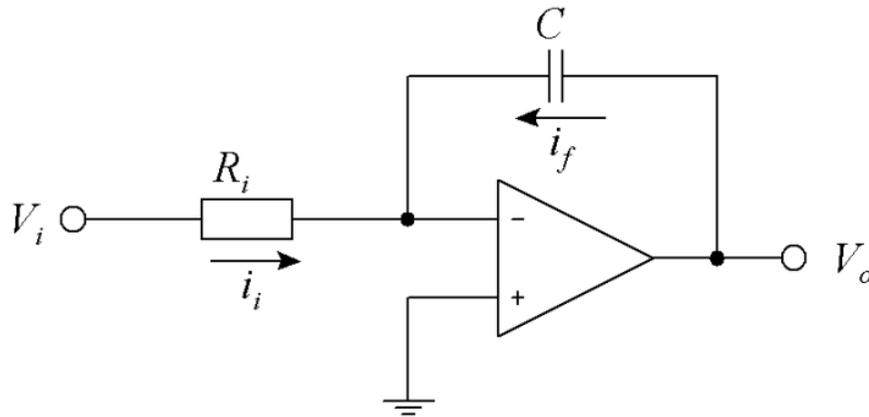
$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$



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:

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

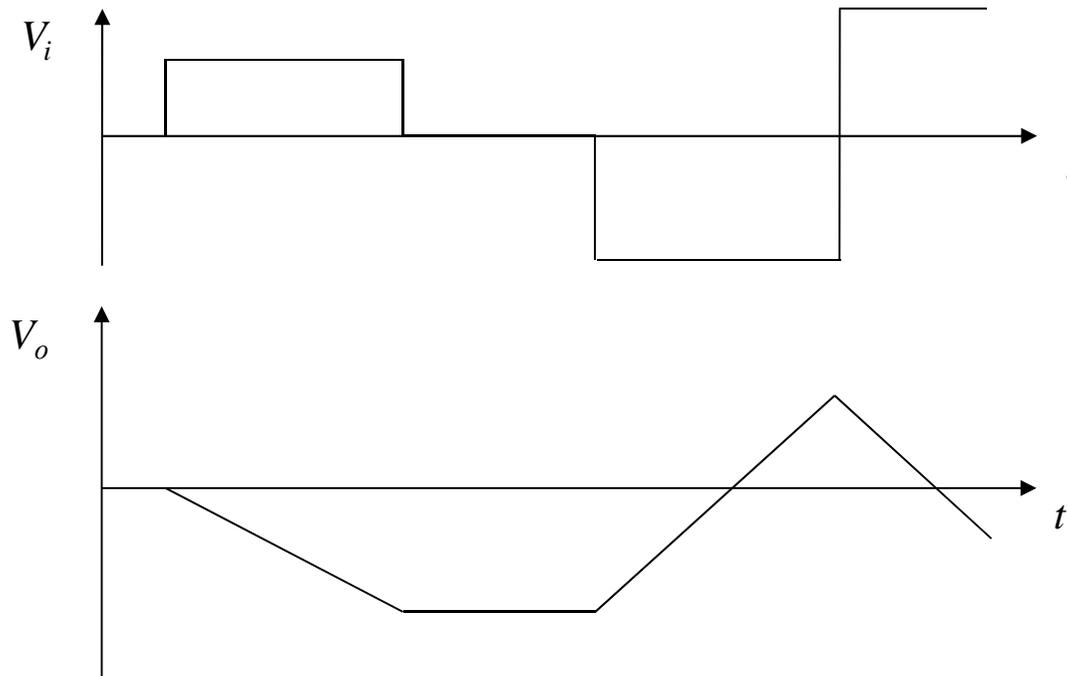
Величина тока будет определяться входным напряжением:

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

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:

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

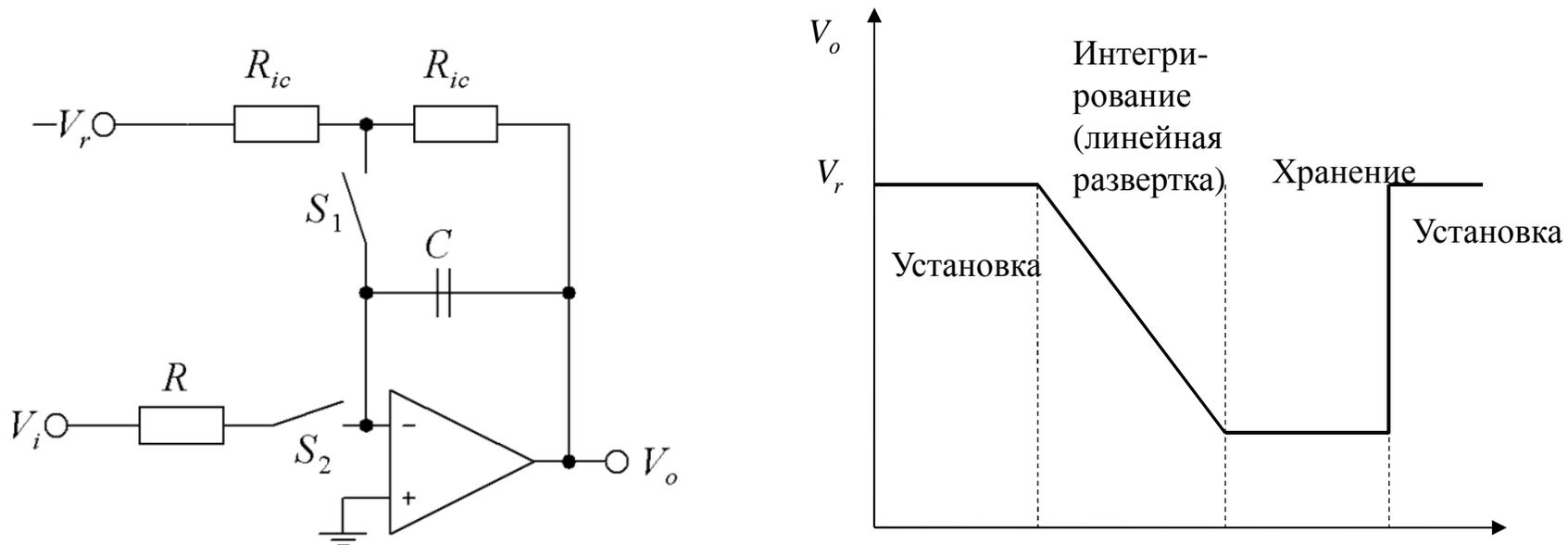
Если входное напряжение интегратора меняется во времени, то выходное напряжение уже нельзя представить простым алгебраическим выражением. Выходное напряжение в таком случае выразится интегралом от входного напряжения по времени:

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

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.

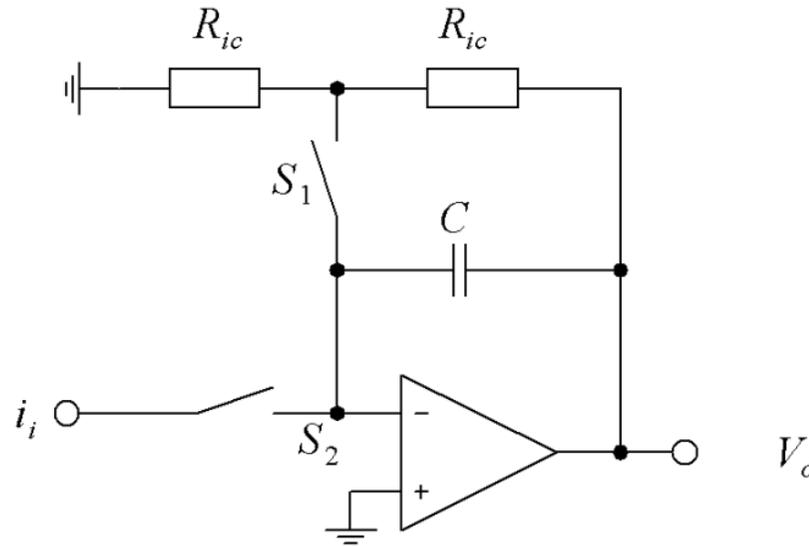
Схема работает как инвертор, который заряжает конденсатор до напряжения, равного взятому с обратным знаком опорному напряжению ($-V_r$): $V_{ic} = V_r$

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

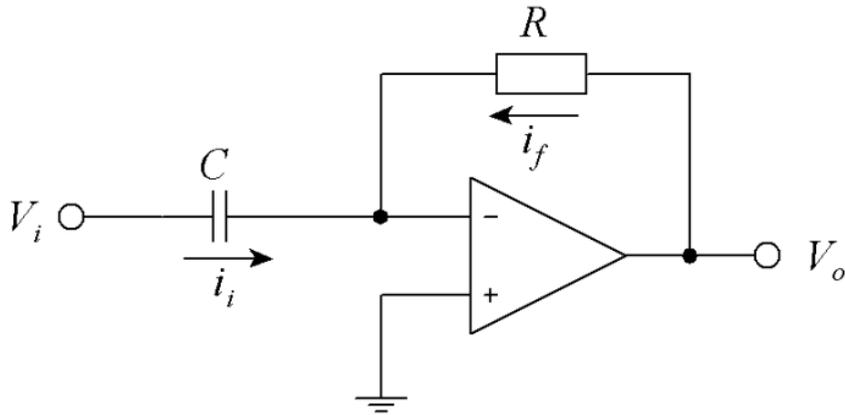


Связь между выходным напряжением и током запишется в следующем виде:

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

Дифференциатор

Вырабатывает выходной сигнал, пропорциональный скорости изменения во времени входного сигнала



Ток через конденсатор протекает также по цепи обратной связи:

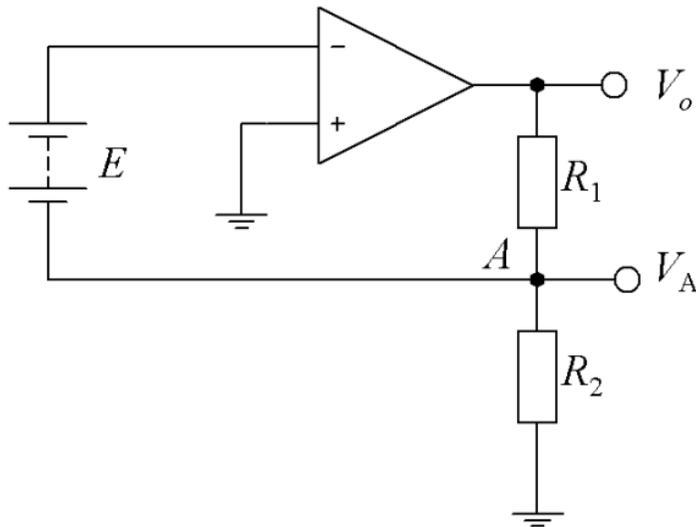
$$i_i = C \frac{dV_i}{dt} = -\frac{V_o}{R}$$

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:

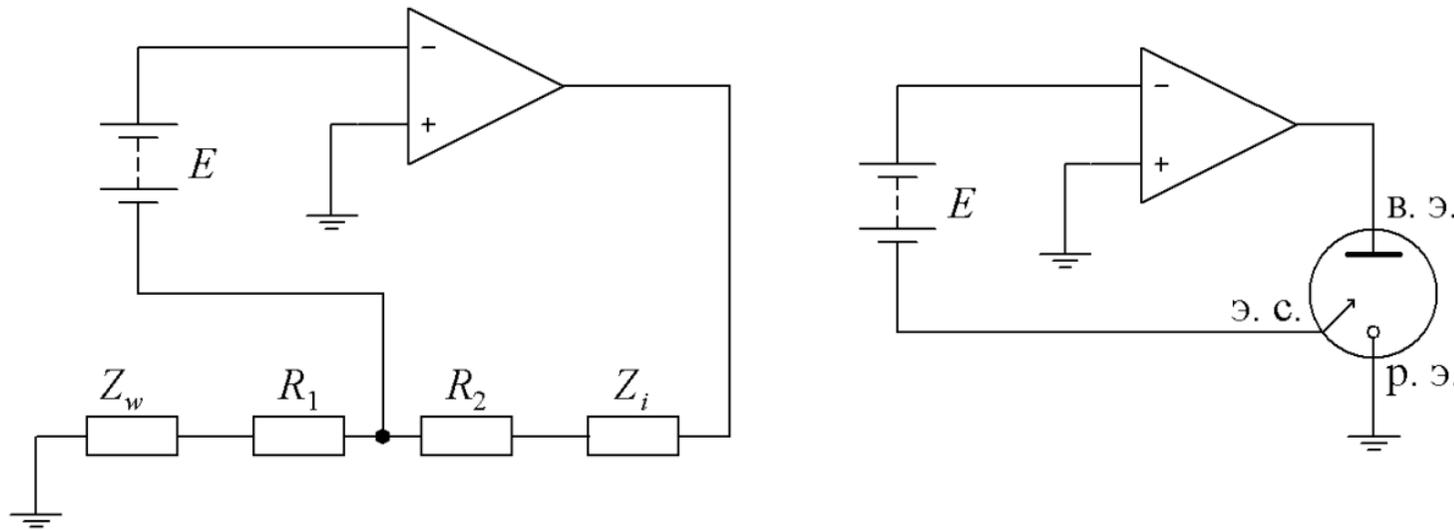
$$i = \frac{V_A}{R_2} = -\frac{E}{R_2} = \frac{V_o}{R_1 + R_2}$$

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.

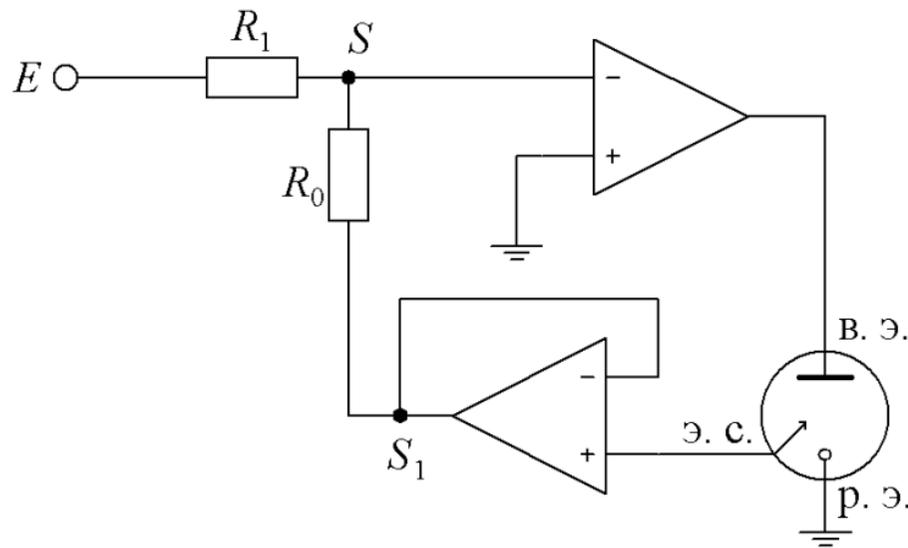


Электрод сравнения подключен к точке, которая разбивает сопротивление раствора на две части, зависящие от положения кончика капилляра Лuggина в растворе. Электрод сравнения подключен к точке постоянного напряжения стабилизатора, а рабочий электрод заземлен.

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 задатчиком, 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:

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

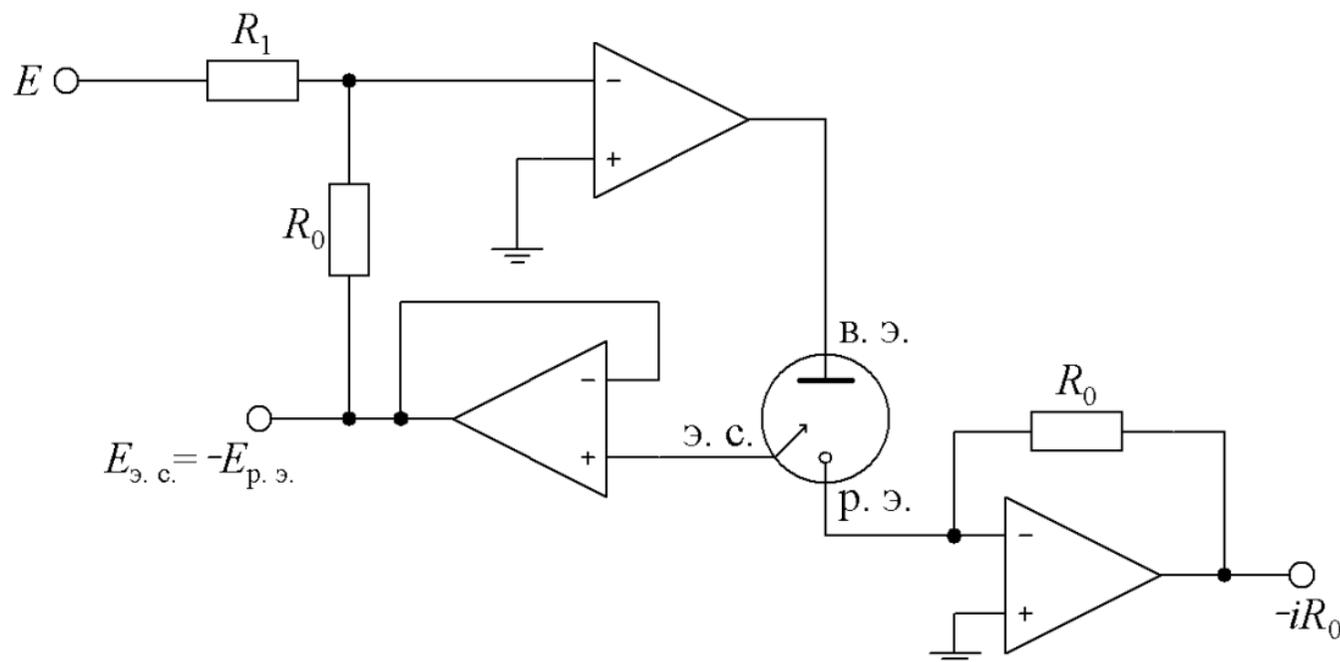
Тогда потенциал рабочего электрода относительно электрода сравнения будет равен:

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

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:

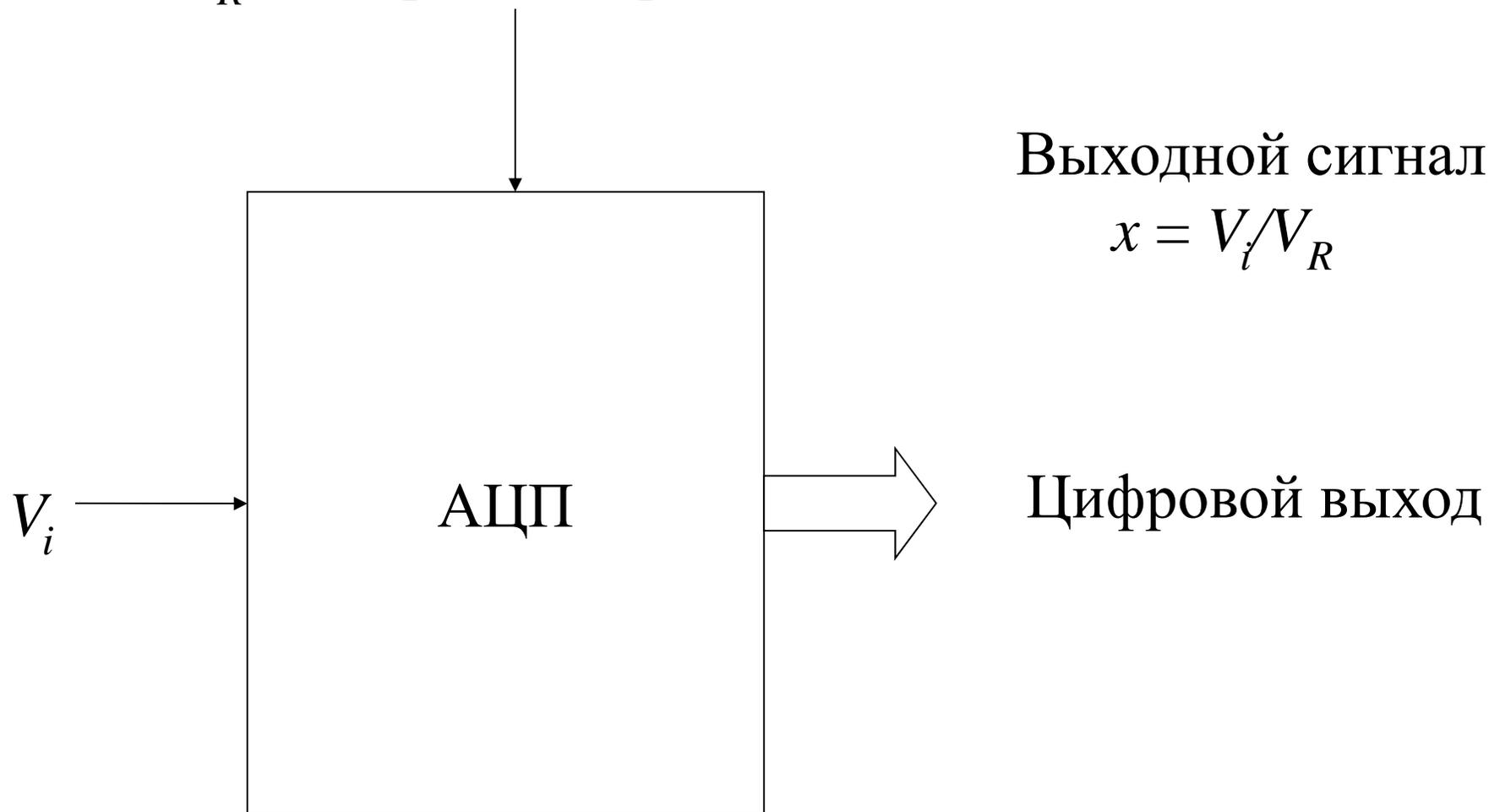
000 = -4	001 = -3	010 = -2	011 = -1
100 = 0	101 = 1	110 = 2	111 = 3

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:

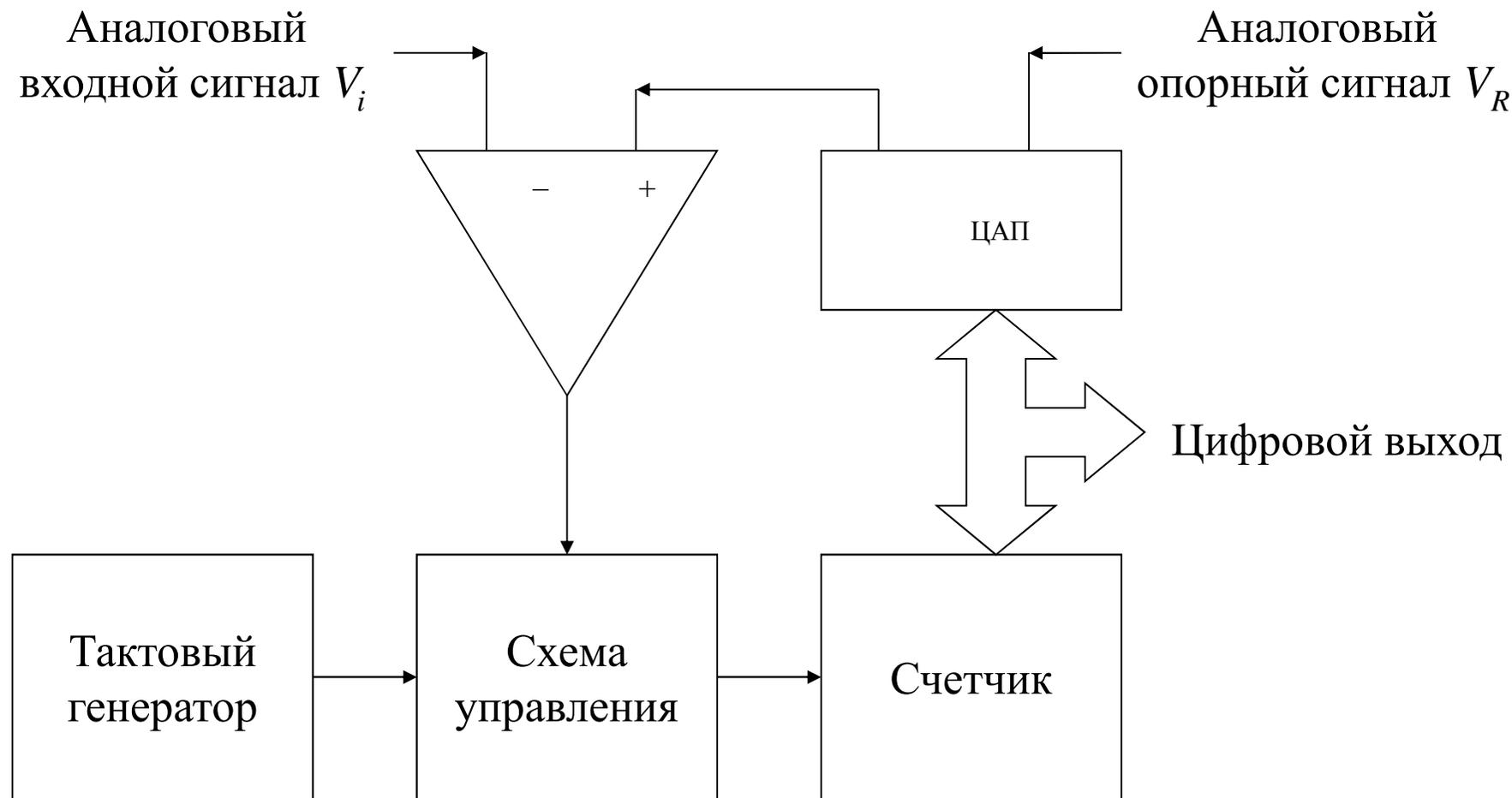
3-разрядный АЦП - весь диапазон входного сигнала может быть разбит на $2^3 = 8$ уровней. Наименьшая величина аналогового сигнала, которую можно представить при этом, будет составлять $1/8$ от полного диапазона. $1/8$ называется *младший значащий разряд* (МЗР).
- Время преобразования: $\sim 10^{-9} -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

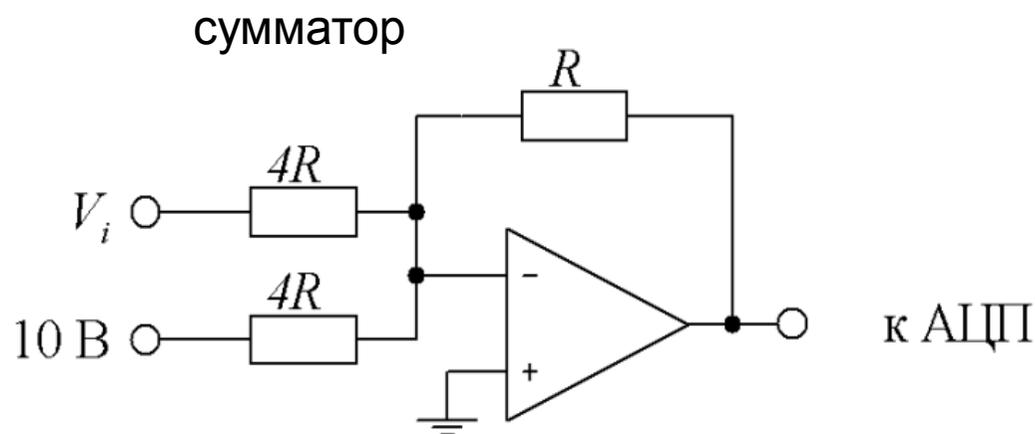
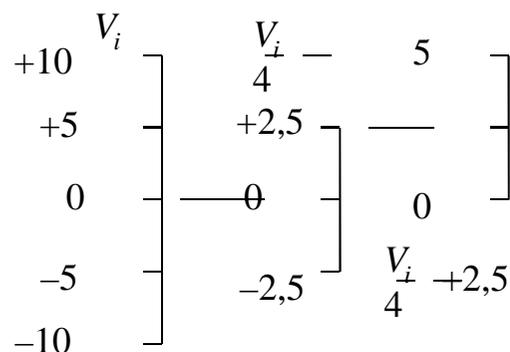


Источники стабильного опорного напряжения

В виде интегральных схем – 2 вида источников:

- Стабилитроны, ~6,9В
- «Скрытые» зенеровские диоды (лучшие характеристики) ~1,2 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:

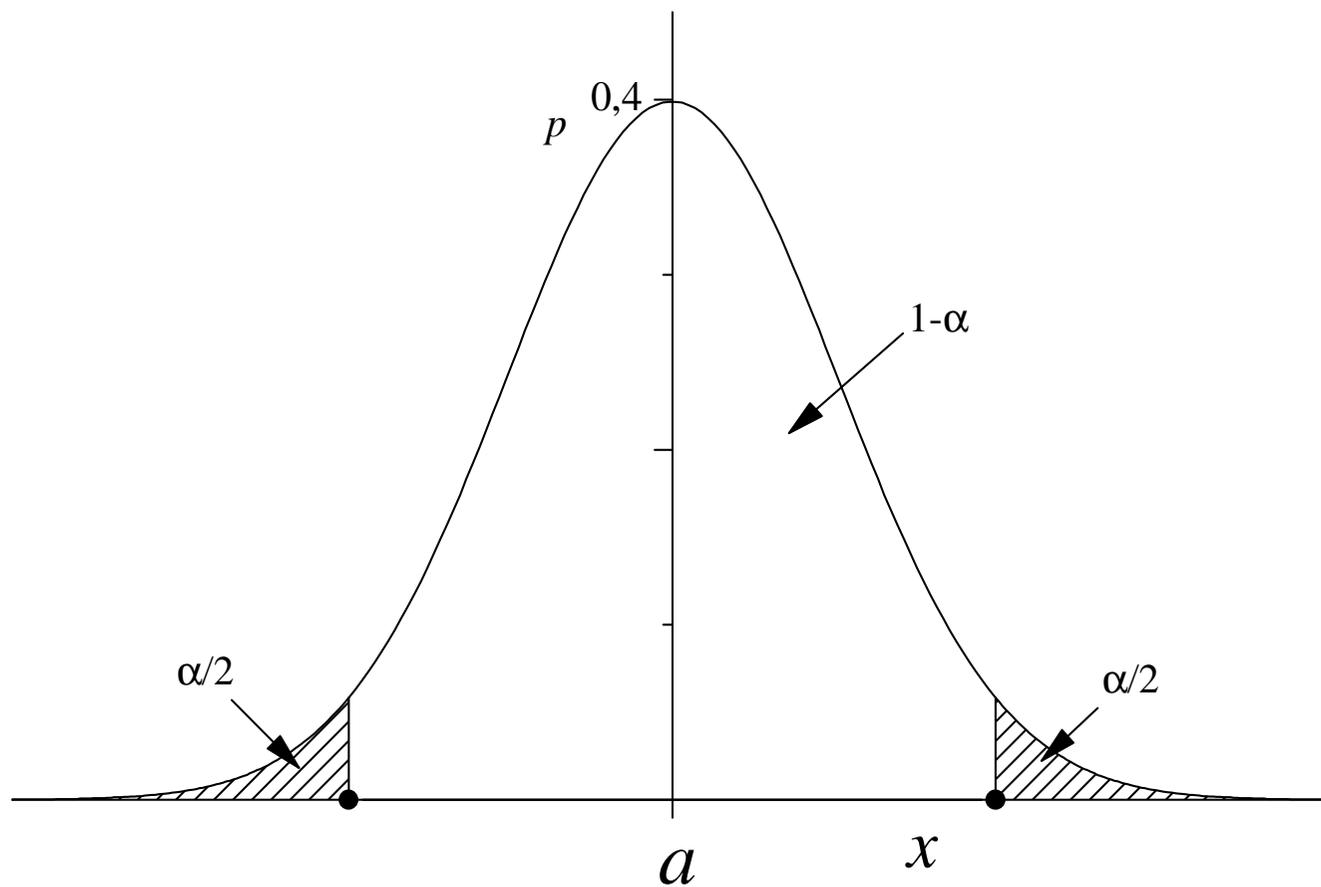
X_i , где $i = 1, \dots, n$.

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 α : $\sigma = 1-p$

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

α $n-1$	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
∞	1,645	1,960	2,576	2,807	3,291