

Лекция 4. Измерение напряжения и силы тока



1. Приборы для измерения тока и напряжения;
2. Параметры напряжения переменного тока;
3. Классификация вольтметров и требования к ним;
4. Вольтметры постоянного тока;
5. Вольтметры переменного тока;
6. Зависимость показаний вольтметра от типа детектора

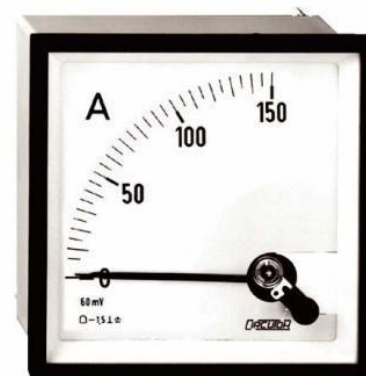
Литература:

1. «Электрорадиоизмерения» под редакцией Сигова §5.1 – 5.4

1. Приборы для измерения тока и напряжения

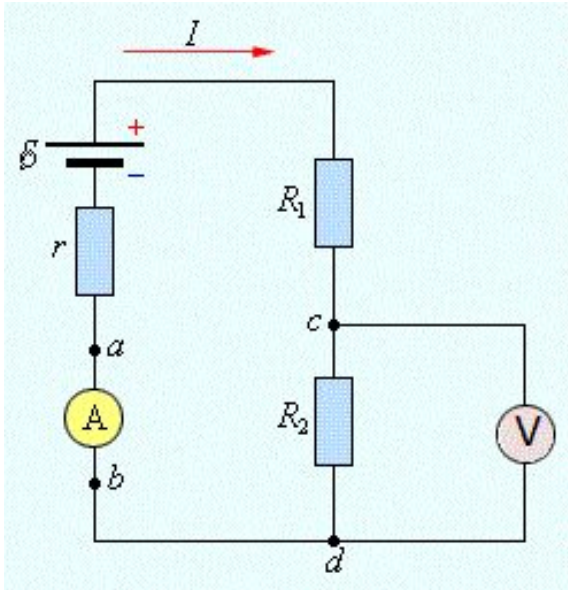
Выбор средства измерений определяется:

- Пределом измерений;
- Частотным диапазоном;
- Классом точности;
- Типом прибора



Для измерения напряжения или тока необходимо выбрать прибор с учетом его диапазона измерений, частотного диапазона, класса точности, потребления мощности из измерительной цепи, влияния формы сигнала на результат измерения

Включение амперметра и вольтметра в электрическую цепь



Вольтметр подключается параллельно нагрузке

Амперметр подключается последовательно с нагрузкой

Сопротивление Вольтметра должно быть большим

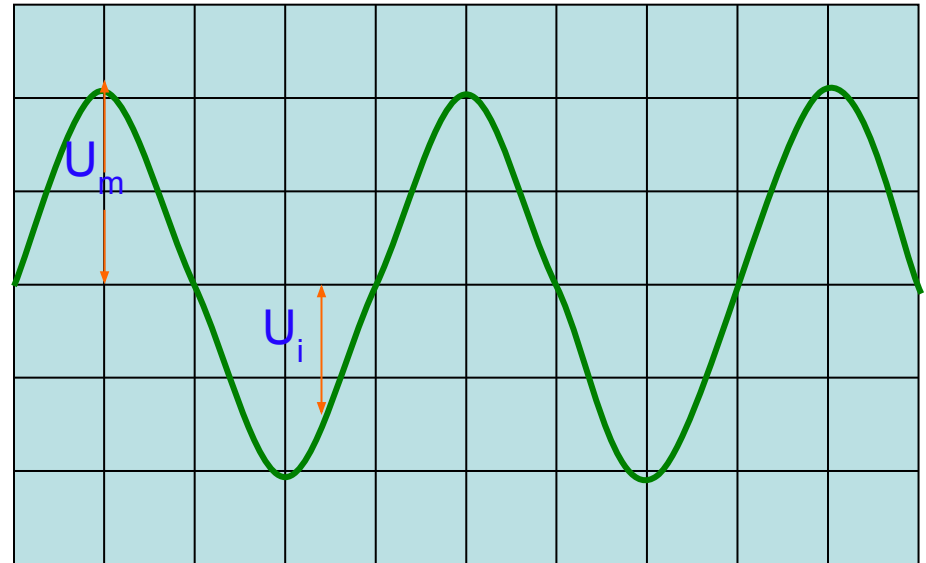
Сопротивление Амперметра должно быть малым

2. Параметры напряжения переменного тока

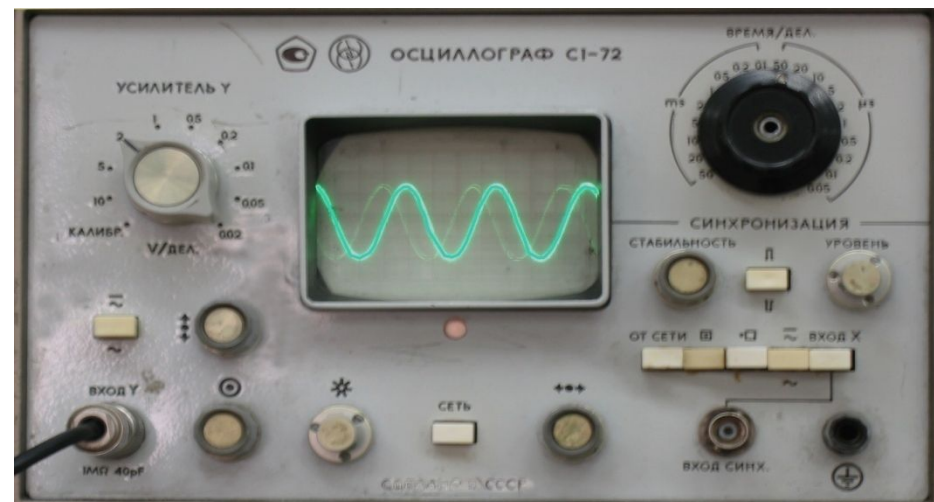
Переменное напряжение имеет синусоидальную форму.

$$U(t) = U_m \cdot \text{Sin}(\omega \cdot t + \varphi)$$

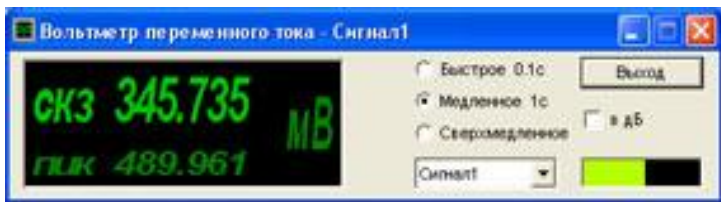
Амплитуда U_m – наибольшее мгновенное значение напряжения за интервал наблюдения или за период.



Мгновенные значения напряжения $u(t)$ наблюдают на экране осциллографа, дисплее компьютера и определяют для каждого момента времени.



Среднеквадратическое и средневыпрямленное значение напряжения



Переменное напряжение характеризуется несколькими параметрами и его уровень можно определить по амплитудному,

среднему квадратическому, среднему или средневыпрямленному значениям. Определим некоторые характеристики и параметры напряжения переменного тока.



Среднее квадратическое значение напряжения есть корень квадратный из среднего квадрата его мгновенного значения за время измерения (за период):

$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

$$U_{СК} = 0.707 \cdot U_m$$



Средневыпрямленное напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U_{СВ} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt$$

$$U_{СВ} = 0.637 \cdot U_m$$

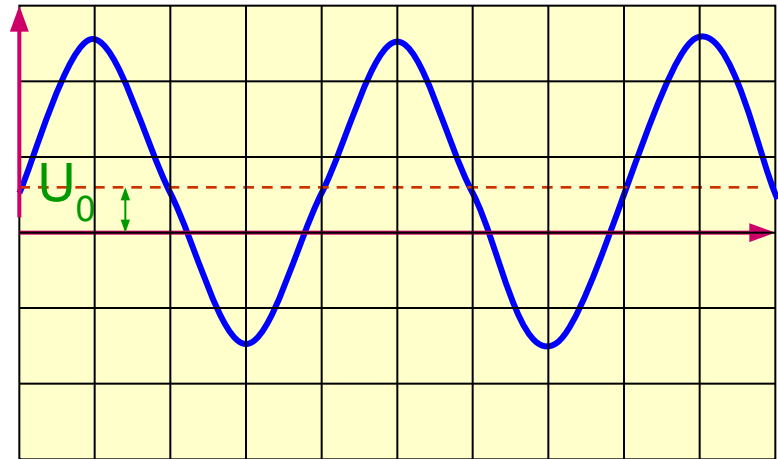
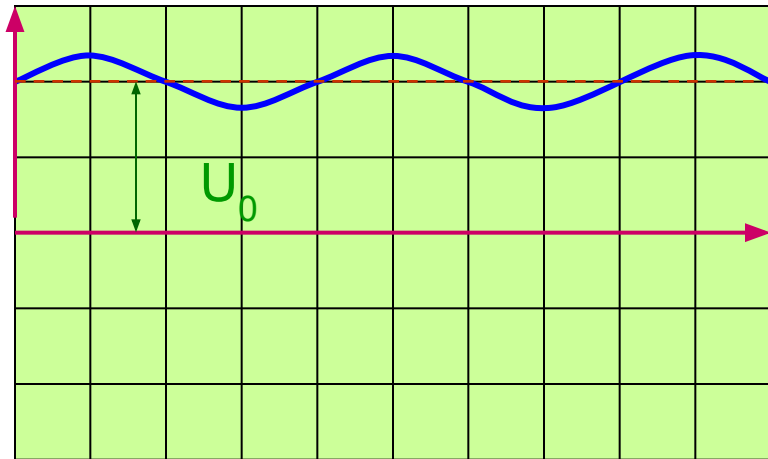


3.2 Постоянная составляющая переменного напряжения



Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому всех мгновенных значений за период:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$



3. Приборы для измерения силы тока и напряжения.

3.1 Требования к вольтметрам



Включение прибора в измерительную цепь не должно вносить изменений в режим работы цепи. Для этого входное сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим, а сопротивление амперметра малым.



Прибор должен обладать достаточной точностью. Точность прибора задаётся его классом точности, и выбор средства измерения определяется необходимой точностью измерений.

Не маловажным фактором является чувствительность прибора, которая определяется отношением приращения показания прибора к приращению измеряемой величины.

Прибор должен иметь достаточно широкий предел измерения и широкий диапазон частот при измерении переменного тока.

Классификация вольтметров

Электронные вольтметры можно разделить по ряду признаков:



■ *По способу измерения:*

- Приборы непосредственной оценки;
- Приборы сравнения.

■ *По характеру измеряемого напряжения:*

- Амплитудные вольтметры;
- Вольтметры среднего квадратического значения;
- Вольтметры средневывпрямленного значения.

По назначению:

- Вольтметры постоянного тока В2
- Вольтметры переменного тока В3
- Вольтметры импульсного тока В4
- Селективные вольтметры В6
- Универсальные вольтметры В7



Микровольтметры и милливольтметры

Милливольтметр ВЗ-36



Милливольт
для измерения
напряжений в
амплитудных
переменного



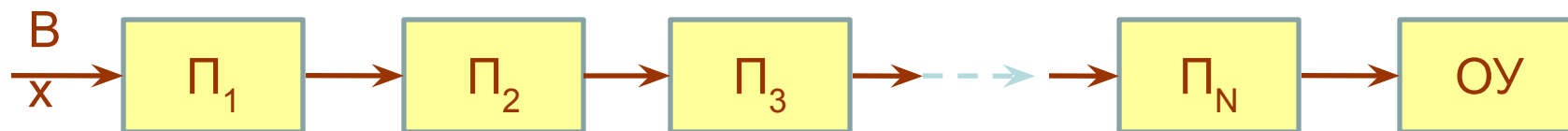
микровольтметр селективный
B6-9 предназначен для
измерения среднеквадра-
тических значений малых
синусоидальных напряжений.

5. Структурные схемы средств измерений

Измерительные приборы можно разделить на:

- Приборы непосредственной оценки;
- Приборы сравнения

Приборы непосредственной оценки



Структурная схема прибора непосредственной оценки состоит из совокупности преобразователей $\Pi_1 - \Pi_N$ и отсчетного устройства ОУ

Преобразователями являются:

- Делители напряжения,
- Магазины затухания,
- Усилители,
- Термопреобразователи,
- Аналого-цифровые преобразователи

В качестве отсчетного устройства используют:

- Электромеханические приборы;
- Электроннолучевую трубку;
- Цифровое отсчетное устройство.

Аналоговые электронные вольтметры

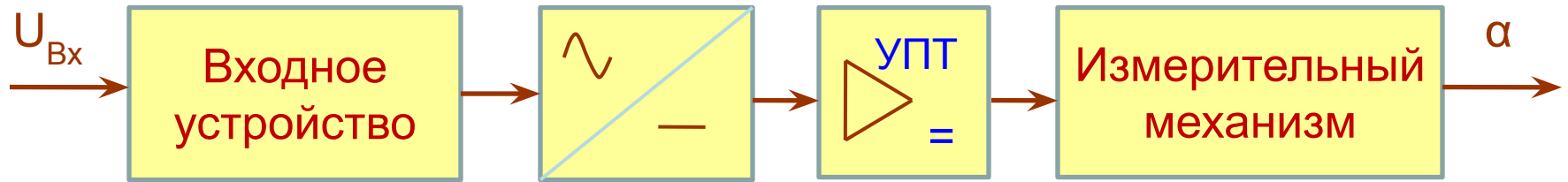


Рисунок 1

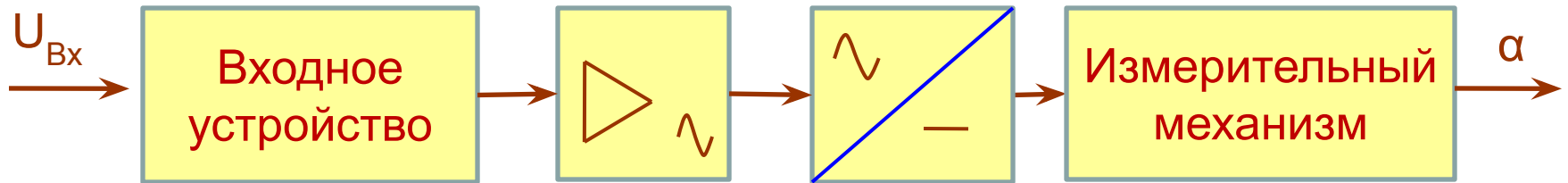


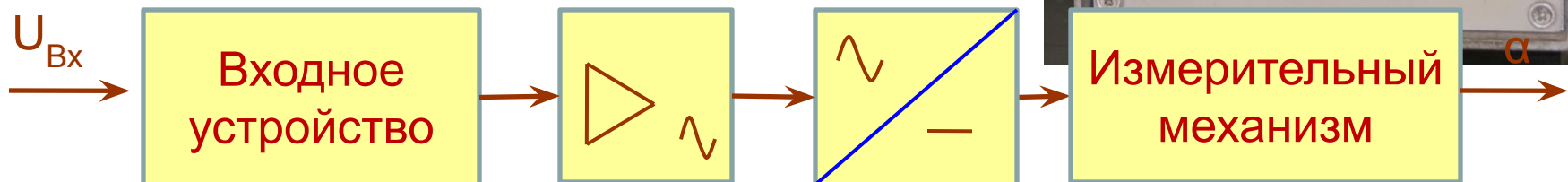
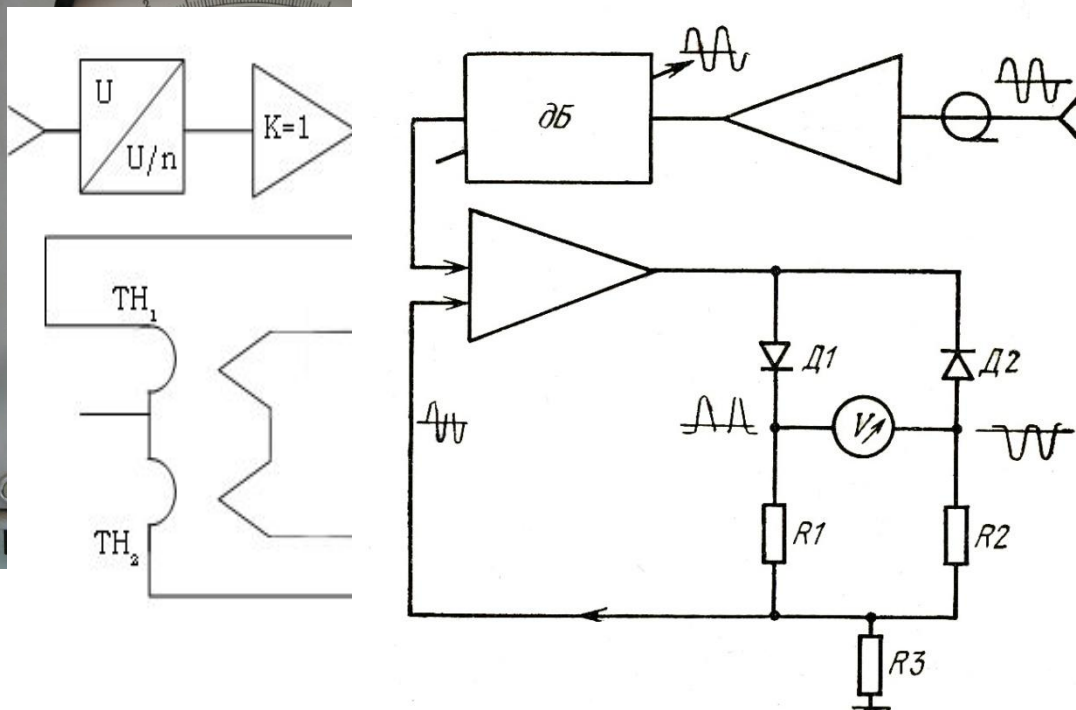
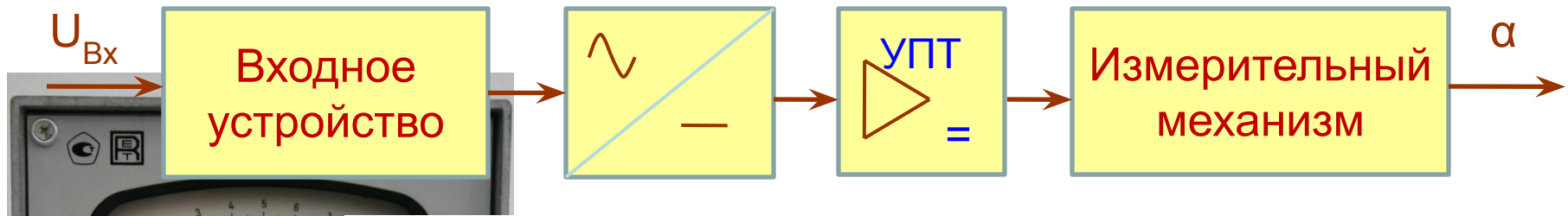
Рисунок 2

Аналоговые вольтметры переменного тока могут строиться по схеме детектор усилитель рисунок 1 либо по схеме усилитель детектор рисунок 2.

Вольтметры собранные по схеме усилитель-детектор (2) имеют более высокую чувствительность но менее широкий частотный диапазон (1 -10 МГц).

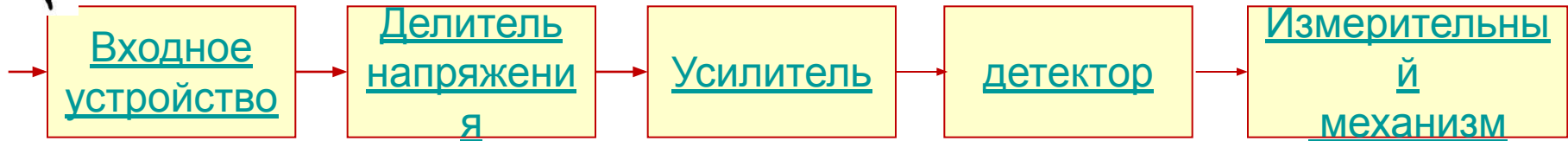
Для увеличения чувствительности вольтметров использующих усилитель постоянного тока (1) увеличивают коэффициент усиления но при этом в таких вольтметрах возникает дрейф нуля.

5.2. Схемы вольтметров



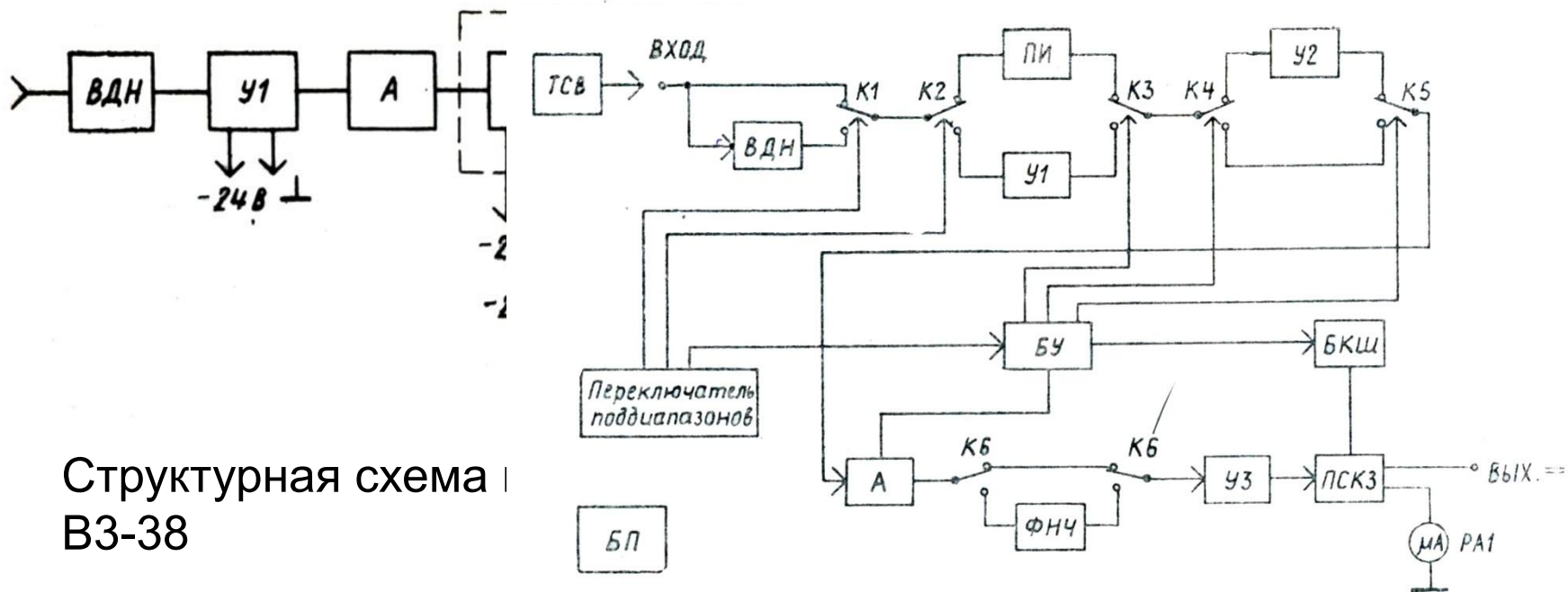
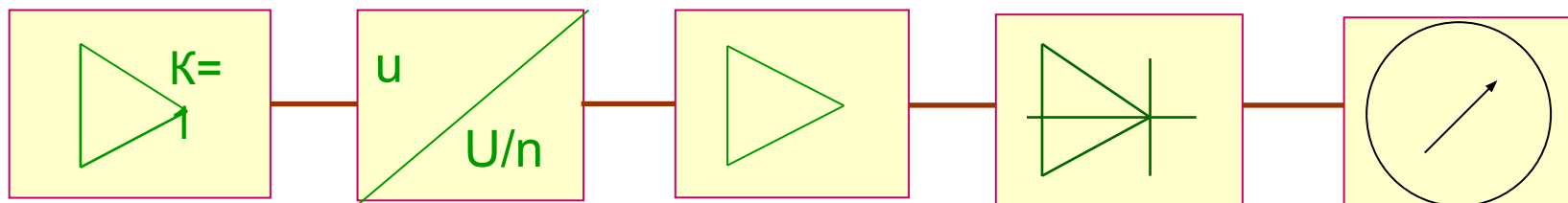


Структурная схема вольтметра переменного тока



- **Входное устройство** – обеспечивает большое входное сопротивление прибора, чтобы включение вольтметра не изменяло режим работы цепи. Обычно входное устройство содержит входной делитель и преобразователь импеданса.
- **Делитель напряжения** – Служит для расширения пределов измерения, что позволяет уменьшить погрешность измерения.
- **Усилитель переменного тока** – Служит для увеличения чувствительности прибора.
- **Детектор** – Преобразует переменное напряжение в постоянное. Название вольтметра определяется типом используемого преобразователя.
- **Измеритель** – Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

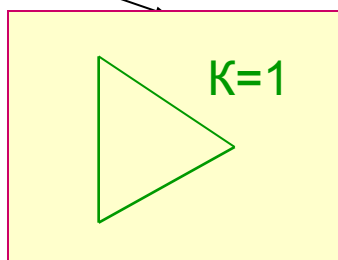
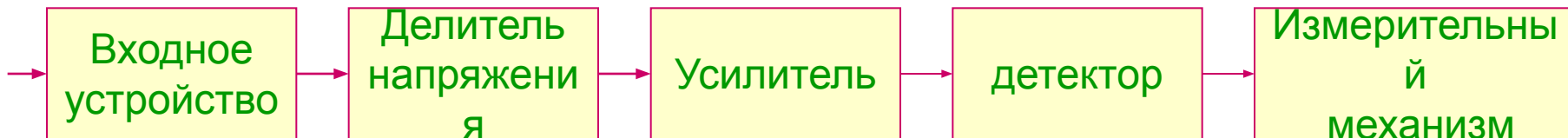
Структурная схема вольтметра переменного тока



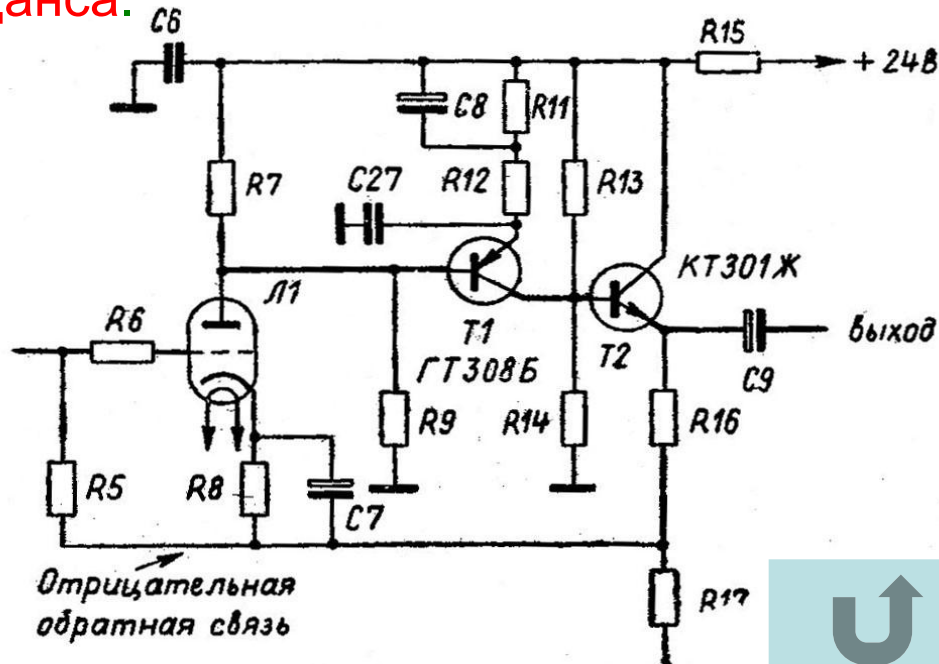
Структурная схема |
В3-38

Структурная схема вольтметра
В3-57

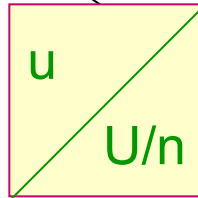
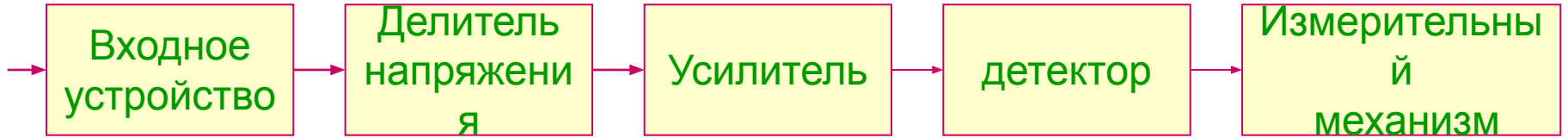
Входное устройство



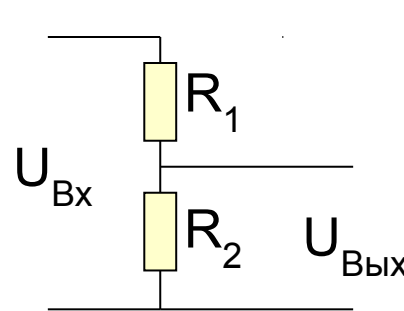
- **Входное устройство** – обеспечивает большое входное сопротивление прибора, чтобы включение вольтметра не изменяло режим работы цепи. Обычно входное устройство содержит входной делитель и преобразователь импеданса.



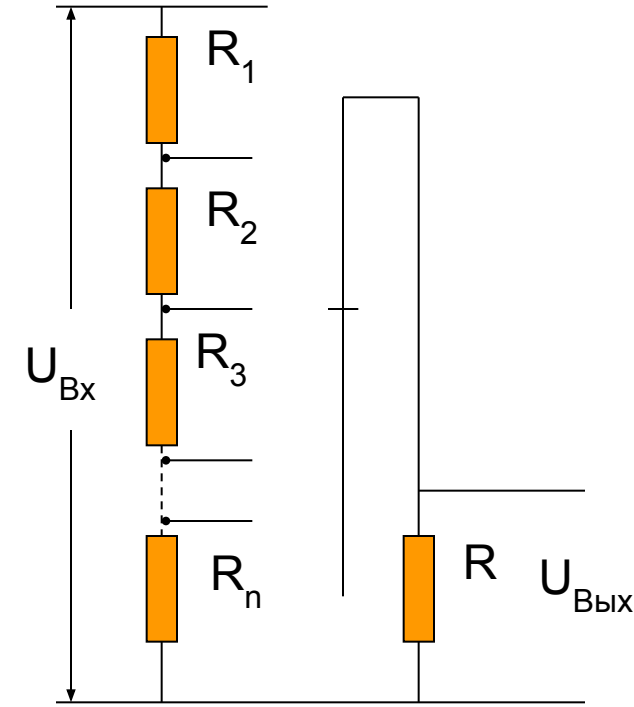
Делитель напряжения



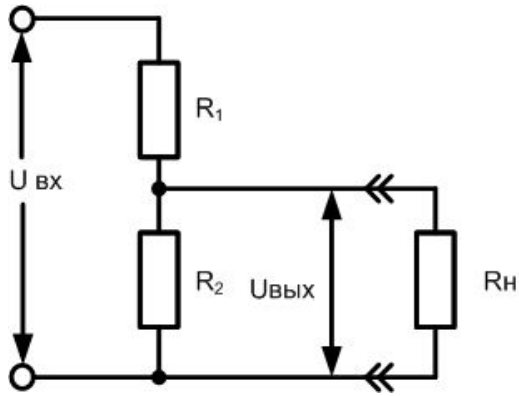
Делитель напряжения (Аттенюатор) – Служит для расширения пределов измерения, что позволяет уменьшить погрешность измерения.



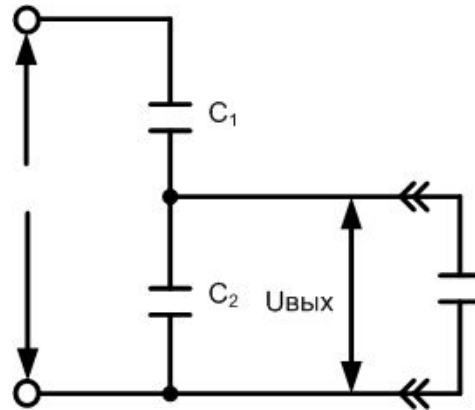
$$N = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$



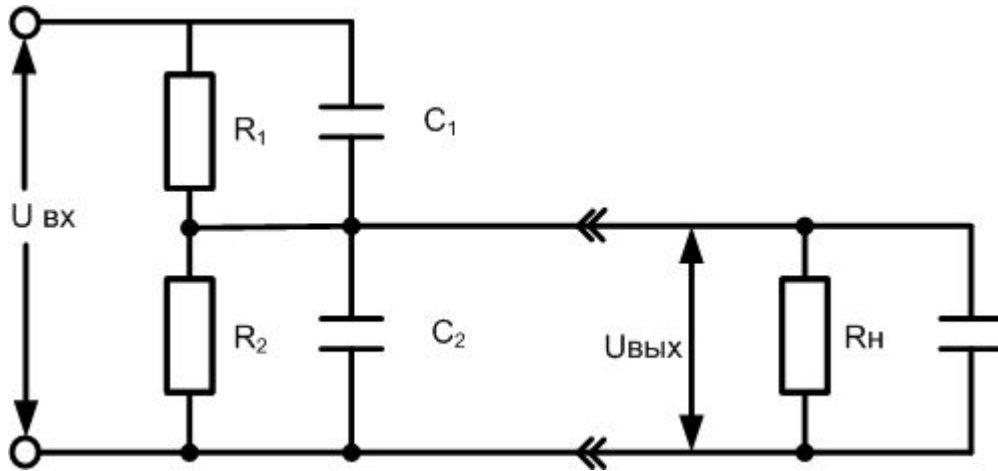
Схемы делителей напряжения



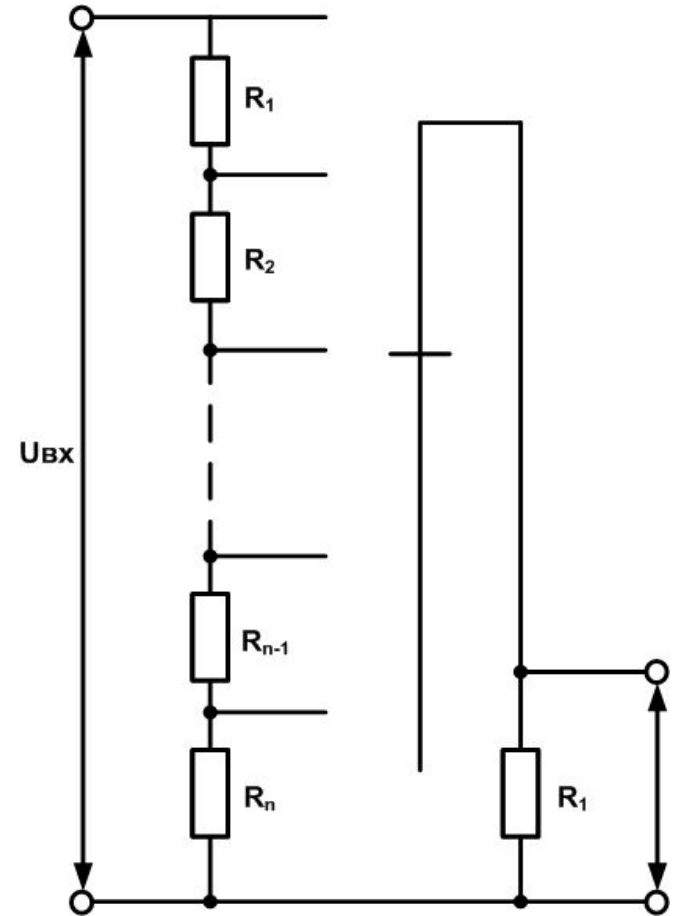
а) Резистивный делитель



б) Емкостной делитель

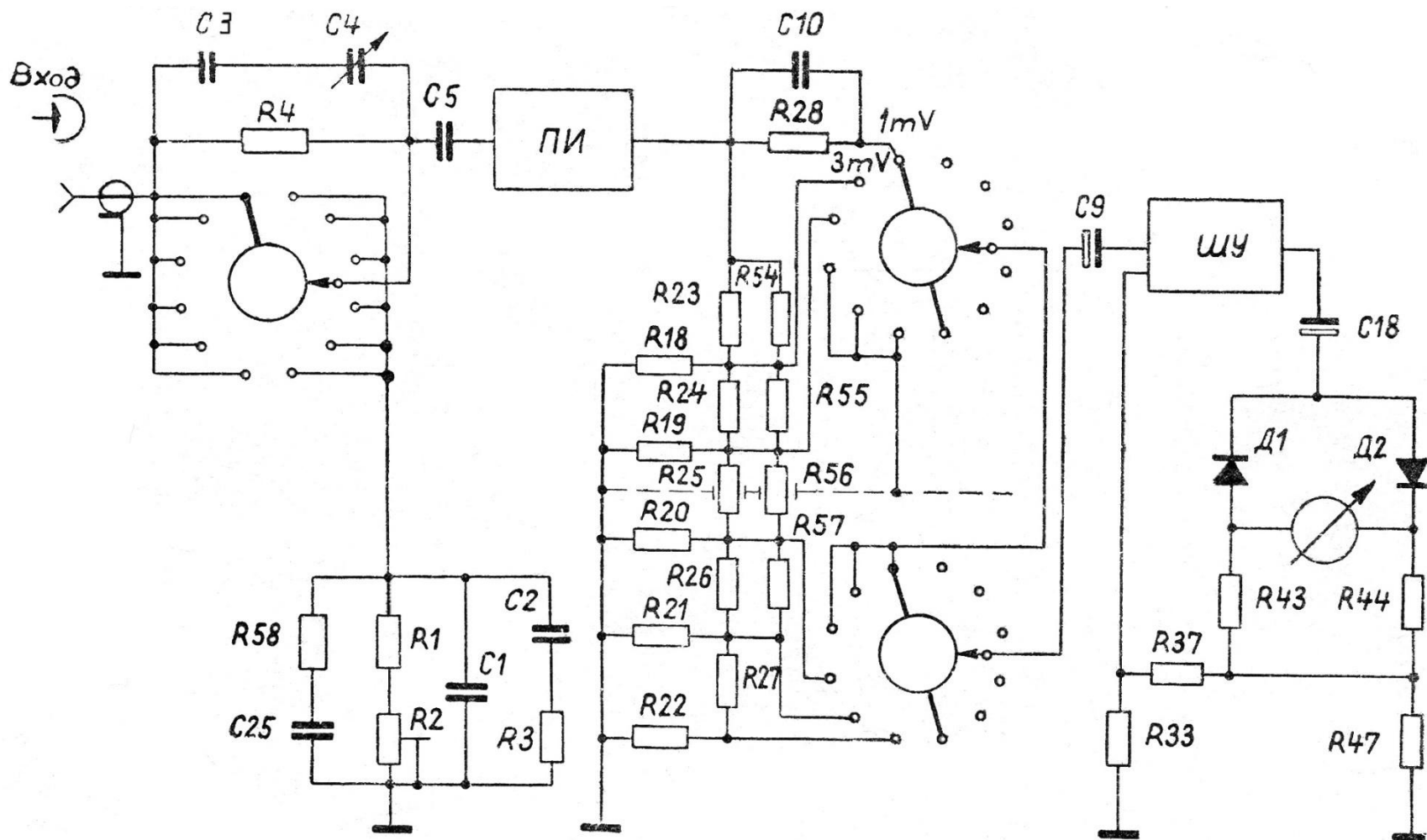


в) Делитель с корректирующими элементами

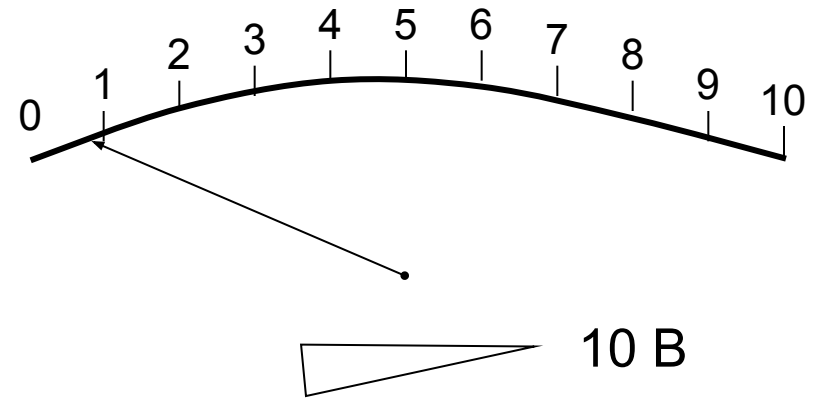
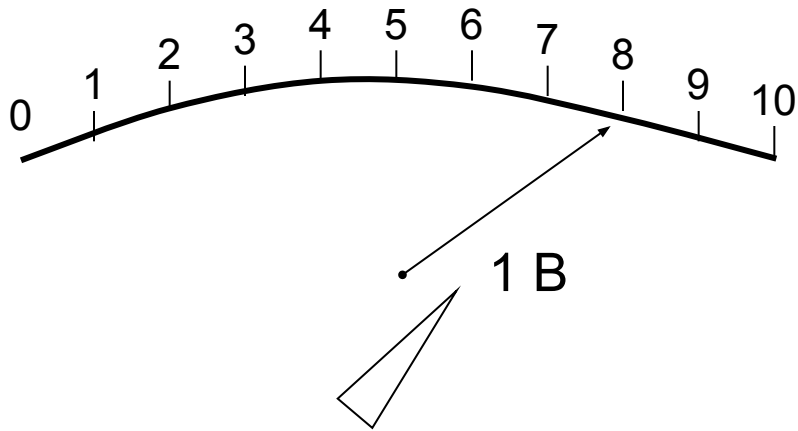


г) Делитель ступенчатого типа

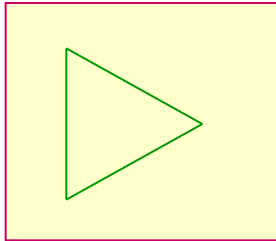
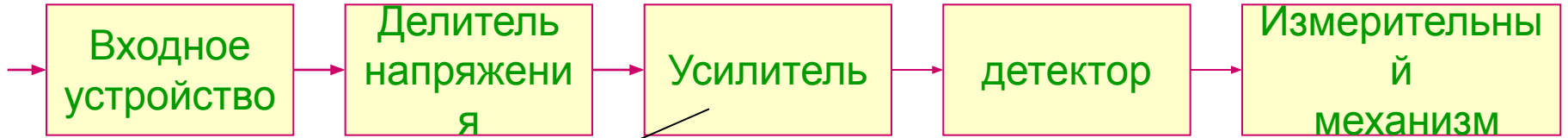
Структурная схема вольтметра ВЗ-38



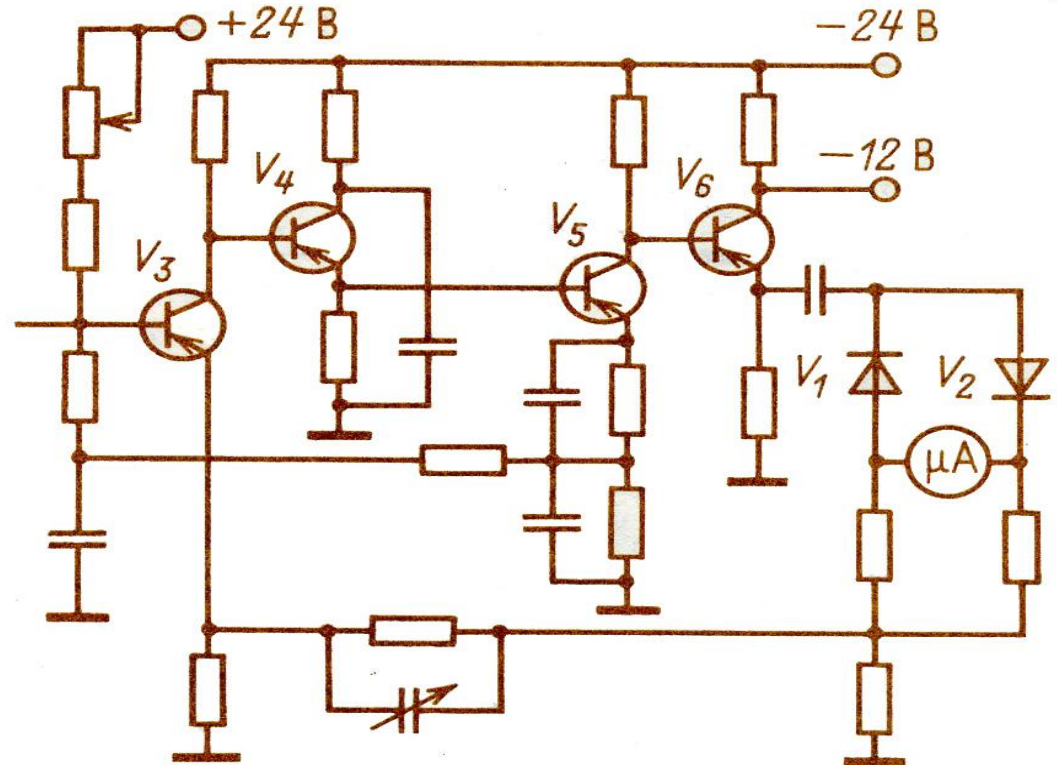
Изменение пределов измерения



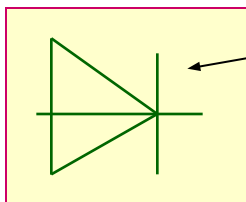
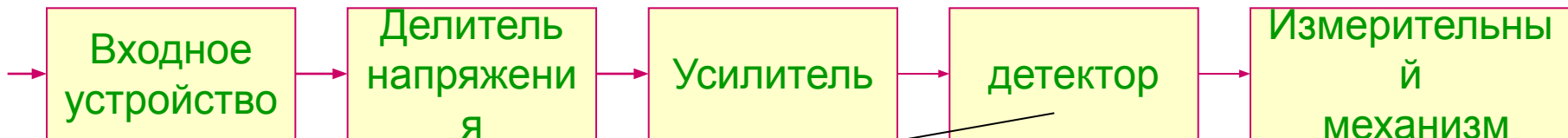
Усилитель переменного тока



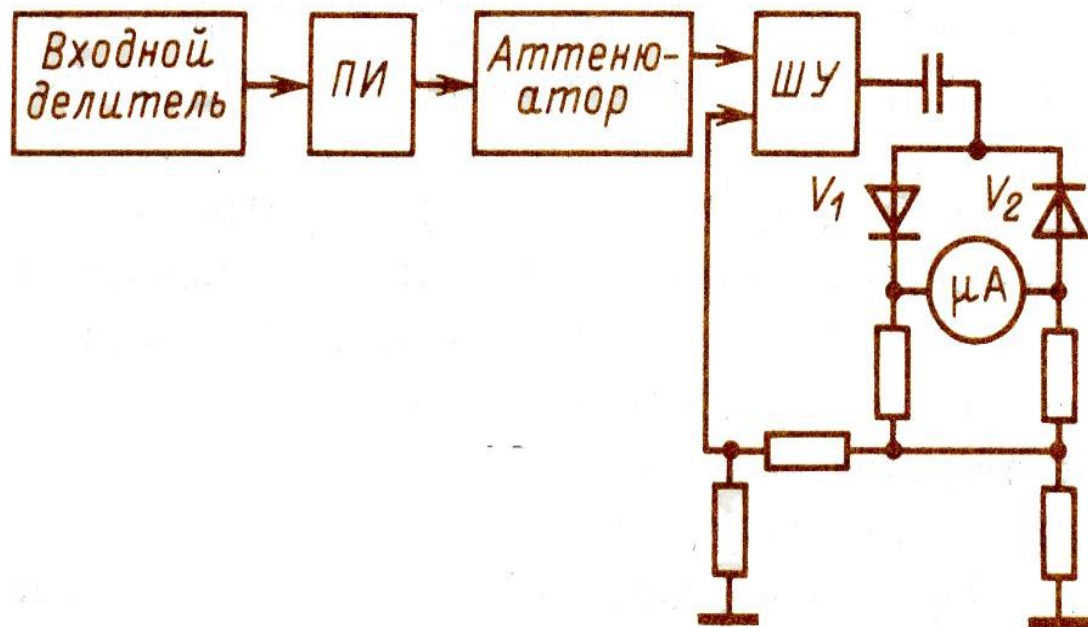
Усилитель переменного тока – Служит для увеличения чувствительности прибора.



Детектор

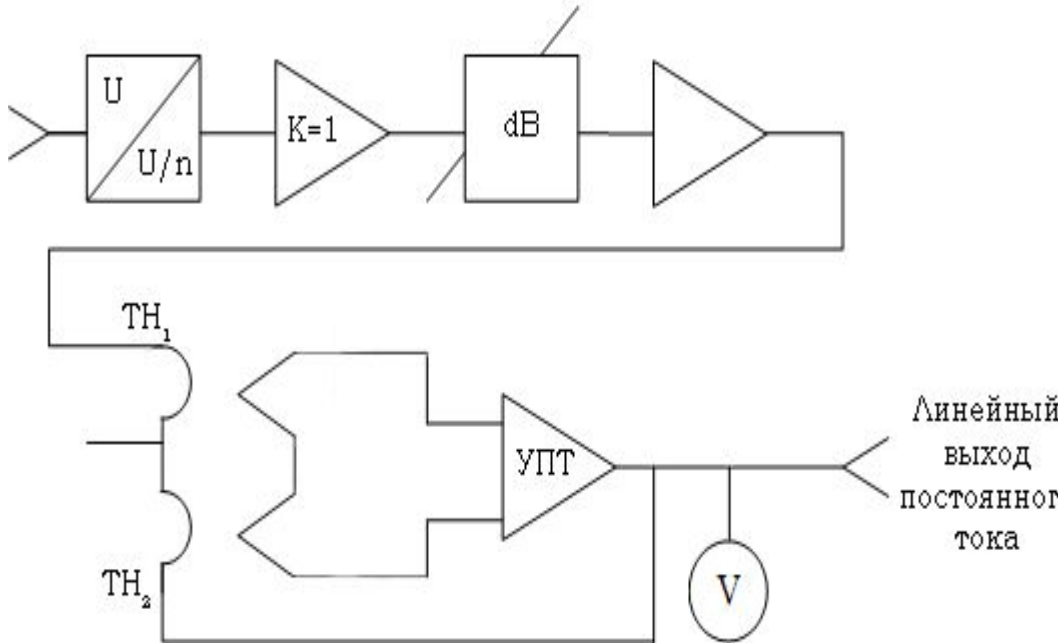


• **Детектор** – Преобразует переменное напряжение в постоянное. Название вольтметра определяется типом используемого преобразователя.



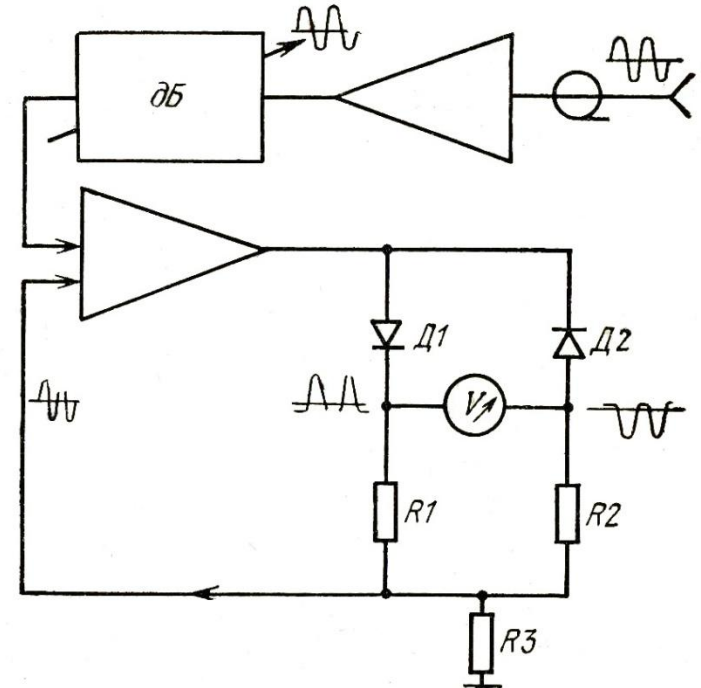


Структурная схема вольтметра с условными обозначениями



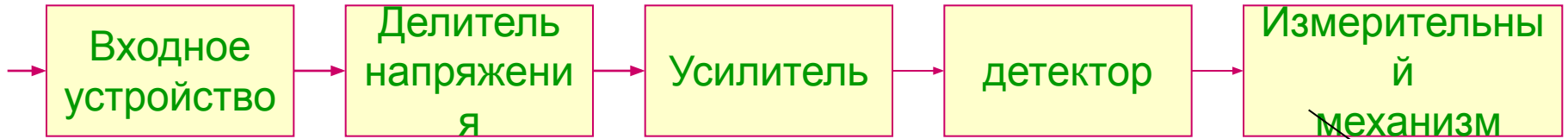
Вольтметр ВЗ-40

Вольтметр ВЗ-38

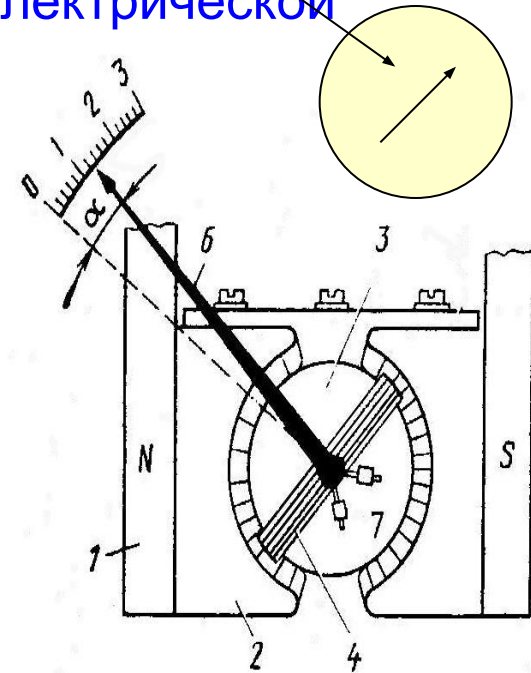
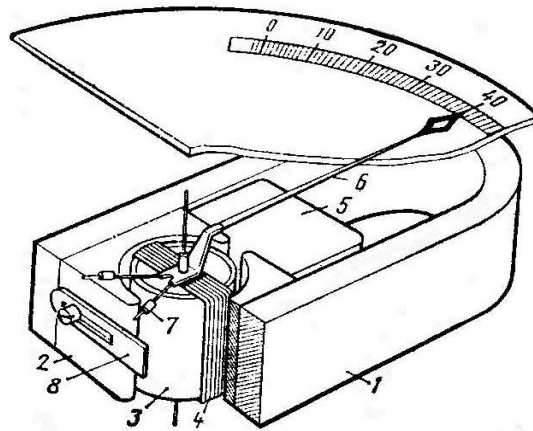


Вольтметры ВЗ-38 и ВЗ-40 имеют разные типы детекторов.
Вольтметр ВЗ-38 имеет детектор средневывпрямленных значений;
Вольтметр ВЗ-40 имеет детектор среднеквадратичных значений.

Измерительный механизм






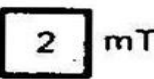

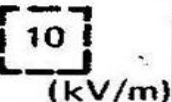


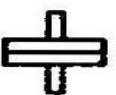

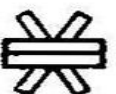


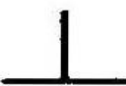


Измеритель – Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.



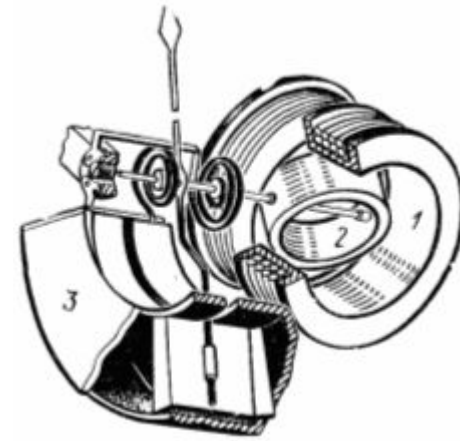
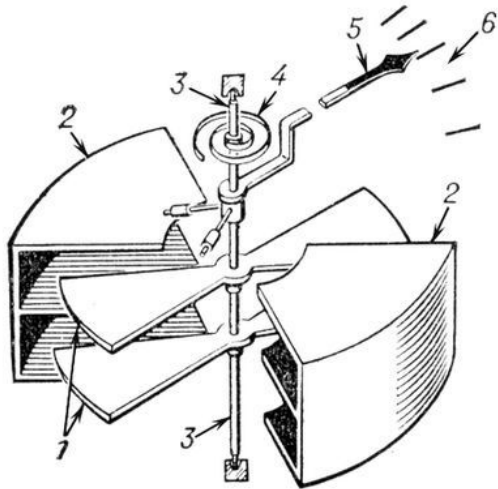
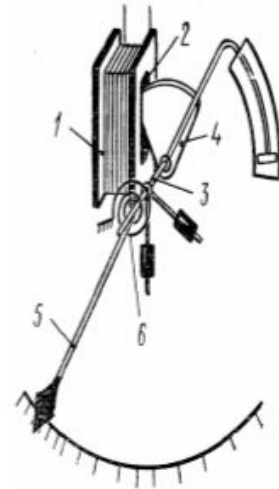
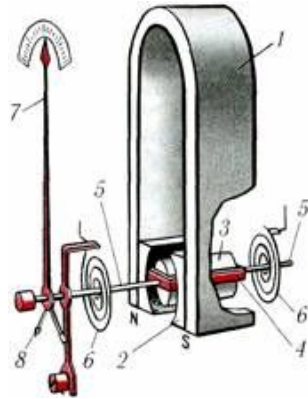
Измерительный механизм магнитоэлектрической системы обеспечивает более высокую точность измерений, но позволяет измерять только напряжение постоянного тока.



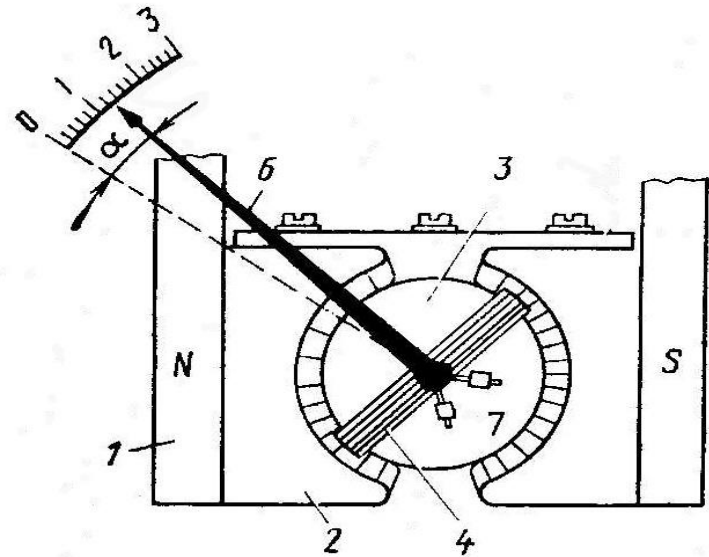
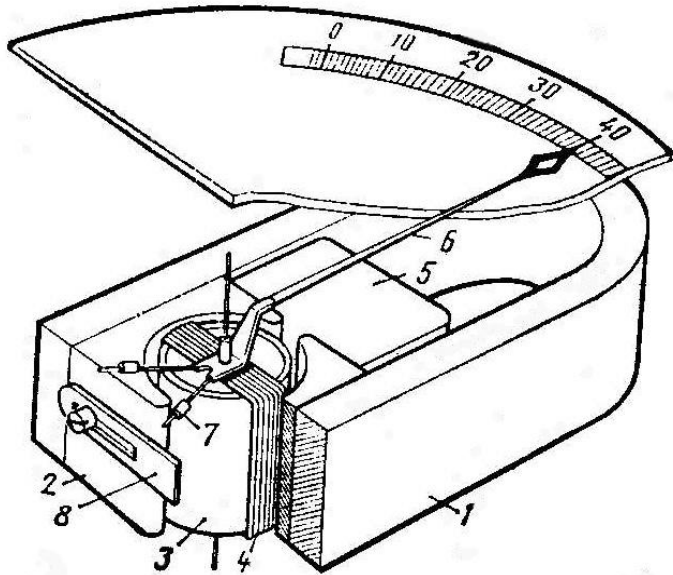
Условные обозначения на шкалах приборов

Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		Корректор	
Электромагнитный прибор		Магнитная индукция, мТл, вызывающая изменение показаний, соответствующая обозначенному классу точности	
Логометр магнитоэлектрический		Электрическое поле (кВ/м), вызывающее изменение показаний, соответствующее обозначенному классу точности	
Логометр электромагнитный		Напряжение испытательное 500 В	
Прибор электродинамический		Испытательное напряжение 500 В (например, 2 кВ)	
Логометр электродинамический		Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Прибор ферродинамический		Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Логометр ферродинамический		Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	

Измерительные механизмы

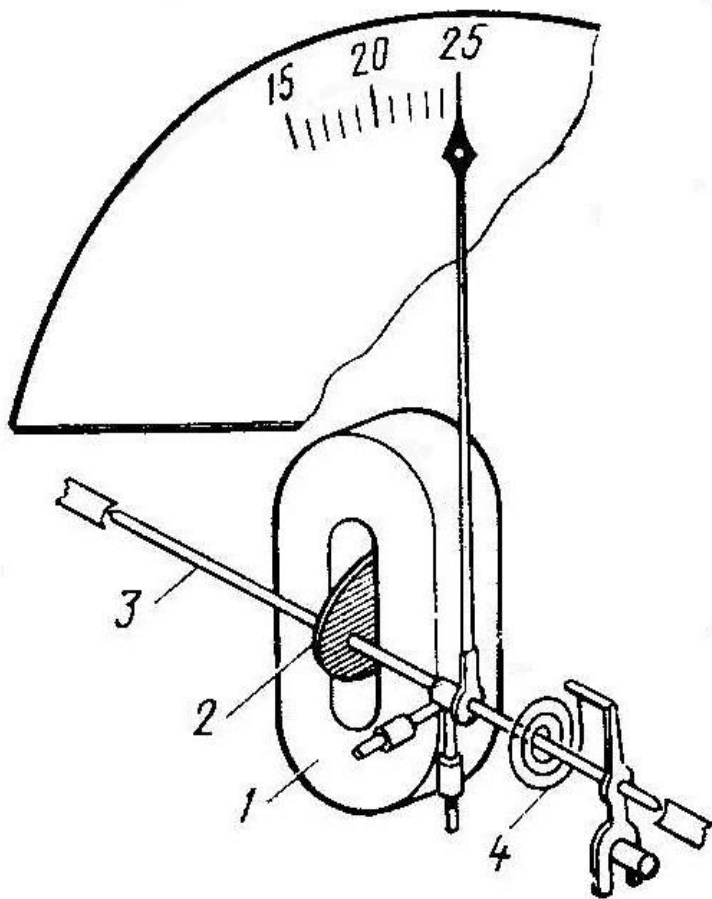


5.2. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы



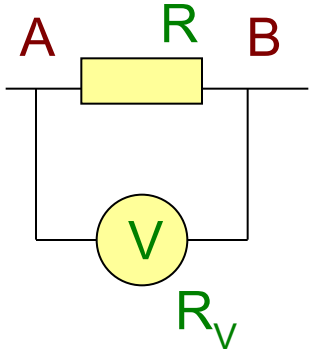
- Измерительный механизм магнитоэлектрической системы имеет:
- Постоянный магнит (1) для создания магнитного поля;
- Полюсные наконечники (2), позволяющие получить постоянное магнитное поле;
- Сердечник цилиндрической формы (3) из магнитомягкого материала на который замыкается магнитное поле;
- Подвижную катушку (рамку) (4), выполненную из изолированной проволоки;
- Стрелку (6).

Электромагнитная система



- Принцип действия этой системы основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Ферромагнитный сердечник втягивается в катушку при любой полярности тока. Следовательно приборы электромагнитной системы можно использовать для измерения переменного тока. Однако эти приборы являются низкочастотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

Методическая погрешность



Для измерения напряжения вольтметр с сопротивлением $R_V = 10 \text{ кОм}$ был подключен к резистору сопротивлением $R = 600 \text{ Ом}$. Определить методическую погрешность при измерении напряжения.

Дано: $R_V = 10 \text{ кОм}$; $R = 600 \text{ Ом}$ Найти: $\delta - ?$

При подключении вольтметра к (\cdot) АВ сопротивление участка цепи изменится и станет равным:

$$R_{AB} = \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}$$

Падение напряжения U_{AB} определится как:

$$U_{AB} = I \cdot R_{AB} = I \cdot \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}$$

Примем что:

$$I = \frac{U}{R}$$

тогда

$$U_{AB} = \frac{U}{R} \cdot \frac{R \cdot R_V}{R + R_V} = U \cdot \frac{R_V}{R + R_V}$$

Определим погрешность измерения

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\Delta U}{U_d} \cdot 100\% = \frac{U_{AB} - U}{U} \cdot 100\% \\ &= \frac{U \cdot \frac{R_V}{R + R_V} - U}{U} \cdot 100 = \frac{U \left(\frac{R_V}{R + R_V} - 1 \right)}{U} \cdot 100\% \\ &= \frac{R_V - R - R_V}{R + R_V} \cdot 100\% = -\frac{R}{R + R_V} \cdot 100\%\end{aligned}$$

$$\delta = -\frac{R}{R + R_V} \cdot 100\%$$



6.1 Детектор средневыпрямленных значений

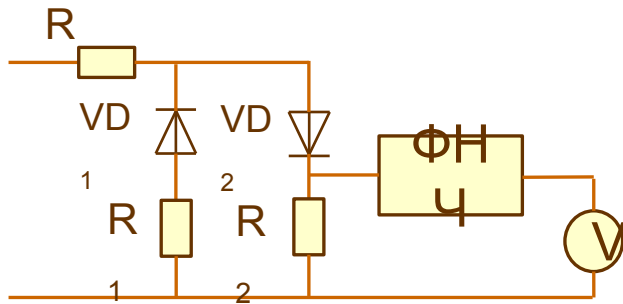
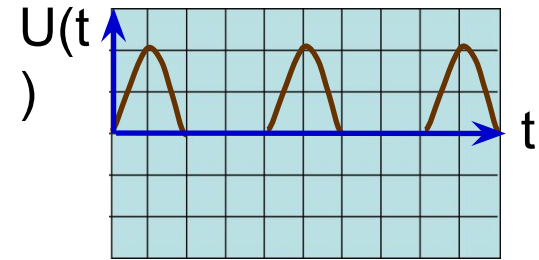
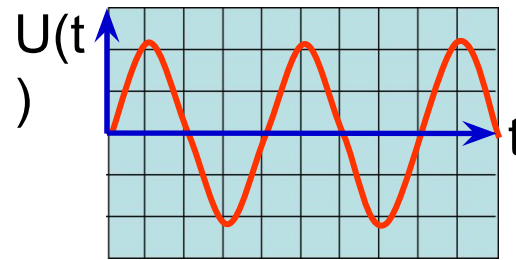


Схема
однополупериодного
выпрямителя



В некоторых простых приборах применяется однополупериодное выпрямление

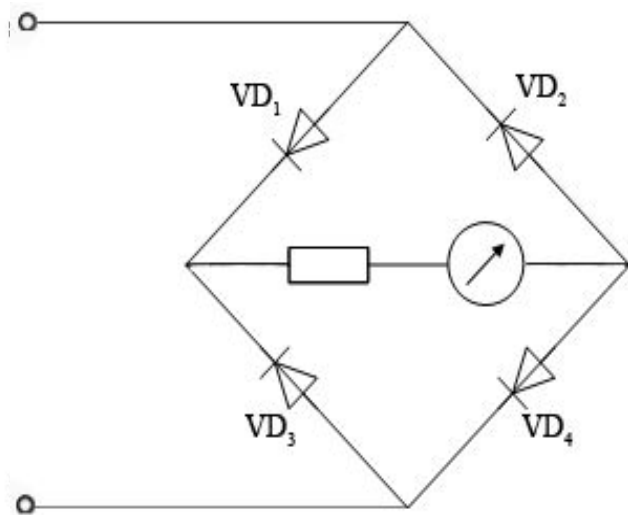
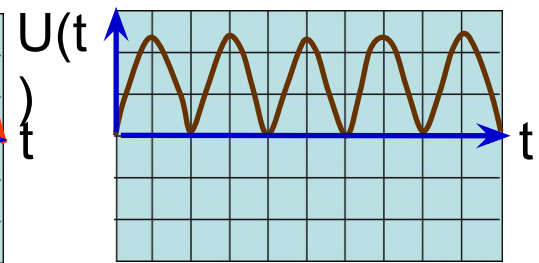
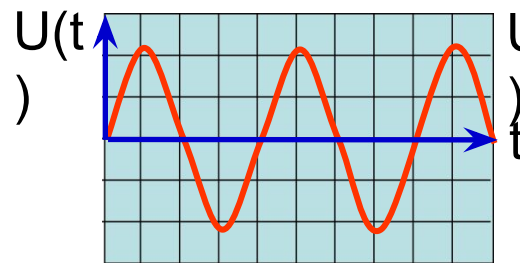


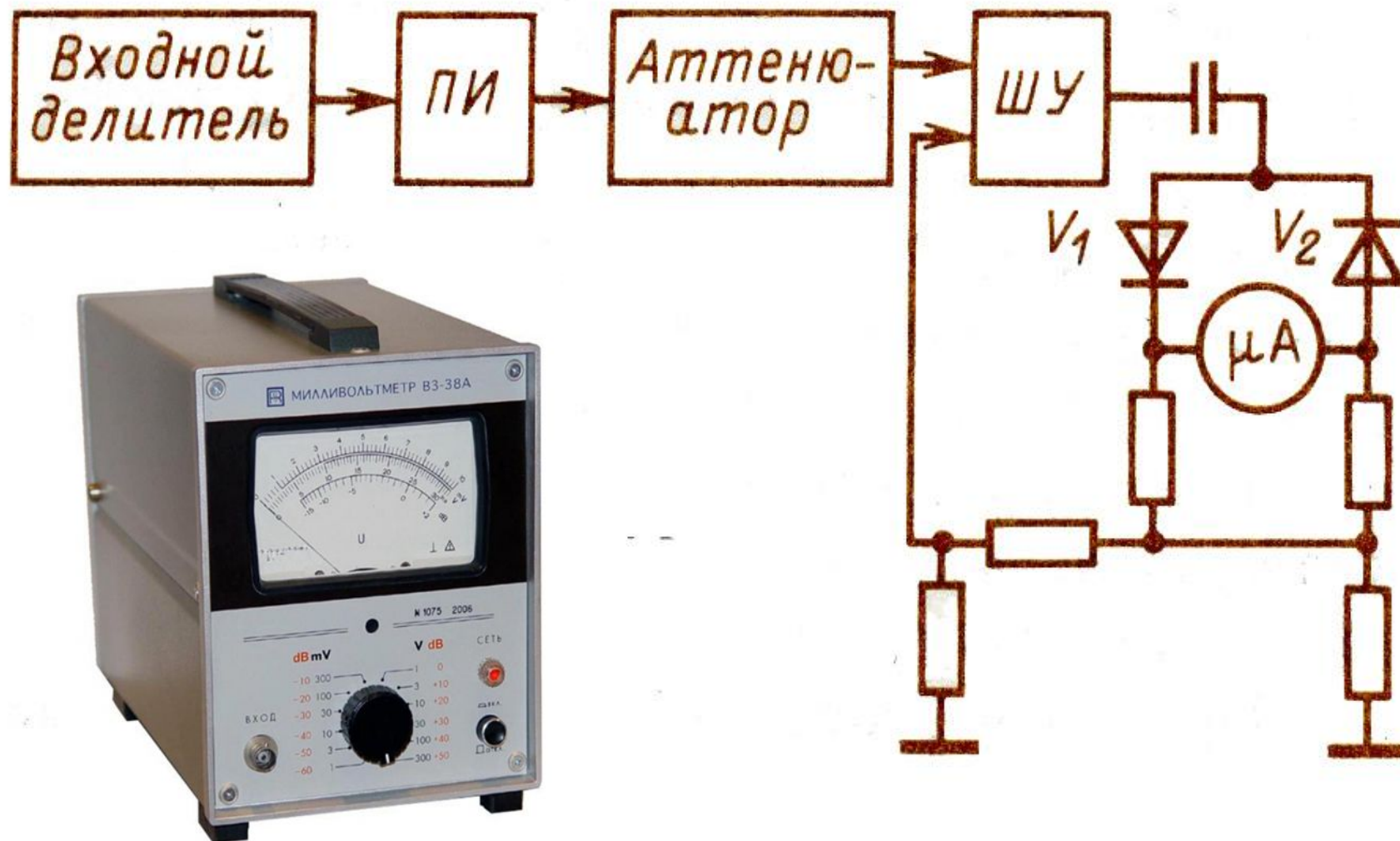
Схема двухполупериодного выпрямителя



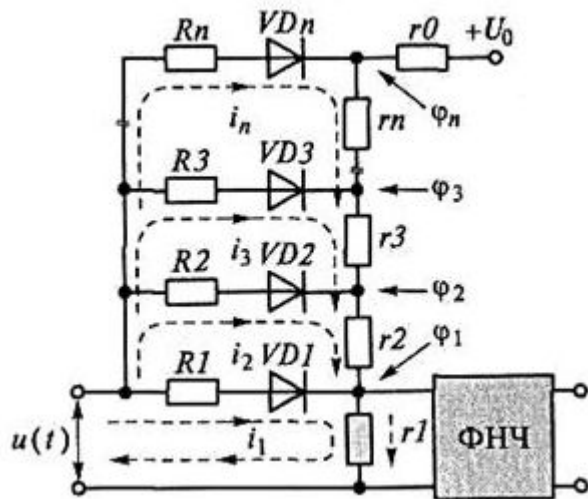
В двухполупериодной схеме выпрямителя ток проходит через измерительный механизм в обе половины периода.



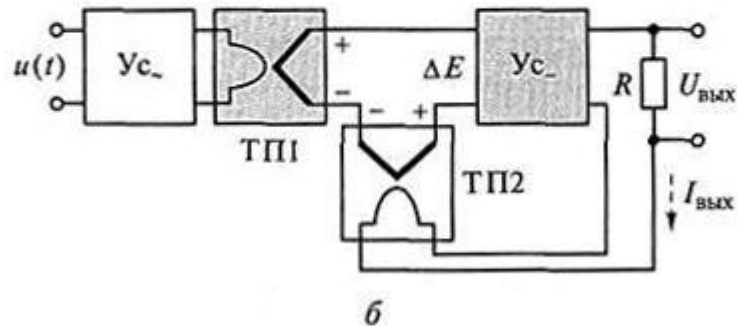
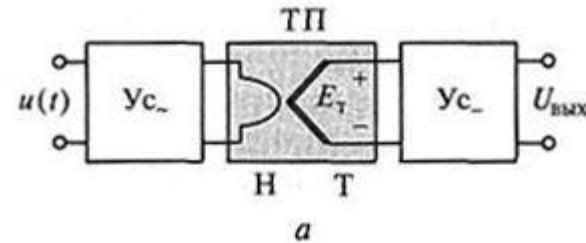
Вольтметр ВЗ-38



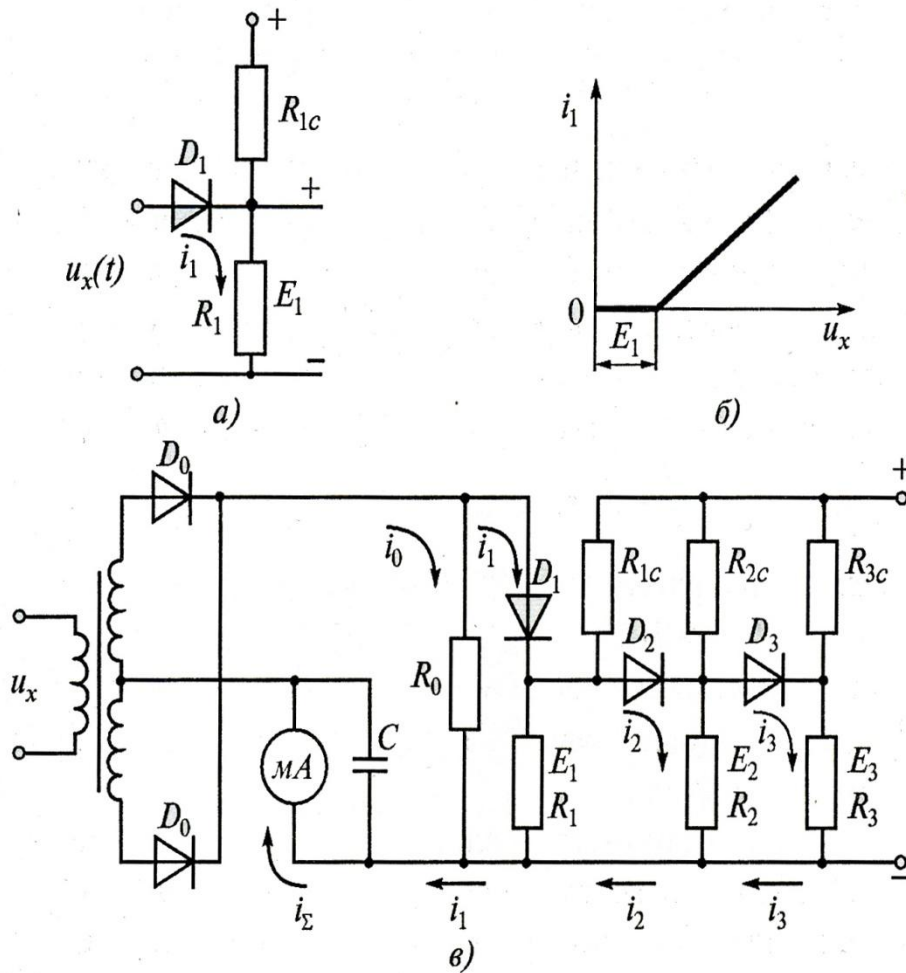
Детектор среднего квадратичного значения



Детекторы среднего квадратического значения (СКЗ) -Root Mean Square (RMS) делятся на аппроксимирующие детекторы (устройства, лишь приблизительно дающие нужный результат) и детекторы так называемого истинного СКЗ (True RMS - TRMS).



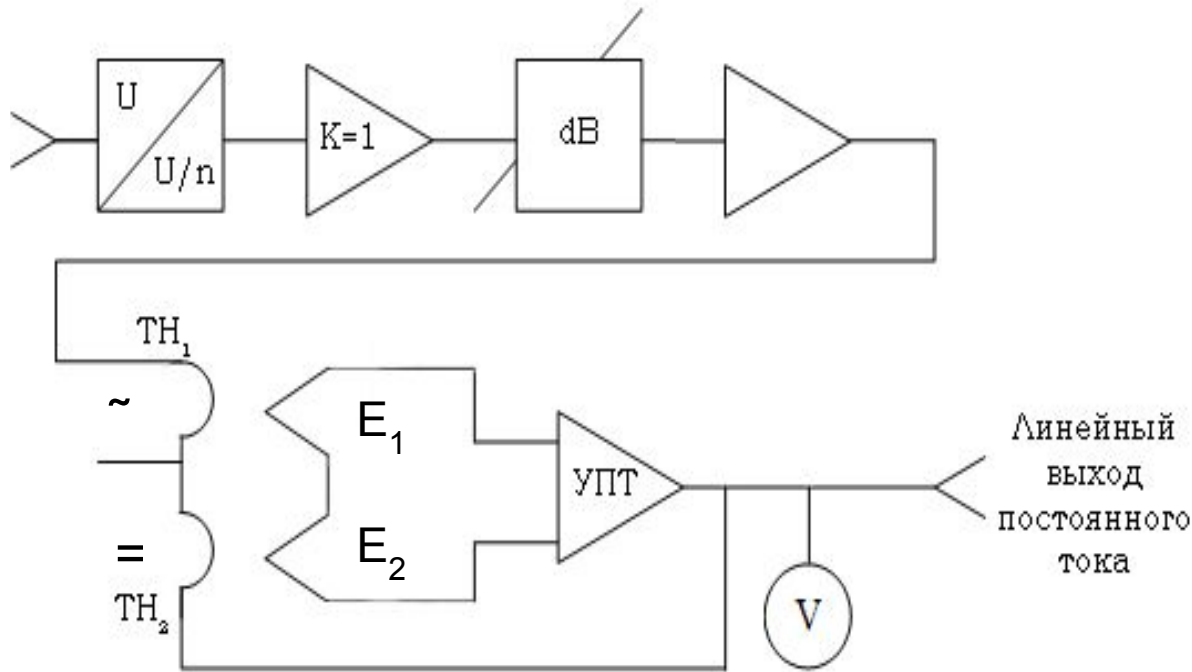
Детектор среднего квадратического значения



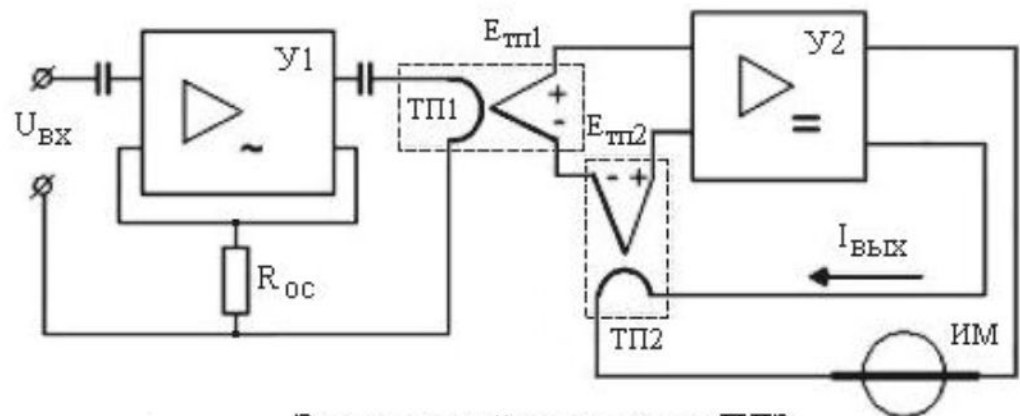
Преобразователи среднеквадратических значений выполняют операцию квадратирующего измерения измеряемого напряжения. Такую операцию выполняют детекторы с квадратичной вольт-амперной характеристикой. В современных вольтметрах операция квадратирующего осуществляется с помощью диодных аппроксиматоров и термоэлектрических преобразователей.

Рис. 3.7. Детектор среднего квадратического значения: а — диодная ячейка; б — идеализированная характеристика; в — схема квадратичного детектора

Вольтметр ВЗ-40

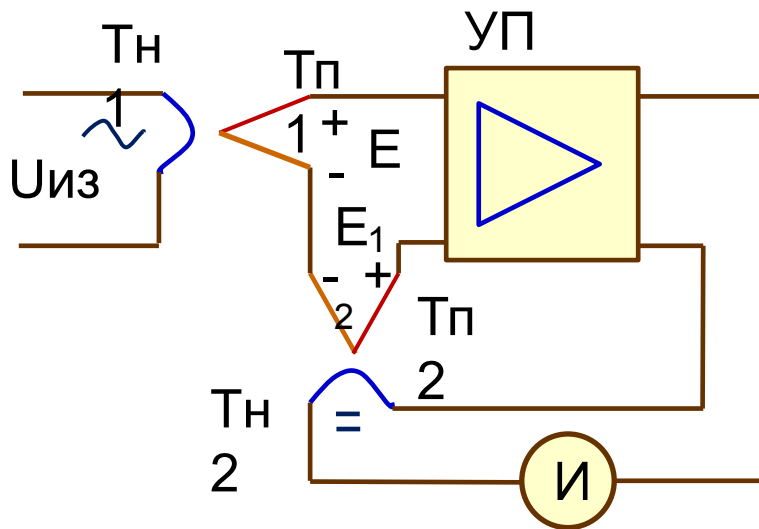


Термоэлектрический преобразователь среднеквадратичных значений содержит два термонагревателя и две термопары выполняемых в микромодульном исполнении.



Электронный вольтметр с ПДЗ.

Термопреобразователь



Термоэлектрический преобразователь среднеквадратичных значений содержит два термонагревателя и две термопары выполняемых в микромодульном исполнении.

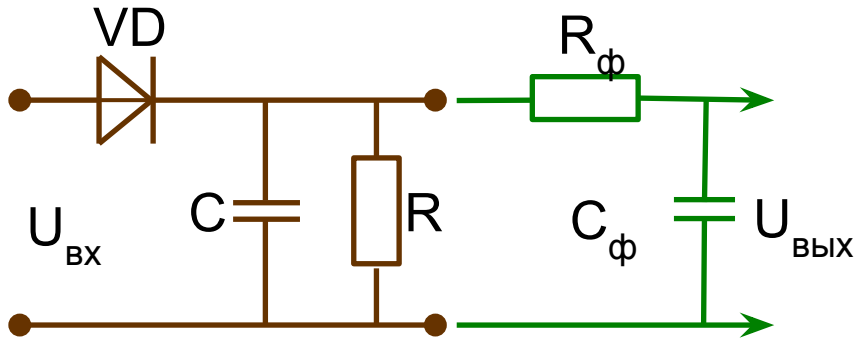
На подогреватель первого термопреобразователя $T_{н1}$ подается измеряемое напряжение $U_{из}$, а на подогреватель второго термопреобразователя $T_{н2}$ подается напряжение постоянного тока обратной связи. Термопары включены встречно на входе дифференциального усилителя. Постоянное выходное напряжение прямо пропорционально среднему квадратическому значению напряжения, которое показывает вольтметр

3. Детектор амплитудных значений

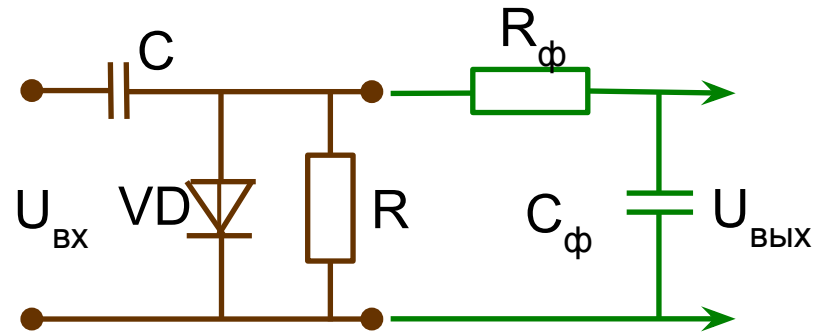
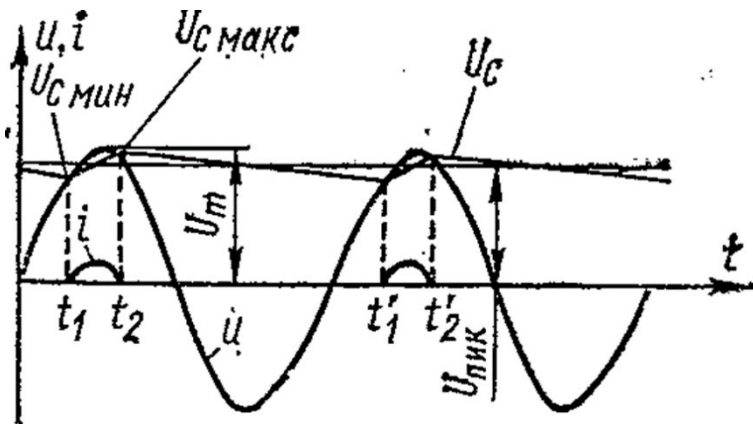
Высокочастотный вольтметр В3-52/1М



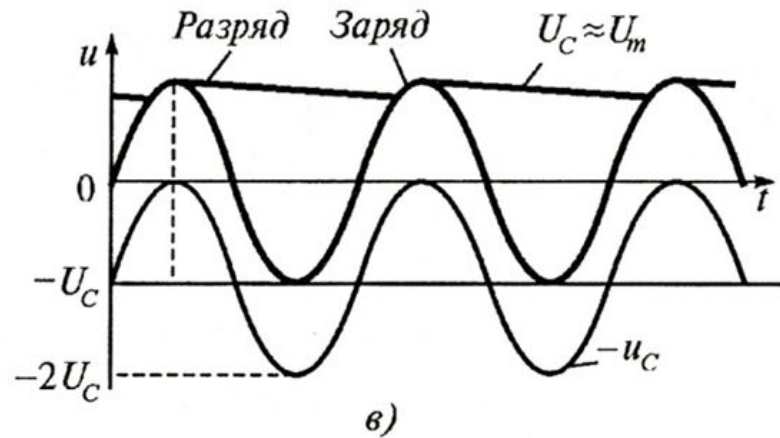
Детекторы амплитудных значений



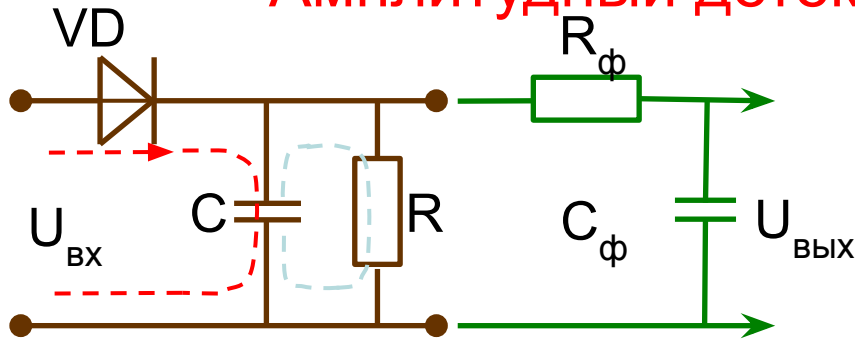
Детектор амплитудных значений
с открытым входом



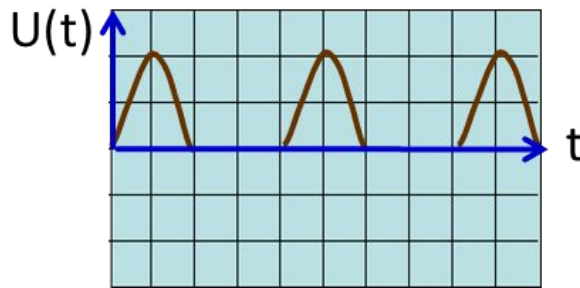
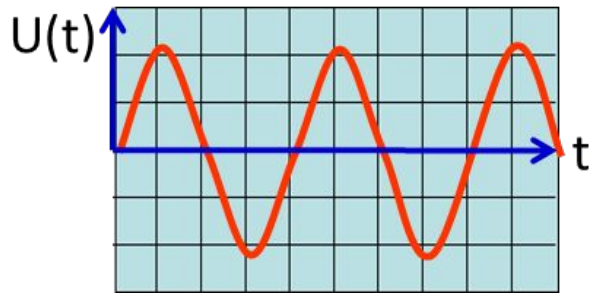
Детектор амплитудных значений
с закрытым входом



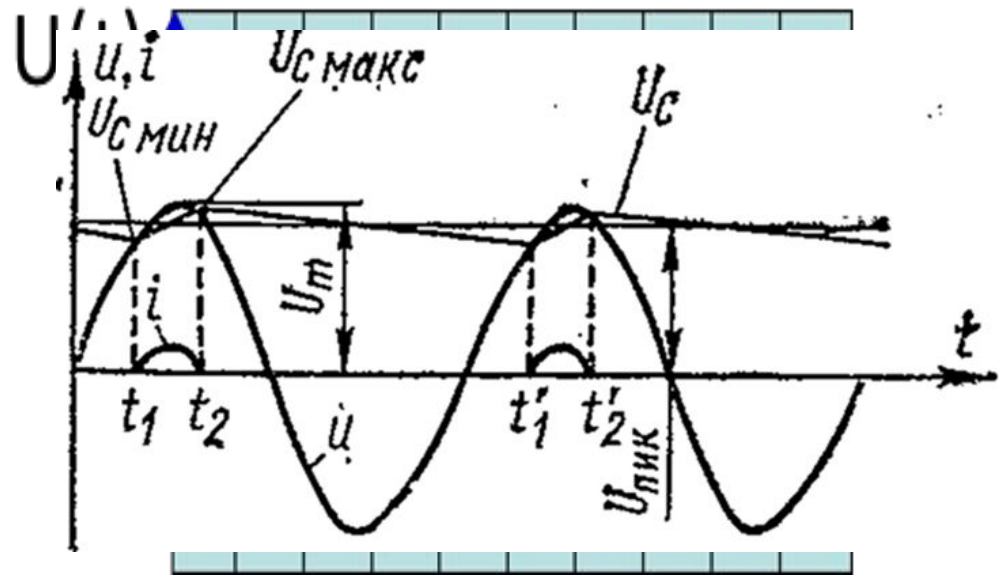
Амплитудный детектор с открытым входом



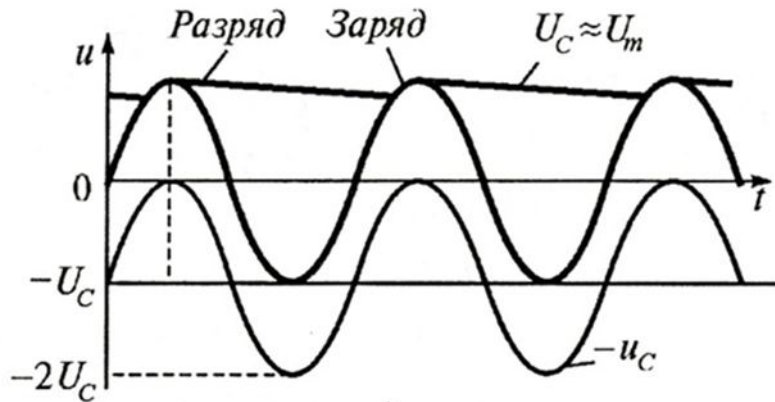
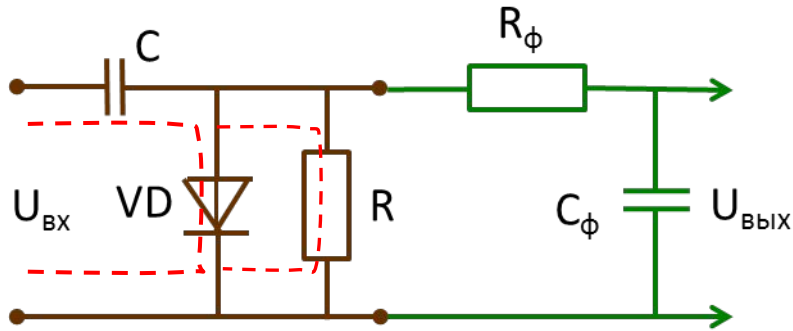
Принцип работы пикового детектора заключается в заряде конденсатора C через диод VD до максимального (пикового) значения $U_{\text{х}}$, которое затем запоминается, если постоянная времени разряда C (через R) значительно превышает постоянную времени заряда.



В моменты когда диод VD закрыт конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки R



Амплитудный детектор с закрытым входом



В схеме с закрытым входом заряд конденсатора происходит через малое сопротивление диода и внутреннее сопротивление источника напряжения. Разряд конденсатора происходит через большое сопротивление R и внутреннее сопротивление источника напряжения.

Устройства, включенные за сопротивлением R , выделяют постоянную составляющую напряжения, равную U_{max}

Амплитудный детектор на операционном усилителе

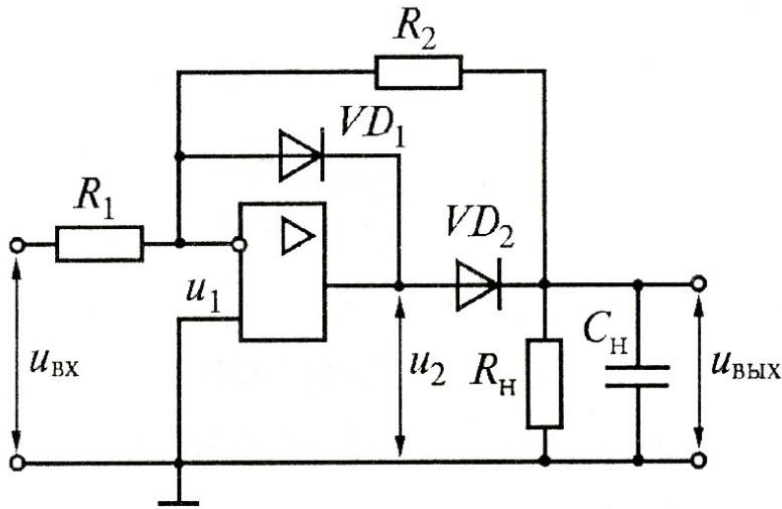


Рис. 3.9. Амплитудный детектор на ОУ

Данный детектор выполнен по инвертирующей схеме поэтому при подаче положительных полуволн напряжение U_2 на выходе ОУ будет отрицательным. При этом диод VD_1 открыт, а диод VD_2 закрыт. Выход ОУ через малое прямое сопротивление диода VD_1 подключен ко входу, что создает глубокую отрицательную обратную связь.

В результате напряжение на выходе ОУ равно напряжению на его входе и близко к нулю. При подаче отрицательной полуволны напряжение U_2 на выходе ОУ будет положительным, поэтому диод VD_1 закрыт, а диод VD_2 при этом напряжение на ОУ и детектора

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_2 = -U_{\text{ВХ}} \cdot R_2 / R_1$$

MCP
lab electronics

MT8045

DUAL DISPLAY MULTIMETER

- 00000
hFE

TRUE RMS DMM

V \equiv 200V 1000V 750V 200V V \sim
20V 2V 20V 2V
200mV 200mA
20M Ω 200mV 200mA
2M Ω 2A A \sim
200k Ω 20A
20k Ω 20A A \equiv
 Ω 2k Ω 20mA
200 Ω 20nF
20kHz 200kHz hFE 200uF 2uF F

V Ω Hz
1000VDC
750VAC
MAX
COM
ALL INPUTS
1kV MAX
2A MAX
FAST FUSE
20A mA
CAT II 1000V

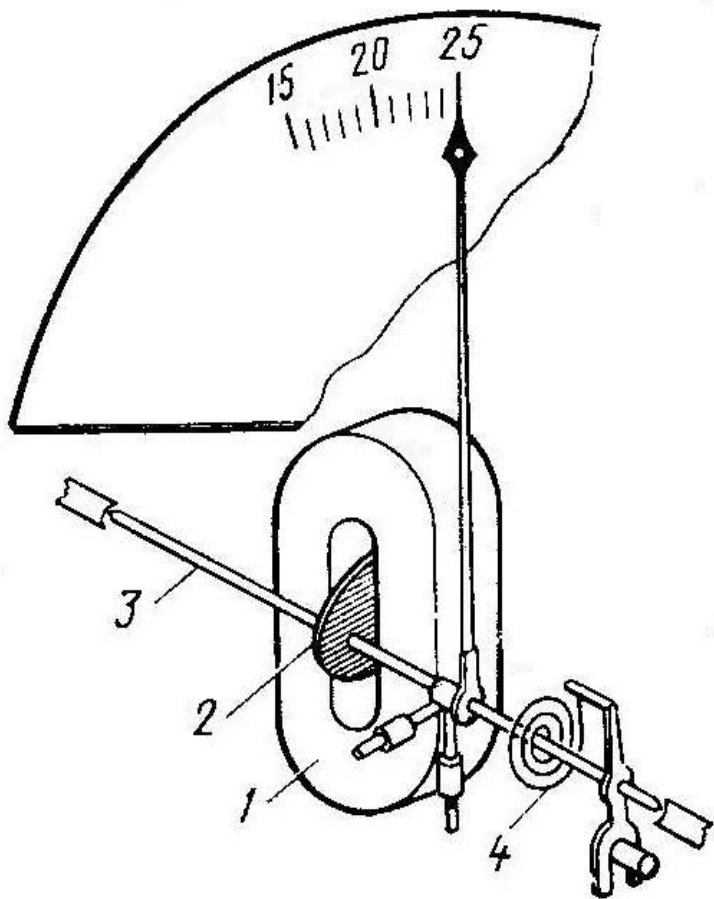
POWER
ON OFF
* HOLD AC+DC

E E
B B
C C
PNP E E NPN
- +
Cx

10sec MAX
20A FUSE

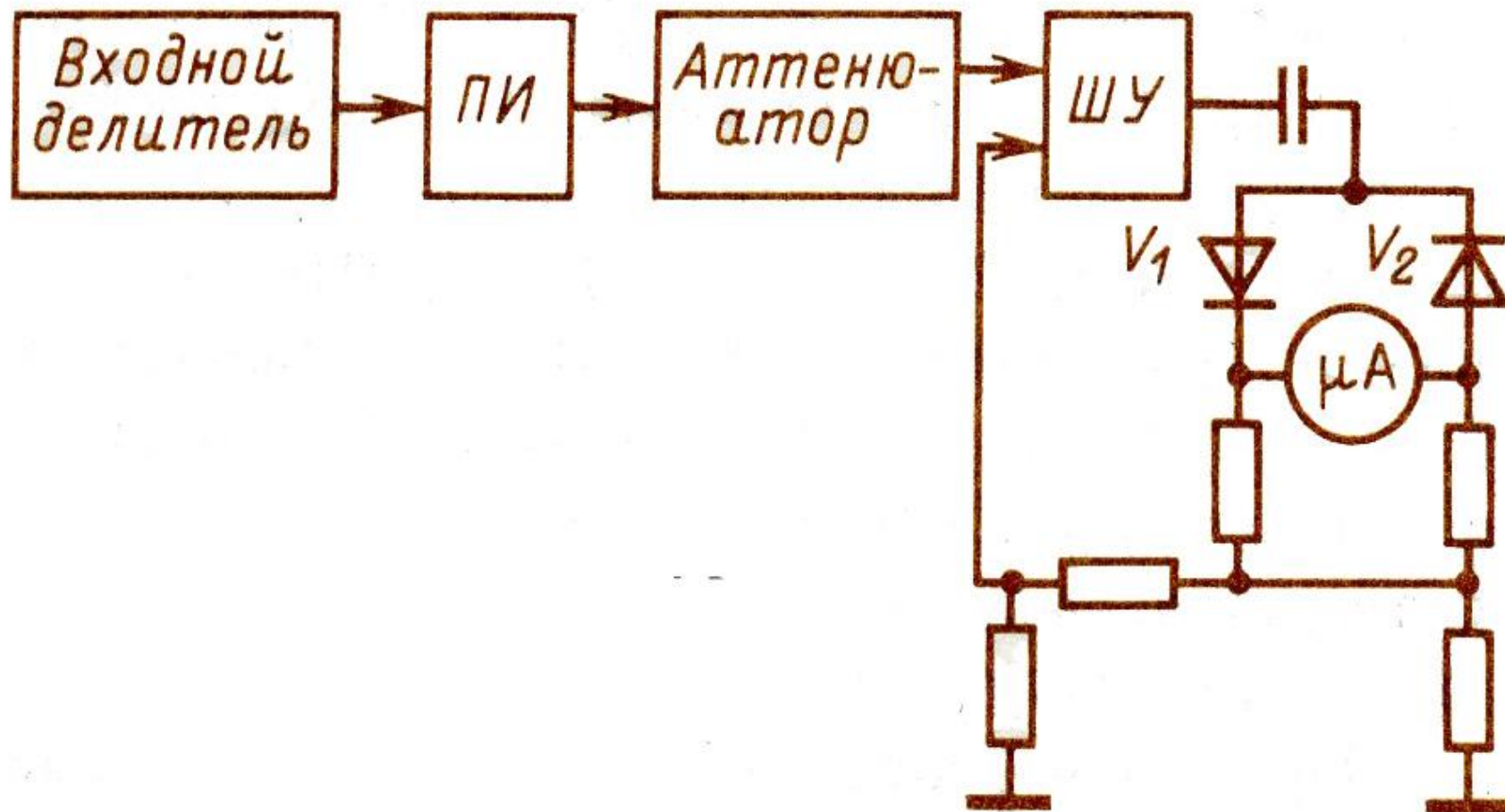


Электромагнитная система



- Принцип действия этой системы основан на взаимодействии катушки с ферромагнитным сердечником. Ферромагнитный сердечник втягивается в катушку при любой полярности тока. Следовательно приборы электромагнитной системы можно использовать для измерения переменного тока. Однако эти приборы являются низкочастотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

Вольтметр ВЗ-38



Градуировка вольтметров

Все вольтметры не зависимо от типа детектора градуируются в средне квадратических значениях напряжения. Для этого вводятся коэффициент формы и коэффициент амплитуды.

Коэффициент формы определяется:

$$K_{\Phi} = \frac{U_{Cк}}{U_{Cв}} = \frac{U_m \cdot 0.707}{U_m \cdot 0.637} = 1.11$$

Коэффициент амплитуды определяется:

$$K_A = \frac{U_m}{U_{Cк}} = \frac{U_m}{U_m \cdot 0.707} = 1.41$$

Показания вольтметров

1. Определим показания вольтметра среднеквадратичных значений

Показания вольтметра среднеквадратичных значений равны

$$A_{Cк} = U_{Cк}$$

2. Определим показания вольтметра средневыпрямленных значений

Показания вольтметра средневыпрямленных значений равны

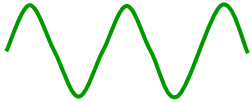
$$A_{Cв} = U_{Cв} \cdot K_{\phi}$$

3. Определим показания вольтметра амплитудных значений

Показания вольтметра амплитудных значений равны

$$A_m = \frac{U_m}{K_A}$$

Определим показания вольтметров имеющих разные типы детекторов при измерении синусоидального напряжения с амплитудой $U_m = 10 \text{ В}$

Дано:  $U_m = 10 \text{ В}$ Найти: $A_{Cк}$, $A_{Cв}$, A_m

Решение:

1. Определим показания вольтметра среднеквадратических значений.

$$A_{Cк} = U_{Cк} = U_m \cdot 0.707 = 10 \cdot 0.707 = 7.07(B)$$

2. Определим показания вольтметра среднев्यпрямленных значений.

$$A_{Cв} = U_{Cв} \cdot K_{\Phi} = U_m \cdot 0.637 \cdot K_{\Phi}$$

$$A_{Cв} = 10 \cdot 0.637 \cdot 1.11 = 7.07(B)$$

3. Определим показания вольтметра амплитудных значений.

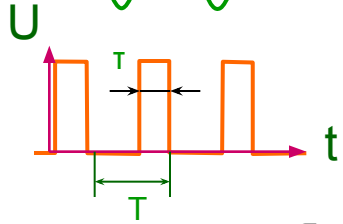
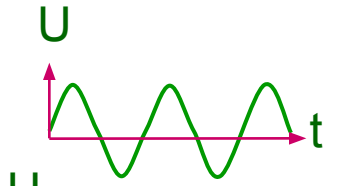
$$A_m = \frac{U_m}{K_A} = \frac{10}{1.41} = 7.07(B)$$

При измерении синусоидального напряжения все вольтметры не зависимо от типа детектора покажут одно и тоже напряжение.

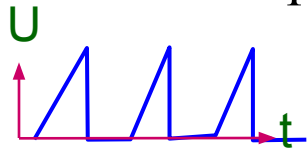


Зависимость показаний вольтметра от типа детектора

Форма сигнала



$$\alpha = \frac{\tau}{T}$$



Средневыпрямленное
напряжение

$$U_{CB} = U_m \cdot 0.637$$

$$U_{Cв} = U_m \cdot \alpha$$

$$U_{Cв} = \frac{U_m}{2}$$

Среднее квадратическое
напряжение

$$U_{CK} = U_m \cdot 0.707$$

$$U_{CK} = U_m \cdot \sqrt{\alpha}$$

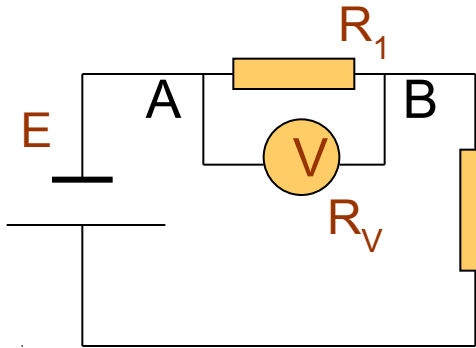
$$U_{CK} = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

$$U_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt$$

$$U_{CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

Зависимость погрешности измерений от входного сопротивления вольтметра

Определить погрешность измерения напряжения на нагрузке $R_1 = 10 \text{ кОм}$ если сопротивление вольтметра $R_V = 10 \text{ кОм}$. $R_2 = 10 \text{ кОм}$ $E = 3 \text{ В}$



Дано: $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_V = 10 \text{ кОм}$, $E = 3 \text{ В}$

Найти: U_1 , U_V , δ

Решение:

1. Определим падение напряжения U_1 на резисторе R_1 без подключения вольтметра.

$$R_{O6} = R_1 + R_2 = 10 + 10 = 20(\text{кОм})$$

$$I = \frac{E}{R_{O6}} = \frac{3}{20 \cdot 10^3} = 0.15 \cdot 10^{-3} = 0.15(\text{mA})$$

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0.15 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 1.5(\text{В})$$

2. Определим падение напряжения на резисторе R_1 при подключении вольтметра.

Определим сопротивление участка АВ

$$R_{AB} = \frac{R_1 \cdot R_V}{R_1 + R_V} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5(\kappa\text{Ом})$$

Определим общее сопротивление цепи

$$R_{\text{общ}} = R_{AB} + R_2 = 5 + 10 = 15(\kappa\text{Ом})$$

Определим ток в цепи

$$I_{\text{общ}} = \frac{E}{R_{\text{общ}}} = \frac{3}{15 \cdot 10^3} = 0.2 \cdot 10^{-3} = 0.2(\text{mA})$$

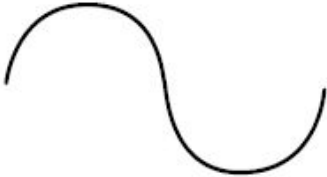
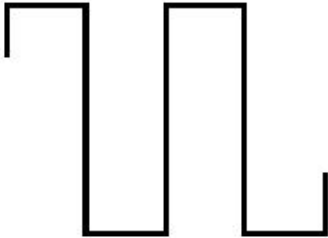
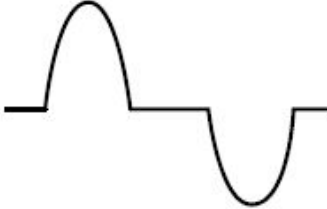
Определим падение напряжения на участке АВ

$$U_{AB} = I_{\text{общ}} \cdot R_{AB} = 0.2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 1(\text{В})$$

При подключении вольтметра изменился ток и стал равен 0.2 mA напряжение также изменилось и стало равным 1 В.

3 Определим погрешность измерения при подключении вольтметра

Погрешности при измерении не синусоидальных напряжений

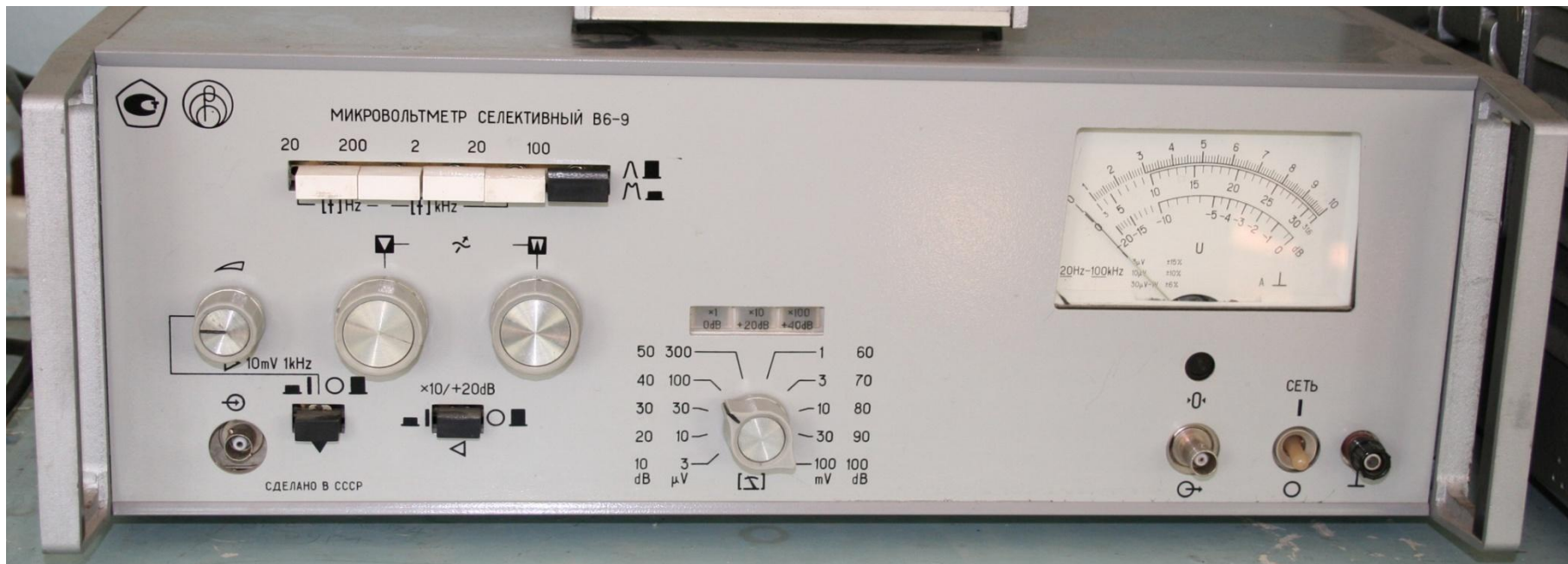
Тип измерителя	Принцип измерения	Измерение синусоиды	Измерение прямоуг. сигнала	Измерение искажённого сигн.
С усреднением показаний	Умножение среднего выпрямленного знач. на 1.1	 Истинное	 10% завышение	 Завышение до 50 %
С истинно среднеквадратическими показаниями	Расчет величины теплового эффекта по среднестатистическому значению	Истинное	Истинное	Истинное

Милливольтметр импульсного тока



Милливольтметр В4-12 предназначен для измерения амплитудных значений напряжений видеоимпульсов и амплитудных значений напряжений переменного тока

Селективный вольтметр



Микровольтметр селективный В6-9 предназначен для измерения среднеквадратических значений малых синусоидальных напряжений.