

Московский энергетический институт
Институт Автоматики и вычислительной техники
Кафедра Информационно-измерительной техники

В.Ю. Кончаловский

ЦИФРОВОЙ МУЛЬТИМЕТР

Методическое руководство к лабораторной работе №7

Мультиметр – это прибор, который может измерять несколько величин, каждую в нескольких поддиапазонах (multi- в сложных словах означает много-). Цифровой мультиметр (ЦМ) – это электронный прибор с цифровым отсчётом показаний.

Структурная схема изучаемого в данной работе ЦМ (рис. 1) содержит: входные устройства (ВУ), преобразующие измеряемые величины в постоянное напряжение; аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий это напряжение в код; цифровое отсчётное устройство ЦОУ.

Выбор измеряемой величины и поддиапазона её измерения осуществляется поворотом переключателя. Измерение переменного напряжения U_{\sim} в работе не используется.

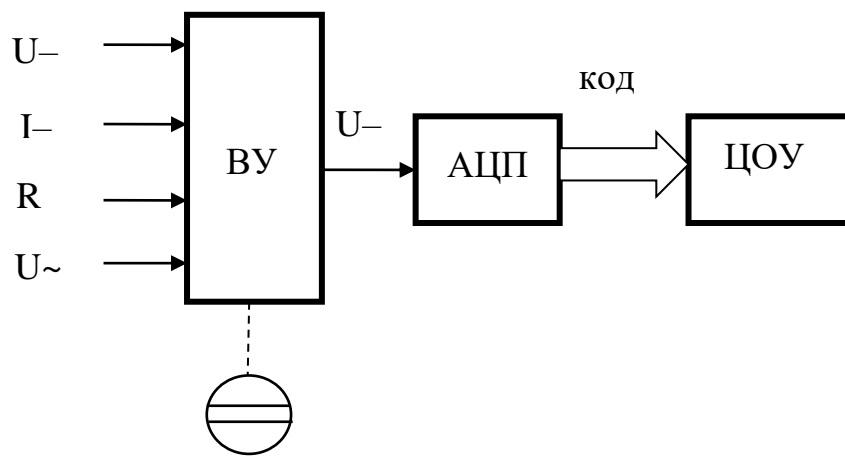


Рис. 1. Структурная схема мультиметра М832 фирмы Mastech.

АЦП основан на методе двухтактного интегрирования (Приложение 2).

ЦОУ реализовано на жидких кристаллах, имеет три цифры и знак плюс или минус (при измерении постоянного напряжения U_{-} и постоянного тока I_{-}).

Схемы ВУ показаны на рис. 2.

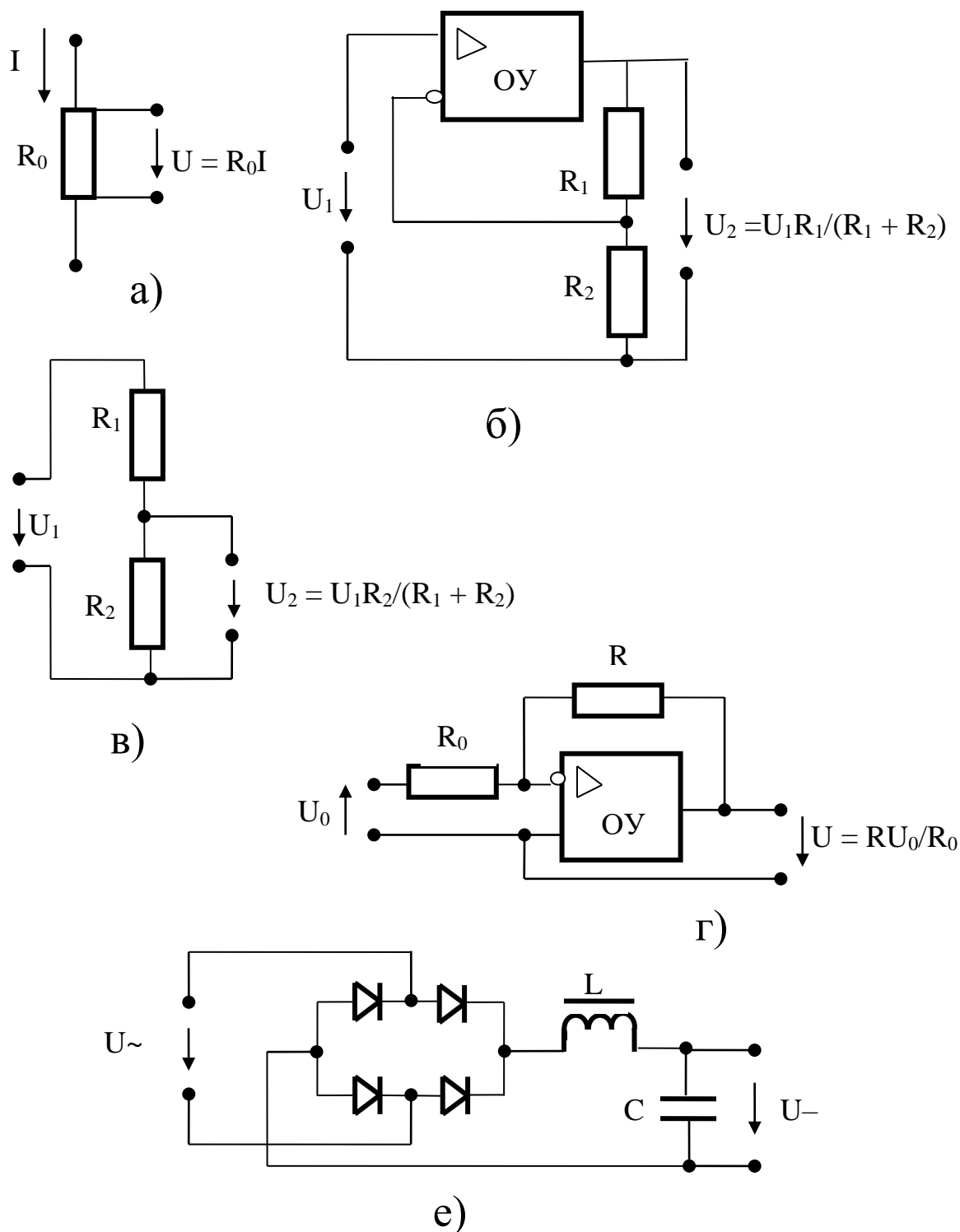


Рис. 2. Схемы ВУ: а – преобразователь постоянного тока в напряжение; б – усилитель для малых напряжений постоянного тока; в – делитель для больших напряжений постоянного и переменного тока; г – преобразователь сопротивления в напряжение постоянного тока; д – выпрямитель с фильтром для преобразования напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока.

Задание

1. Произвести прямое измерение R .
2. По известным метрологическим характеристикам мультиметра (Приложение 1) рассчитать предельные значения абсолютной погрешности прямого измерения R .
3. Пользуясь эталонным средством измерения (магазин сопротивлений) определить действительное значение погрешности прямого измерения.
4. Проверить, не противоречит ли полученное действительное значение погрешности её предельным значениям.
5. Выбрать и согласовать с преподавателем какой-либо другой способ измерения R (косвенное измерение; метод замещения).
6. По выбранному и согласованному с преподавателем способу произвести измерение R . **ВЫКЛЮЧИТЬ МУЛЬТИМЕТР** (переключатель в **OFF**).
7. С использованием известных характеристик использованных средств измерения рассчитать предельные значения абсолютной погрешности измерения R по п. 6.
8. Используя результаты п.п. 2 и 7, проверить, укладывается ли расхождение результатов измерений R по п.п. 1 и 6 в диапазон возможных значений этого расхождения.

Методические указания

Номера пунктов соответствуют заданию.

1. В мультиметре предусмотрена возможность прямого измерения R . Нужно только оптимально выбрать диапазон измерения.
2. Вычисление предельных значений абсолютной погрешности прямого измерения — здесь и далее «предельных значений» написано во множественном числе, потому что их два: они одинаковы по модулю, но разные по знаку — производится прямо по известным метрологическим характеристикам мультиметра (Приложение 1).

3. В п. 2 по приведённым в Приложении 1 метрологическим характеристикам мультиметра мы определяли *предельные* значения погрешности прямого измерения сопротивления R . *Действительное* значение погрешности для данного экземпляра мультиметра может иметь любое значение внутри интервала, определяемого предельными значениями. Действительные значения погрешностей можно определить с помощью эталонных средств измерения, существенно более точных, чем мультиметр. Мы располагаем таким эталонным средством – многозначной мерой сопротивления, называемой магазином сопротивлений. Искомое действительное значение погрешности – это разность показания мультиметра и измеряемого им сопротивления, установленного на магазине. Надо установить на магазине значение сопротивления, которое было получено в п. 1. Обратите внимание, что предельные значения (положительное и отрицательное) ограничивают диапазон возможных значений погрешности, а действительное значение – это одно определённое значение со знаком плюс или минус.

4. Не противоречит, если действительное значение находится внутри диапазона, ограниченного предельными значениями.

5. Прямое измерение сопротивления не всегда применимо (иногда, например, надо проводить измерение при заданном токе) и не всегда даёт наиболее точный результат. На рис. 3 ÷ 9 показаны некоторые другие способы измерения R .

Обозначения на рис. 3 ÷ 9:

R – искомое сопротивление; V и mA – мультиметр в режимах измерения постоянного напряжения (вольтметр) и постоянного тока (миллиамперметр); ИН – источник напряжения; R_0 – известное сопротивление (используется магазин сопротивлений P33 или P32). Схемы рис. 3 ÷ 7 соответствуют косвенному измерению: значение сопротивления R вычисляется по измеренным значениям напряжения и тока и известному значению сопротивления R_0 (табл. 1).

Таблица 1.

№№ рисунка	Расчётная формула
3	$R = U/I$
4	$R = U/I$
5	$R = R_0 U/U_0$
6	$R = R_0 I_0/I$
7	$R = R_0 (I_0/I - 1)$
8	$R = R_0$
9	$R = R_0$

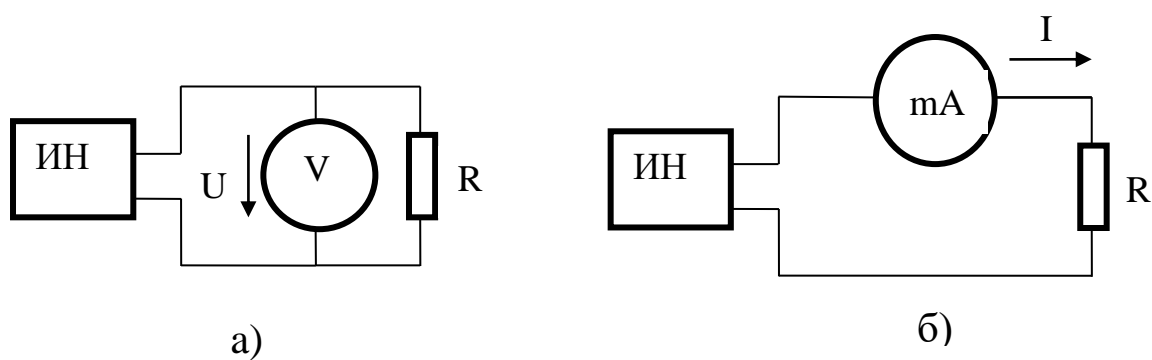


Рис. 3

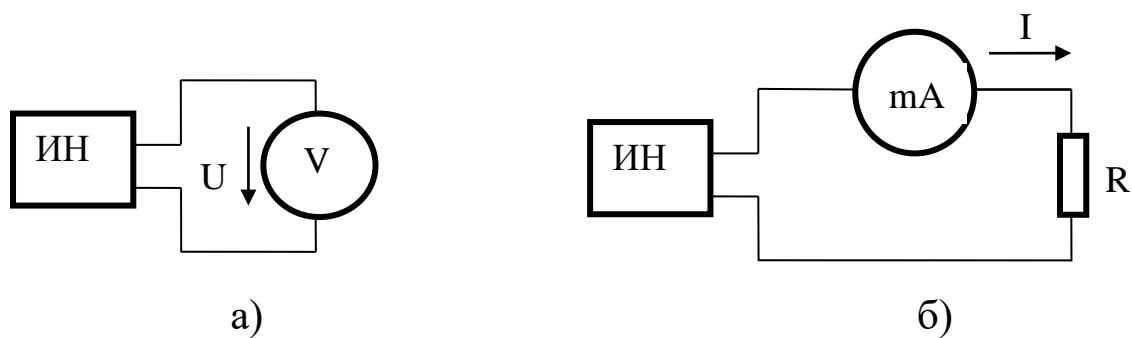


Рис. 4

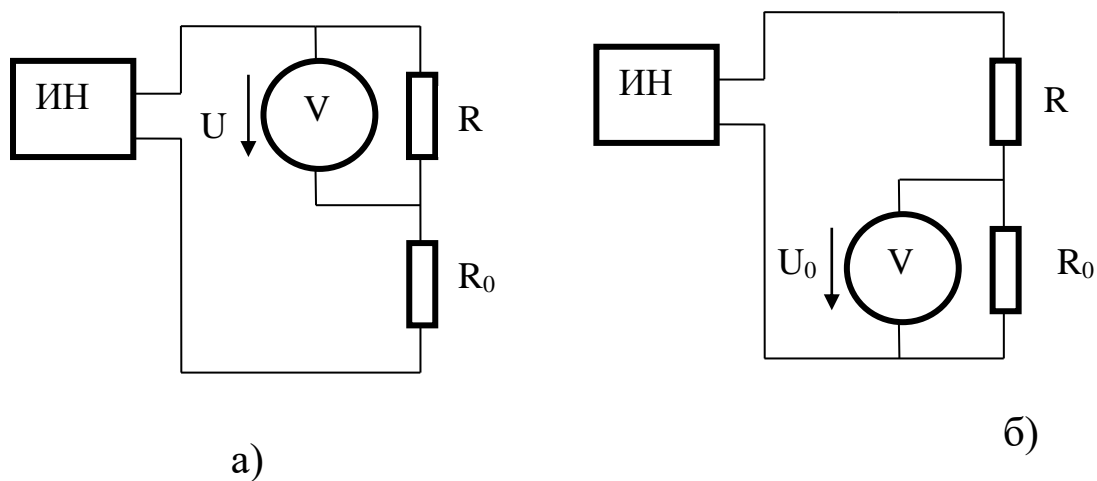


Рис. 5

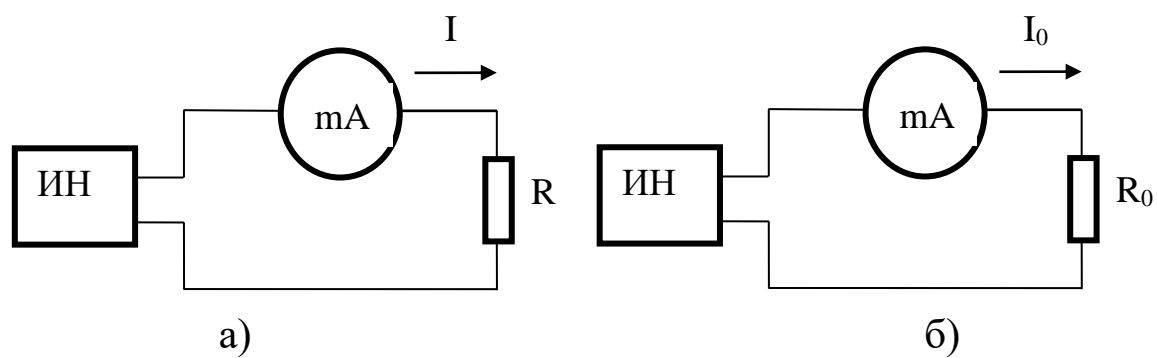


Рис. 6

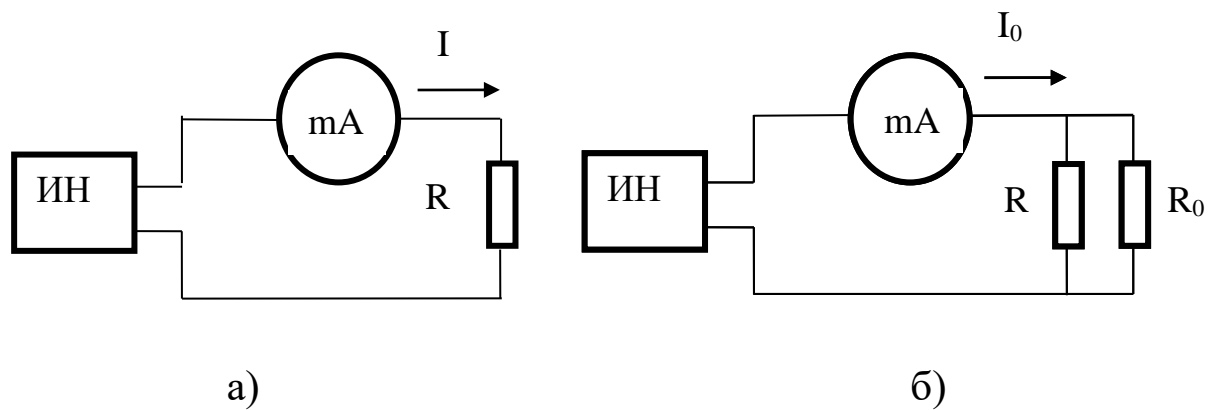


Рис. 7

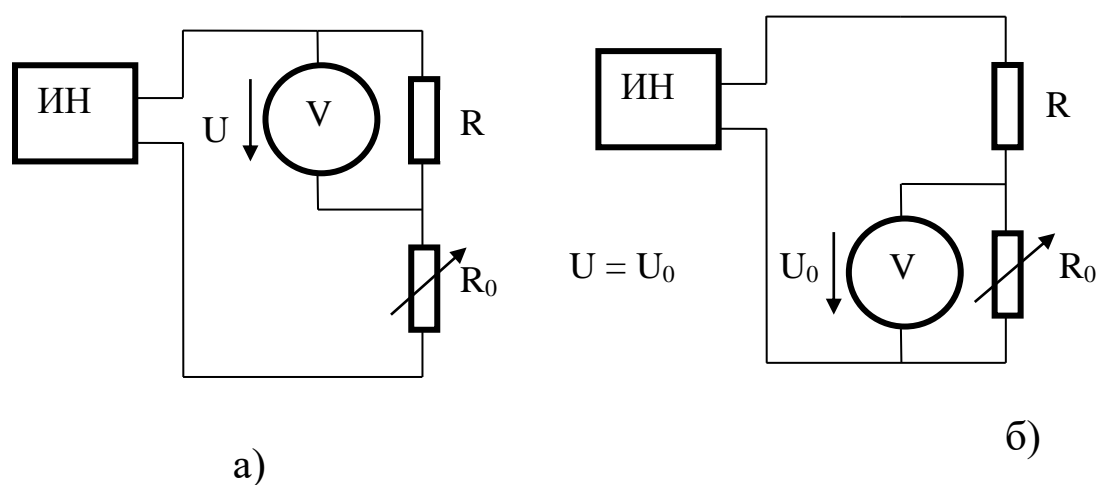


Рис. 8

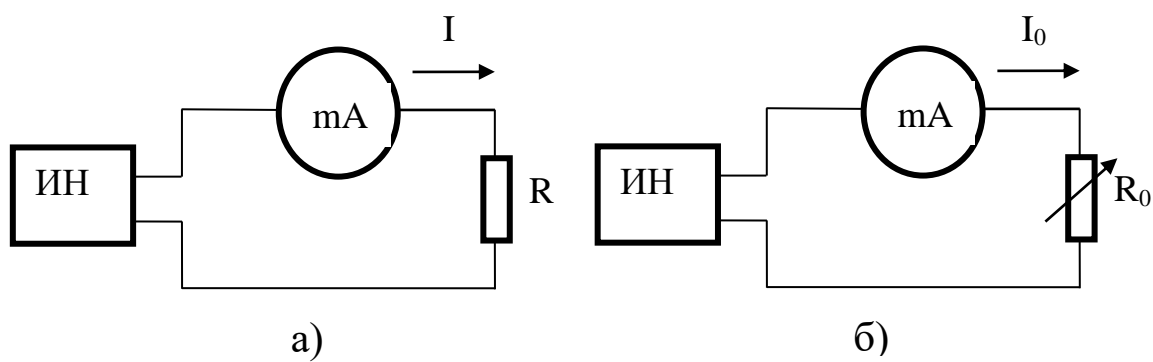


Рис. 9

Схемы на рис. 8 и 9 соответствуют методу замещения: изменяя R_0 добиваются одинаковых показаний вольтметра (рис. 8) или миллиамперметра (рис. 9) в вариантах а) и б).

6. При изменении напряжений и токов мультиметром надо соблюдать осторожность, чтобы не испортить прибор:

СНАЧАЛА установите переключатель мультиметра в нужное положение и только **ПОТОМ** подключайте его.

Если Вы сделаете наоборот, Вы можете сразу испортить прибор. Пусть, например, Вам надо измерить напряжение. Если Вы сначала подключите прибор к источнику напряжения, а потом будете крутить переключатель, то Вы можете при этом пройти через поддиапазоны измерения тока. Через прибор пройдет большой ток, и он будет испорчен.

Если требуемый поддиапазон измерения заранее не ясен, установите переключатель на поддиапазон с **НАИБОЛЬШИМ пределом измерения**, а потом переключайте его на меньшие и остановитесь на оптимальном.

7. Перед тем как вычислять предельные значения абсолютной погрешности измерения надо решить, из каких составляющих они складываются для выбранного Вами способа измерения. В схемах рис. 3 ÷ 7 присутствует инструментальная составляющая погрешности косвенного измерения сопротивления, связанная только с мультиметром, а именно – с погрешностью измерения им токов и напряжений. Для схем рис. 5 ÷ 7 эта инструментальная составляющая связана ещё и с погрешностью наших сведений о значении сопротивления R_0 , т.е. с погрешностью магазина сопротивлений. Для схем рис. 8 и 9 инструментальная составляющая погрешности измерения по методу замещения – это только погрешность магазина сопротивлений R_0 . Предельные значения погрешности измерения токов и напряжений мультиметром можно найти по его метрологическим характеристикам (Приложение 1). Погрешность магазина сопротивления определяется его классом точности. Магазины сопротивления Р33 и Р32

имеют класс точности 0,2 и он соответствует предельным значениям основной *относительной* погрешности $\pm 0,2 \%$.

Кроме инструментальной составляющей погрешности косвенного измерения сопротивления в схемах рис. 3 ÷ 7 присутствует ещё и методическая погрешность, связанная с тем, что выходное сопротивление $R_{\text{и}}$ источника напряжения ИН и сопротивление миллиамперметра $R_{\text{мА}}$ не равны нулю, а сопротивление вольтметра R_{V} не бесконечно велико. Определим для примера инструментальную и методическую составляющие погрешности косвенного измерения сопротивления по схемам рис. 3.

Инструментальная составляющая.

Для формул типа $R = U/I$ (табл. 1) предельные значения инструментальной составляющей удобнее всего найти, суммируя предельные значения относительных погрешностей мультиметра, как вольтметра ($\delta_{\text{V,п}}$) и как миллиамперметра ($\delta_{\text{мА,п}}$):

$$\delta_{\text{п}} = \pm (\delta_{\text{V,п}} + \delta_{\text{мА,п}}); \delta_{\text{V,п}} = \Delta_{\text{V,п}}/U; \delta_{\text{мА,п}} = \Delta_{\text{мА,п}}/I; \Delta_{\text{к,п}} = \delta_{\text{п}}R,$$

где $\Delta_{\text{V,п}}$ и $\Delta_{\text{мА,п}}$ вычисляются по метрологическим характеристикам мультиметра (Приложение 1).

Методическая составляющая.

На рис. 10 источник напряжения ИН представлен эквивалентной схемой, со-

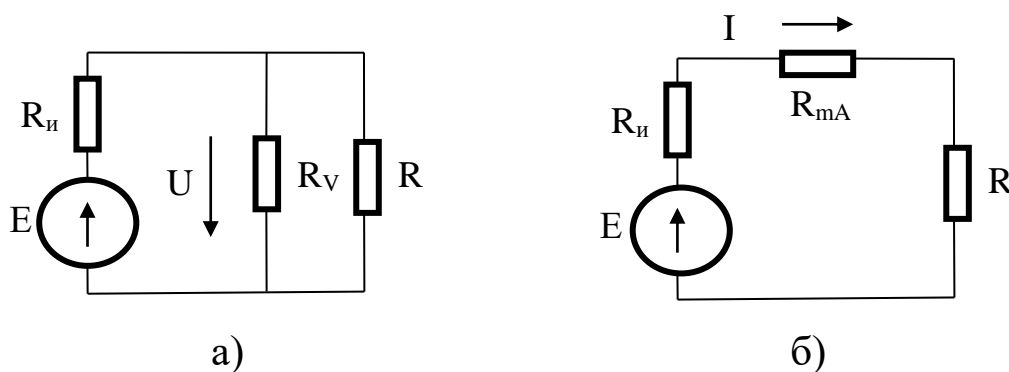


Рис. 10. Эквивалентные схемы, соответствующие рис. 3.

державшей последовательное соединение э.д.с. E и сопротивление $R_{\text{и}}$, вольтметр – сопротивлением R_{V} , миллиамперметр – сопротивлением $R_{\text{мА}}$.

В схеме рис. 10,а

$$U = E \frac{RR_V}{RR_{\text{и}} + R_{\text{и}}R_V + RR_V}, \quad (1)$$

а в схеме рис. 10,б

$$I = \frac{E}{R + R_{\text{и}} + R_{\text{мА}}}. \quad (2)$$

Поделив (1) на (2), получим

$$\frac{U}{I} = R \frac{1 + \frac{R_{\text{и}}}{R} + \frac{R_{\text{мА}}}{R}}{1 + \frac{R_{\text{и}}}{R} + \frac{R_{\text{и}}}{R_V}} \quad (3)$$

При $R_{\text{мА}}/R \ll 1$; $R_{\text{и}}/R \ll 1$ и, тем более $R_{\text{и}}/R_V \ll 1$, пользуясь свойствами малых величин и пренебрегая величинами второго порядка малости, вместо (3) получим

$$\frac{U}{I} \approx R \left(1 + \frac{R_{\text{мА}}}{R} - \frac{R_{\text{и}}}{R_V} \right) \quad (4)$$

Таким образом, значение сопротивления, вычисляемое по формуле $R = U/I$ после измерения U и I по схемам рис. 3, т.е. косвенно *измеренное* значение определяется левой частью (4), а *действительное* значение – это R в этой формуле. Это значит, что относительная методическая погрешность косвенного измерения

$$\delta_{\text{м}} = \frac{R_{\text{мА}}}{R} - \frac{R_{\text{и}}}{R_V} = 100 \left(\frac{R_{\text{мА}}}{R} - \frac{R_{\text{и}}}{R_V} \right), \% \quad (5)$$

Реально R_V составляет около 1 МОм, $R_{\text{и}}$ – около 100 Ом, и $R_{\text{мА}} < R_{\text{и}}$. Поскольку $R_V \gg R$, второе слагаемое в скобках в правой части (5) много меньше первого, и значит можно считать, что

$$\delta_{\text{м}} = 100R_{\text{мА}}/R, \%$$

а абсолютная методическая погрешность

$$\Delta_{\text{м}} = R_{\text{мА}}.$$

При известном значении R_{mA} можно исключить методическую погрешность внесением поправки и получить исправленный результат косвенного измерения:

$$R_{к, \text{испр}} = U/I - R_{mA}. \quad (6)$$

В документации мультиметра М-832 сведений о R_{mA} нет, но значение R_{mA} можно определить экспериментально (рис. 11):

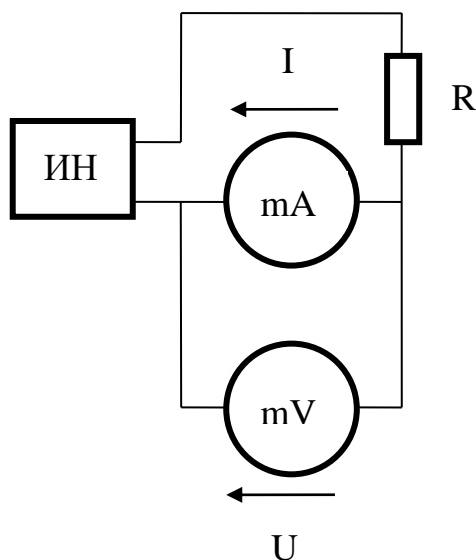


Рис. 11. Схема для определения сопротивления R_{mA} .

Для этой схемы кроме исследуемого мультиметра нужен милливольтметр. Можно использовать такой же мультиметр, попросив его на короткое время у другой бригады и установив на нём самый чувствительный диапазон измерения напряжения постоянного тока.

Аналогично можно получить формулы для инструментальной и методической составляющих погрешности для схем рис. 4 ÷ 7.

Методическая составляющая погрешности измерения сопротивления в схемах рис. 8 и 9 связана с неточным выполнением равенств $U = U_0$ (рис.8) и $I = I_0$ (рис. 9) из-за квантования при цифровом измерении. Предельные значения этой составляющей определяются значением единицы младшего разряда (квантом) соответственно вольтметра q_V и миллиамперметра q_{mA} .

8. Пусть $R_{п}$ – результат прямого измерения сопротивления R , а $R_{к}$ – косвенного. В п. 2 и 7 найдены предельные значения абсолютных

погрешностей прямого $\pm \Delta_{п.п.}$ и косвенного $\pm \Delta_{к.п.}$ измерений. Интервалы ($R_{п.п.} \pm \Delta_{п.п.}$) и

($R_{к.п.} \pm \Delta_{к.п.}$) могут перекрываться, или не перекрываться, или соприкасаться. Подумайте, пожалуйста, сами, какой (какие) из этих вариантов не противоречит (не противоречат) метрологическим характеристикам мультиметра, по которым были рассчитаны $\Delta_{п.п.}$ и $\Delta_{к.п.}$. После этого останется один шаг до ответа на вопрос, поставленный в п. 8.

Метрологические характеристики цифрового мультиметра М832

Напряжение постоянного тока

Верхний предел диапазона измерения, В	Значение единицы младшего разряда (квант q), мВ	Предельные значения абсолютной погрешности при температуре $18 \div 28 ^\circ\text{C}$
0,2	0,1	$\pm (0,25 \% \text{ от } U + 2q)$
2	1	$\pm (0,5 \% \text{ от } U + 2q)$
20	10	Такие же
200	100	Такие же
1000	1000	Такие же

U –

измеренное значение напряжения

Постоянный ток

Верхний предел диапазона измерения, мА	Значение единицы младшего разряда (квант q), мА	Предельные значения абсолютной погрешности при температуре $18 \div 28 ^\circ\text{C}$
0,2	0,1	$\pm (1,0 \% \text{ от } I + 2q)$
2	1	Такие же
20	10	Такие же
200	100	$\pm (1,2 \% \text{ от } I + 2q)$

I – измеренное значение тока; диапазон $0 \div 10$ А не используется

Сопротивление

Верхний предел диапазона измерения, кОм	Значение единицы младшего разряда (квант q), Ом	Предельные значения абсолютной погрешности при температуре $18 \div 28 ^\circ\text{C}$
0,2	0,1	$\pm (0,8 \% \text{ от } R + 2q)$
2	1	Такие же
20	10	Такие же
200	100	Такие же
2 МОм	1 кОм	$\pm (1,0 \% \text{ от } R + 2q)$

R – измеренное значение сопротивления

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 (факультативное). Принцип действия АЦП

АЦП основан на методе двухтактного интегрирования. Его структурная схема показана на рис. П2.1.

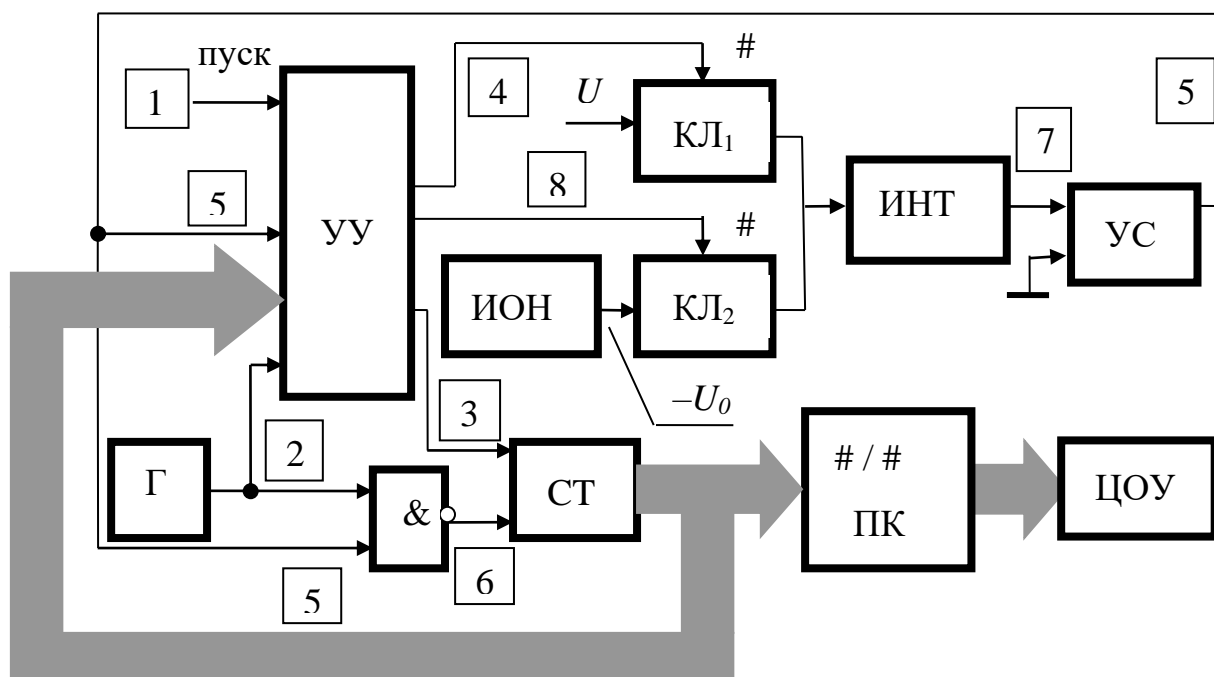


Рис. П 2.1. Структурная схема ПНК.

Обозначения:

Г – генератор прямоугольных импульсов; УУ – устройство управления;

ИОН – источник опорного напряжения; СТ – счётчик импульсов;

& – логический элемент И-НЕ; КЛ₁; КЛ₂ – ключи; ИНТ – интегратор;

УС – устройство сравнения; ПК – преобразователь кода; ЦОУ – цифровое отсчётное устройство.

Цифрами в квадратиках обозначены сигналы в характерных точках схемы; эти же цифры проставлены на рис. П 2.2.

Работа начинается с приходом команды «пуск». Устройство управления УУ улавливает первый фронт сигнала 2 после фронта сигнала 1 (рис. П 2.2), который определяет начало 1^{го} такта – момент t_1 . Управляющим сигналом 4 замыкается ключ КЛ₁ и напряжение постоянного тока U

поступает на интегратор ИНТ. Ключ $KЛ_2$ при этом разомкнут. Пока что будем считать, что напряжение U только положительное. Интегратор инвертирующий, поэтому напряжение на его выходе линейно падает. Вместе с тем в момент t_1 коротким импульсом 3 сбрасывается в исходное состояние счётчик импульсов СТ и он начинает считать фронты сигнала 6, который, начиная с момента t_1 является инверсией сигнала 2. Через половину периода после того, как на счётчике образуется код заданного постоянного числа N_1 (момент t_2) устройство управления УУ заканчивает 1^й такт и начинает 2^й. Сигналом 4 размыкается $KЛ_1$, а сигналом 8 замыкается $KЛ_2$. При этом на интегратор от источни-

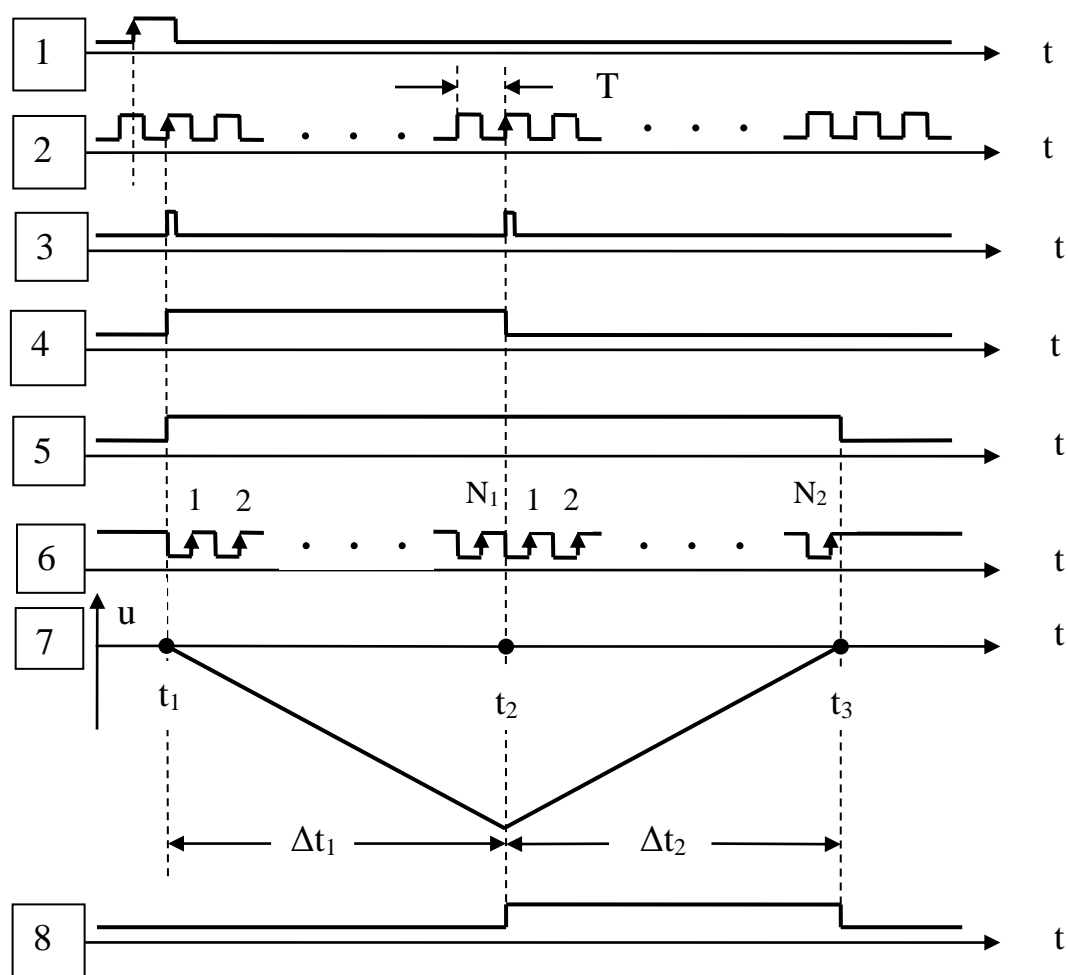


Рис. П 2.2. Временные диаграммы сигналов в характерных точках схемы рис. П 2.1.

ка опорного напряжения ИОН поступает отрицательное напряжение U_0 и напряжение на выходе интегратора линейно возрастает. Вместе с тем в

момент t_2 короткий импульс сигнала 3 снова сбрасывает счётчик, и он по второму разу начинает считать фронты сигнала 6. В момент t_3 выходное напряжение интегратора доходит до нуля. Это улавливает устройство сравнения УС – оно сравнивает это напряжение с нулевым потенциалом. Изменение сигнала 5 воспринимает УУ и оно сигналом 7 размыкает КЛ₂. Кроме того, сигнал 5 через элемент & прекращает изменение сигнала 6. В момент t_3 заканчивается 2-й такт. К этому моменту на счётчике образовался код числа N_2 , выражающий результат преобразования. Преобразователь кода ПК преобразует этот код в другой, необходимый для управления цифровым отсчётным устройством ЦОУ.

Покажем, что число N_2 пропорционально значению измеряемого напряжения U . На интервале $t_1 \leq t \leq t_2$ напряжение на выходе интегратора

$$u(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U dt = -\frac{Ut}{\tau},$$

где τ – постоянная времени интегратора, а при $t = t_2$ соответственно

$$u(t_2) = -\frac{U\Delta t_1}{\tau}.$$

На интервале $t_2 \leq t \leq t_3$

$$u(t) = -\frac{U\Delta t_1}{\tau} + \frac{1}{\tau} \int_{t_2}^t U_0 dt$$

и при $t = t_3$

$$u(t_3) = -\frac{U\Delta t_1}{\tau} + \frac{U_0\Delta t_2}{\tau} = 0.$$

Отсюда $\Delta t_1 U = \Delta t_2 U_0$. Из рис. П 2.2 очевидно, что

$$\Delta t_1 = N_1 T = \frac{N_1}{f} \text{ и } \Delta t_2 = N_2 T = \frac{N_2}{f},$$

откуда

$$N_1 U = N_2 U_0$$

и

$$N_2 = \frac{N_1}{U_0} U,$$

где $N_1 = \text{const}$ и $U_0 = \text{const}$.

Метод двухтактного интегрирования обеспечивает высокую помехозащищённость прибора. Доминирующие помехи обычно имеют частоту сети и её гармоник. В связи с этим длительность 1^{го} такта интегрирования Δt_1 выбирается равной или кратной периоду сетевого напряжения (20 мс). В идеале при точном равенстве или кратности интеграл от синуса за время 1^{го} такта равен нулю, т.е. помеха не отражается на показании прибора.

До сих пор мы считали, что измеряемое напряжение $U > 0$. В действительности АЦП биполярен: он работает и при $U > 0$ и при $U < 0$, причём во втором случае на ЦОУ перед цифрами появляется знак минус. Рис. П 2.3 поясняет принцип обеспечения биполярности.

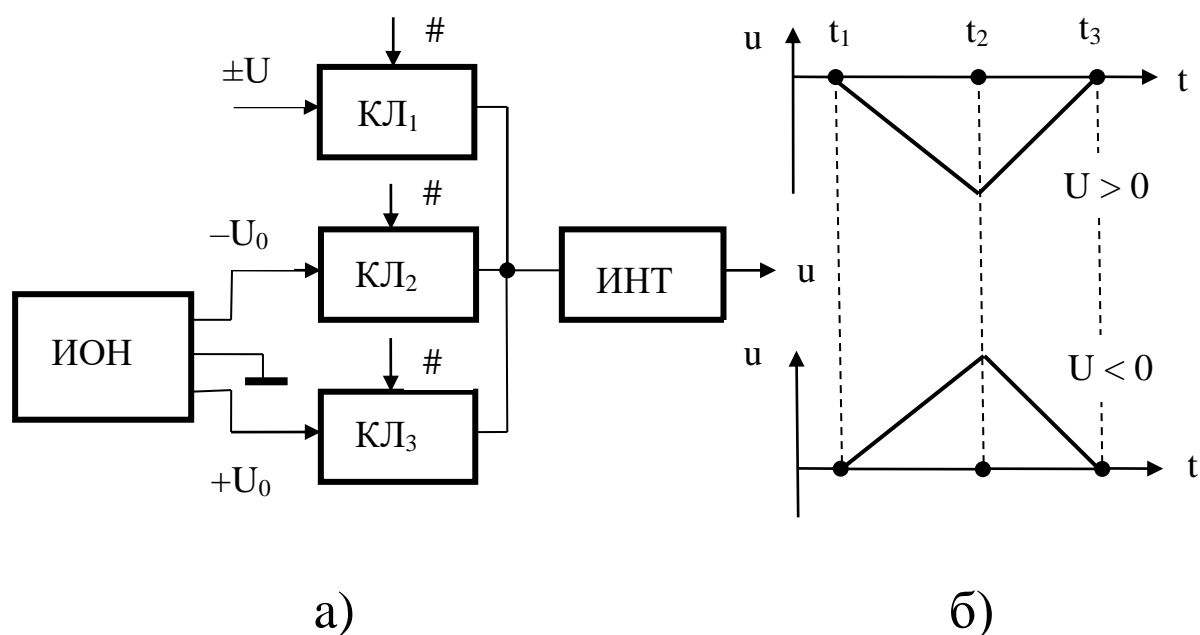


Рис. П 2.3. Принцип обеспечения биполярности цифрового вольтметра:

а) фрагмент структурной схемы; б) временные диаграммы напряжения на выходе интегратора при обеих полярностях.

Если в $1^{\text{м}}$ такте на выходе интегратора $u < 0$, то в момент t_2 замыкается ключ $КЛ_2$, а $КЛ_3$ остаётся разомкнутым и всё происходит так, как было описано выше. Если же $u > 0$, то в момент t_2 замыкается ключ $КЛ_3$, а $КЛ_2$ остаётся разомкнутым и на ЦОУ появляется знак минус.