

В.А. Кунцевич

Измерение параметров напряжения различной формы

Введение

В практике электрорадиоизмерений напряжение является распространенной операцией. При этом определяются разность потенциалов или падение напряжения на участке электрической цепи (на её элементе). В качестве единицы напряжения принимается вольт (В). Целью измерения постоянного напряжения является определение его значения и знака полярности. При измерении переменного напряжения определяется какой-либо его параметр (амплитудное, среднее, среднеквадратическое или средневывпрямленное значения).

Большой интервал (от 10^{-9} до 10^4 В) и широкий диапазон частот (от нулевых до сверхвысоких частот), измеряемых напряжений, малая мощность источников напряжения, а также высокая точность измерения привели к необходимости использования большого количества методов и средств измерения.

Несмотря на кажущуюся простоту измерения напряжения, существует ряд моментов, на которые на практике необходимо обратить внимание. Так, в частности, следует учитывать шунтирующие действие вольтметра при измерении как постоянных, так и переменных напряжений. Более того, при измерении переменных напряжений необходимо учитывать реактивную составляющую входного сопротивления вольтметра, влияние которого на результат растёт с ростом частоты сигнала.

При измерении параметров переменных напряжений необходимо учитывать конструктивные особенности вольтметра. В вольтметрах переменного тока осуществляется преобразование переменного напряжения в постоянное, соответствующее одному из его параметров. Однако, все вольтметры переменного тока, за исключением импульсных, градуируются в среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы.

Таким образом, в вольтметрах переменного тока показываемый параметр переменного напряжения (среднеквадратическое значение) в общем случае не соответствует измеряемому параметру. Это имеет существенное значение при измерениях напряжений, форма которых отлична от синусоидальной. Для определения значения требуемого параметра переменного напряжения необходимо в общем случае знать вид преобразователя вольтметра, форму измеряемого напряжения, а также тип входа вольтметра (открытый или закрытый). Пренебрежение этой информацией приводит, как правило, к существенным погрешностям результата измерения. Рассмотрению особенностей измерения параметров напряжения посвящено настоящее пособие.

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

I.1. Измеряемые параметры напряжения

В зависимости от характера изменений напряжения во времени различают постоянное и переменное напряжение. В свою очередь, переменное напряжение можно разделить на периодическое и непериодическое. Для периодически изменяющегося напряжения его форма может быть произвольна. Обычно на практике измеряют постоянное напряжение и параметры переменного напряжения. Такими параметрами являются: амплитудное, среднее, средневывпрямленное и среднеквадратическое значения напряжения.

Амплитудное (пиковое) значение u_m - наибольшее мгновенное значение напряжения $u(t)$ за время измерения T . Если сигнал – несимметричный, то различают положительное u_m^+ (максимальное) и отрицательное u_m^- (минимальное) значения.

Среднее значение u_{cp} - среднее за время измерения значение напряжения, которое определяется выражением

$$u_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Среднее значение, по существу, является постоянной составляющей сигнала за время T .

Средневыпрямленное значение $u_{cp.с.}$ - среднее за время измерения T значение модуля напряжения:

$$u_{cp.с.} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Среднеквадратическое значение u - корень квадратный из среднего за время измерения квадрата напряжения:

$$u = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Квадрат среднеквадратического значения напряжения можно представить как значение средней мощности, рассеиваемой на сопротивлении 1 Ом.

Из спектрального представления сигналов известно, что квадрат среднеквадратического значения периодического напряжения несинусоидальной формы равен сумме квадратов среднеквадратических значений u_i^2 всех гармоник, включая постоянную составляющую:

$$u^2 = u_{cp}^2 + u_1^2 + u_2^2 + \dots$$

Таким образом, среднеквадратическое значение периодического напряжения несинусоидальной формы не зависит от фазовых соотношений между гармоническими составляющими.

Связь между амплитудным, средним, средневыпрямленным и среднеквадратическим значениями устанавливается через коэффициент амплитуды k_a и коэффициент формы сигнала k_ϕ . Значения коэффициентов k_a и k_ϕ зависят от формы сигнала. Коэффициент амплитуды определяется отношением амплитудного значения напряжения к среднеквадратическому значению:

$$k_a = u_m / u.$$

коэффициент формы определяется отношением среднеквадратического значения напряжения к средневыпрямленному:

$$k_\phi = u / u_{cp.с.}$$

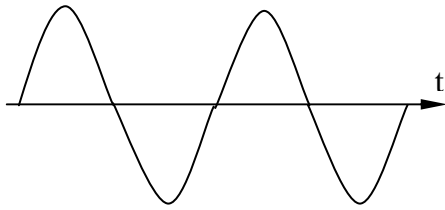
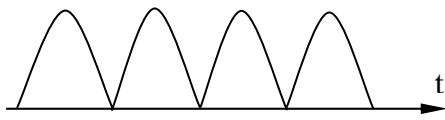
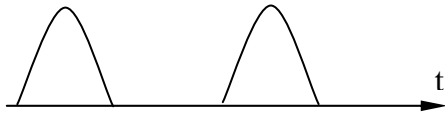
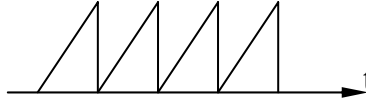
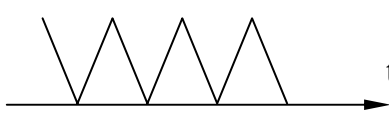
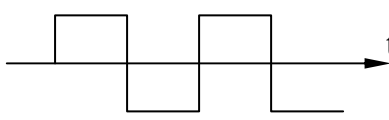
Следовательно, зная коэффициенты k_a , k_ϕ одно из значений напряжения, можно определить другие значения. Значения коэффициентов удовлетворяют следующему неравенству:

$$1 \leq k_\phi \leq k_a.$$

Знак равенства выполняется для напряжения постоянного тока и напряжения формы «меандр». Значения коэффициентов k_a и k_ϕ для различных наиболее употребляемых сигналов представлены в табл. 1. Иногда используется коэффициент усреднения k_y , определяемый отношением амплитудного значения напряжения к средневыпрямленному:

$$k_y = u_m / u_{cp.с.}$$

Таблица 1

Форма сигнала	График	Коэффициент	
		K_a	K_ϕ
Синусоидальная		1,41	1,1
Пульсирующая (двухполупериодный выпрямитель)		1,41	1,11
Пульсирующая (однополупериодный выпрямитель)		2	1,57
Пилообразная		1,73	1,16
Треугольная (симметричная)		1,73	1,16
Прямоугольная (меандр)		1	1

1.2. Методы и средства измерения напряжения

Для измерения постоянного напряжения используется или метод непосредственной оценки, или методы сравнения, в частности нулевой и дифференциальный. Разные методики измерения напряжения требуют различных принципов построения вольтметров. Различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения. Обобщенные структурные схемы этих приборов представлены соответственно на рис. 1 и 2. На рисунках приняты следующие обозначения: $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ - измерительные преобразователи; ОУ - отсчетное (регистрирующее) устройство; УС - устройство сравнения; УУМ - устройство управления мерой; М - управляемая мера; u_x - измеряемое значения напряжения; u_M - значение напряжения, воспроизводимое мерой.

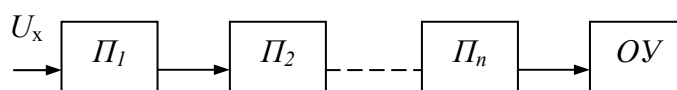


Рис. 1

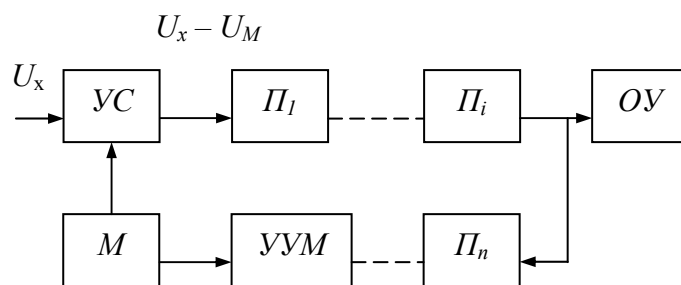


Рис. 2

Основным различием структурных схем является наличие в схеме приборов сравнения цепи обратной связи. Структура подобных приборов является замкнутой, при этом в цепи обратной связи должна формироваться физическая величина, однородная с измеряемой. В качестве измерительных преобразователей могут применяться делители напряжения, катодные, эмиттерные или истоковые повторители, усилительные схемы, преобразователи средневыпрямленных, среднеквадратических и амплитудных значений напряжения, преобразователи напряжений аналог – цифра и цифра – аналог и др.

При использовании приборов непосредственной оценки значение измеряемой величины определяют по отсчётному устройству. Прибор предварительно градуируется с помощью образцовых мер или образцовых измерительных приборов. При нулевом методе в процессе сравнения значений измеряемого напряжения и напряжения, воспроизводимого мерой, добиваются их равенства. Измеряемая величина определяется значением напряжения меры. Таким образом, величина меры должна иметь возможность плавной регулировки. В вольтметрах, использующих дифференциальный метод, в общем случае задача достижения равенства значений измеряемого напряжения и напряжения меры не ставится. В этом случае прибор измеряет разность значений этих напряжений и имеет градуировку в единицах измеряемой величины. Величина меры может быть постоянной или изменяться дискретно.

Согласно ГОСТ 22261-82 средства измерения напряжений относятся к подгруппе В. подгруппа в свою очередь на следующие виды:

- В1 – приборы для установки или проверки вольтметров;
- В2 – вольтметры постоянного напряжения;
- В3 – вольтметры переменного напряжения;
- В4 – вольтметры импульсного напряжения;
- В6 – селективные вольтметры;
- В7 – универсальные вольтметры;
- В8 – измерители отношения напряжений и (или) разности напряжений;
- В9 – преобразователи напряжения.

Помимо деления на виды, вольтметры принято делить на аналоговые и цифровые. В дальнейшем будут рассмотрены вольтметры постоянного и переменного напряжения, цифровые и аналоговые.

1.3. Основные метрологические характеристики вольтметров

Согласно ГОСТ 8.009-84 основными метрологическими характеристиками вольтметров являются:

- 1) цена деления равномерной шкалы или минимальная цена деления неравномерной шкалы;
- 2) пределы шкалы прибора;
- 3) выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда кода средства измерения;

- 4) предел допускаемого значения основной погрешности средств измерений или предел допускаемого значения среднеквадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности;
- 5) предел допускаемого значения дополнительной погрешности или её оставляющих (наибольшее допускаемое изменение погрешности, обусловленное изменением влияющих величин в пределах рабочей области);
- 6) требования к сопротивлению входных цепей;
- 7) требования к электропитанию;
- 8) требования к времени установления рабочего режима и продолжительности непрерывной работы средства измерения;
- 9) требования к электрической прочности и сопротивлению изоляции;
- 10) требования к средству измерения при климатических и механических воздействиях;
- 11) требования к конструкции;
- 12) габаритные размеры;
- 13) требования к надёжности;
- 14) требования к комплектности;
- 15) требования к безопасности.

Перечисленные метрологические характеристики отражаются в технической документации на измерительный прибор. Они используются для оценки погрешностей измерений, производимых в нормальных или рабочих условиях, а также при выборе средств измерения для практического использования.

1.4. Погрешности вольтметров

При измерении напряжения с помощью вольтметров в той или иной степени присутствуют методические, инструментальные и субъективные погрешности. Субъективные погрешности обусловлены индивидуальными особенностями оператора. Причиной появления методической погрешности в общем случае является несовершенство метода измерения. Применительно к измерению напряжения это проявляется во влиянии входных характеристик вольтметра на режим работы цепи, где осуществляется измерение. В некоторых случаях подобное влияние может быть оценено количественно, что позволяет уменьшить методическую погрешность.

Инструментальная погрешность возникает из-за несовершенства средства измерения, а также из-за неточности передачи рабочим средствам измерений размеров единиц соответствующих физических величин. Несовершенство средств измерения включает в себя как разброс параметров составляющих его элементов, так и влияние условий проведения эксперимента на его результат (изменение температуры окружающей среды, влажности воздуха, внешних электрических или магнитных полей, напряжений сетевого питания и т.д.).

Инструментальную погрешность средства измерения принято делить на основную и дополнительную основную погрешностью измерительного прибора называют погрешность, имеющую место в нормальных условиях. Нормальными считаются такие условия, при которых влияющие на метрологические характеристики прибора факторы (температура, влажность, питающее напряжение и т.д.) и неинформативные параметры входного сигнала не превышают заданные значения (нормальные значения). Неинформативными параметрами называют параметры, не связанные с функционально измеряемой величиной, но влияющие на метрологические характеристики средства измерения (период, форма сигнала). Дополнительная погрешность возникает при отличии значений влияющих величин от нормальных значений.

Формы выражения основных и дополнительных погрешностей определены ГОСТ 8.401-80 и ГОСТ 2226-82. пределы допускаемых основных и дополнительных

погрешностей средств измерения могут выражаться как в одинаковой, так и в различной форме.

Для вольтметров применяются следующие стандартные формы выражения пределов допускаемых основных погрешностей:

абсолютная погрешность (в вольтах)

$$\Delta = u_g - u_x = \pm a \quad (6)$$

или

$$\Delta = \pm(a + bu_g);$$

приведенная погрешность (в процентах)

$$\delta_n = \frac{100 \cdot \Delta}{u_x} = \pm p; \quad (7)$$

относительная погрешность (в процентах)

$$\delta_0 = \frac{100 \cdot \Delta}{u_x} = \pm q, \quad (8)$$

или

$$\delta_0 = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{u_k}{u_x} \right| - 1 \right) \right], \quad (9)$$

или

$$\delta_0 = \pm \left(c + \frac{d}{u_x} \right), \quad (10)$$

или

$$\delta_0 = \pm \left(c \pm \frac{u_x}{u_g} \right).$$

В приведённых формулах приняты обозначения: u_k - нормирующее значения напряжения, обычно предельное значение; u_g - показание вольтметра; u_x - действительное значение измеряемой величины; a, b, c, d, p, q – постоянные числа, содержащие не более двух значащих цифр. Числа рекомендуется брать из ряда $(1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8) \cdot 10^n$, где $n = 1, 0, -1, -2, \dots$

Для цифровых вольтметров согласно ГОСТ 14014-82 используются формы выражения пределов допускаемых погрешностей по формулам (6), (9), (10) (табл. 2).

Таблица 2

Формула для предельной основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		на приборе	пример
$\delta_n = \frac{100 \cdot \Delta}{U_k} = \pm p$	$\pm p$	а	1 или 1,5
$\delta_0 = \left[c + d \left(\left \frac{U_k}{U_x} \right - 1 \right) \right]$	$\pm \left[c \pm d \left(\left \frac{U_k}{U_x} \right - 1 \right) \right]$	c/d	0,02/0,01
$\delta_0 = \frac{100 \cdot \Delta}{U_x} = \pm q$	$\pm q$	q	2
$\Delta = \pm a$ $\Delta = \pm(a + bU_x)$	$\pm a$ $\pm(a + bU_x)$	римские цифры или латинские буквы	L

Предел допускаемой основной погрешности вольтметра определяется классом точности этого прибора при применении его в нормальных условиях.

Дополнительные погрешности нормируют в виде допускаемых погрешностей или в виде функции влияния, которые могут быть представлены аналитически, графически или таблично.

Пример. Дополнительная погрешность, определяемая частотой измеряемого сигнала (резонансная погрешность).

Вольтметр подключается к измерительной цепи с помощью соединительных проводов, которые имеют индуктивность L_1 и L_2 , ёмкость C , а также активные сопротивления R_1 и R_2 . Вольтметр имеет входное активное сопротивление $R_{вх}$ и входную ёмкость $C_{вх}$. Эквивалентная схема входной цепи представлена на рис. 3.

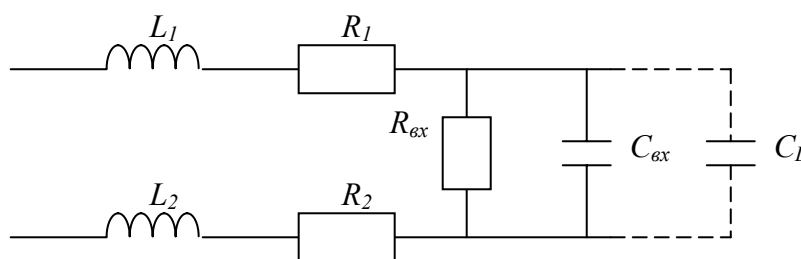


Рис. 3

Это не что иное, как последовательный колебательный контур. При этом резонансная частота этого контура f_0 определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)(C_{вх} + C_L)}} \quad (11)$$

При приближении частоты измеряемого сигнала f к резонансной частоте f_0 подаваемое на вход отсчётного устройства значение напряжения увеличивается. Это приводит к появлению дополнительной погрешности измерения. Нормальная область частот, для которой устанавливаются пределы основной погрешности вольтметра, находится существенно ниже f_0 . Рабочая область частот измеряемых напряжений больше нормальной. Величина дополнительной погрешности задаётся в паспорте на прибор в зависимости от значения частоты в рабочей области частот.

При измерении напряжения имеет место методическая погрешность, вызванная шунтированием входной цепи вольтметра участка электрической цепи, на котором

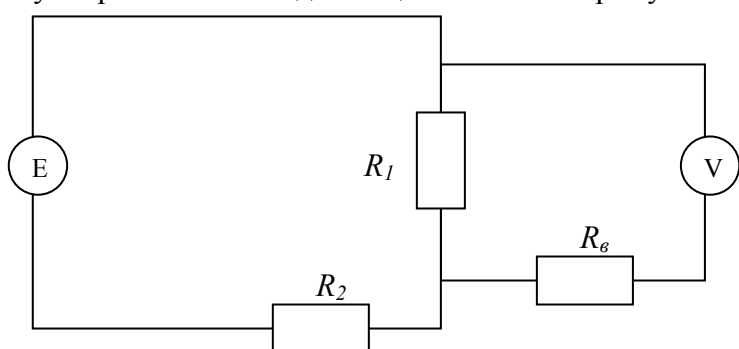


Рис. 4

измеряется падение напряжения. Пусть необходимо измерить падение напряжения на сопротивлении R_1 в цепи, представленной на рис. 4, где $R_вх$ - входное сопротивление вольтметра. Обычно оно задаётся в нормированных единицах, измеряемых в кОм/В, где в качестве нормирующей величины обычно выбирается предельное

значение измеряемого напряжения (на выбранной шкале). Определим погрешность шунтирования, пренебрегая внутренним сопротивлением источника:

$$u_x = u_в \frac{1 + R_1/R_2 + R_1/R_{вх}}{1 + R_1/R_2}; \quad (12)$$

учитывая, что

$$\delta_{ош} = \frac{100(u_g - u_x)}{u_x}, \quad (13)$$

получим

$$\delta_{ош} = -\left[1 - \frac{1 + R_1 / R_2}{1 + R_1 / R_2 + R_1 / R_g}\right] \cdot 100. \quad (14)$$

При $R_1 \gg R_2$

$$\delta_{ош} = \frac{100}{1 + R_g / R_1}. \quad (15)$$

В общем случае погрешность шунтирования определяется соотношением входного сопротивления вольтметра и сопротивлений элементов цепи. Очевидно, что при увеличении входного сопротивления вольтметра относительно сопротивления резистора R_1 , погрешность шунтирования уменьшается. Таким образом, при измерении напряжения необходимо знать хотя бы порядок значения сопротивления элемента цепи, на котором измеряется падение напряжения, и выбирать вольтметр с входным сопротивлением, много большим величины этого сопротивления.

На практике погрешность шунтирования расчётным путём определить затруднительно, так как для этого необходимо знать параметры цепи. Существует приём нахождения погрешности шунтирования методом контрольного измерения. Преобразуем выражение (13), поделив числитель и знаменатель на $(1 + R_1 / R_2)$:

$$u_x = u_g (1 + R_g / R_g), \quad (16)$$

где $R_g = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

Пусть после непосредственного измерения получим величину напряжения u_g . Подключим параллельно вольтметру резистор с сопротивлением, равным входному сопротивлению вольтметра. Величина измеренного напряжения u'_g при этом изменится и согласно (11) будет определяться соотношением

$$u_x = u'_g \left(1 + 2 \frac{R_g}{R_g}\right).$$

Приравняв значения u_x , получим

$$u_g (1 + R_g / R_g) = u'_g \left(1 + 2 \frac{R_g}{R_g}\right).$$

Отсюда

$$\frac{R_g}{R_g} = \frac{u_g - u'_g}{2u'_g - u_g}.$$

Используя выражение (10), получаем

$$\Delta = u_g - u_x = u_g \frac{R_g}{R_g} = -u_g \frac{u_g - u'_g}{2u'_g - u_g}. \quad (17)$$

Полученное выражение позволяет вычислить поправку к результату измерения, устраняющую систематическую ошибку шунтирования.

1.5. Определение погрешностей измерения напряжения

Задача 1. На шкалах вольтметров имеются следующие обозначения классов точности: 0,5; 1; 1; 0,3/0,1. Написать выражения пределов допускаемой погрешности для каждого вольтметра.

Решение 1. Величина 0,5 соответствует предельной приведённой погрешности $\pm 0,5\%$. Если измерение напряжения осуществляется на пределе шкалы u_k В, то предельная абсолютная погрешность Δ определится из выражения

$$\Delta = \frac{0,5 \cdot u_k}{100} \text{ В.}$$

2. Величина 1 определяет предел допускаемой погрешности, где в качестве нормирующего значения выступает длина шкалы прибора.

3. Величина 1 определяет предел относительной погрешности результата измерения. Абсолютная погрешность может быть вычислена с помощью выражения

$$\Delta = \frac{1 \cdot u_k}{100}.$$

4. Величина 0,3/0,1 определяет предел допускаемой погрешности, определяемой выражением

$$\delta_0 = \pm [0,3 + 0,1 \left(\frac{u_k}{u_x} - 1 \right)].$$

Задача 2. Определить возможную погрешность цифрового вольтметра в верхнем пределе измерения и в середине диапазона измерения, если предел допускаемой погрешности прибора выражается формулой

$$\delta_0 = \pm [0,3 + 0,1 \left(\frac{u_k}{u_x} - 1 \right)].$$

Ответ:

$$\delta_0 = \pm [0,3 + 0,1 \left(\frac{1}{1} - 1 \right)] = \pm 0,03\%;$$

$$\delta_0 = \pm [0,3 + 0,1 \left(\frac{2}{1} - 1 \right)] = \pm 0,04\%.$$

Таким образом, предел относительной погрешности измерения возрастает с уменьшением измеряемой величины.

Задача 3. Напряжение измеряется двумя вольтметрами. Один имеет предел измерения 20 В и класс точности 2,0; другой – соответственно 100 В и класс точности 1,0. Показание какого вольтметра точнее, если первый вольтметр показал 18 В, а второй – 18,5 В?

Решение. Допускаемые абсолютные погрешности измерения первым и вторым вольтметрами равны

$$\Delta_1 = \frac{2 \cdot 20}{100} = 0,4 \text{ В};$$

$$\Delta_2 = \frac{1 \cdot 100}{100} = 1 \text{ В.}$$

Показания первого вольтметра точнее.

Задача 4. На резисторе $R_1=50$ кОм (рис. 4) вольтметром с нормированным входным сопротивлением 20 кОм/В измеряется напряжение около 20 В. Класс точности прибора $\alpha=1,5$. Пределы измерения 30, 60, 150 В. Необходимо определить на каком пределе следует производить измерение.

Решение. Определим на каждом из пределов максимальную относительную погрешность δ_{Σ} , складывающуюся из погрешности, задаваемой классом точности, и погрешности шунтирования.

1. Предел 30 В. Относительная погрешность, определяемая классом точности вольтметра определяется как

$$\delta_0 = \frac{\Delta}{u_x} 100 = \frac{\alpha \cdot u_k \cdot 100}{100 \cdot u_x} = \frac{1,5 \cdot 30}{20} = 2,25\%.$$

Погрешность шунтирования вычислим при условии $R_2 \gg R_1$ по формуле (9), учитывая, что $R_{ex} = 20 \cdot 30 = 600$ кОМ:

$$\delta_{ои} = \frac{100}{1 + 600/50} = 7,67\%.$$

Тогда $\delta_{\Sigma} = 7,67\% + 2,25\% = 9,9\%$.

2. Предел 60 В. Относительная погрешность

$$\delta_0 = \frac{1,5 \cdot 60}{20} = 4,5\%;$$

погрешность шунтирования

$$\delta_{ои} = \frac{100}{1 + 1200/50} = 4\%;$$

где $R_{ex} = 20 \cdot 60 = 1200$ кОМ. Тогда $\delta_{\Sigma} = 4\% + 4,5\% = 8,5\%$.

3. Предел 150 В. Относительная погрешность

$$\delta_0 = \frac{1,5 \cdot 150}{20} = 11,25\%;$$

погрешность шунтирования

$$\delta_{ои} = \frac{100}{1 + 3000/50} = 1,64\%;$$

Тогда $\delta_{\Sigma} = 11,25\% + 1,6\% = 12,9\%$.

В результате, минимальная общая относительная погрешность измерения будет на пределе 60 В. Она равна 8,5%. Можно уменьшить эту ошибку путём исключения систематической погрешности шунтирования (17). При этом два измерения необходимо производить на шкале с наименьшей погрешностью, определяемой классом точности прибора. Это шкала 30 В.

Задача 5. Универсальным вольтметром с характеристиками, приведёнными в задаче 4, измерено постоянное напряжение на резисторе $R_1 = 50$ кОм ($R_2 \gg R_1$). На пределе 30 В прибор показал $u_6 = 19$ В, а на пределе 60 В - $u_6 = 19,7$ В. определить, какое измерение выполнено с меньшей общей погрешностью.

Решение. Из решения задачи 4 видно, что минимальная погрешность измерения на пределе 60 В меньше, чем на пределе 30 В, следовательно, результат измерения на этом пределе (19,7 В) более точен, чем полученный результат на пределе 30 В.

2. ВОЛЬТМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Аналоговые вольтметры непосредственной оценки

Структурная схема аналогового вольтметра постоянного тока непосредственной оценки представлена на рис. 5, где приняты следующие обозначения: ВУ – входное устройство, ИМ – Измерительный механизм, П – преобразователь, ОУ – отсчётное устройство. Входное устройство и измерительный преобразователь преобразуют

измеряемую величину u_x в некоторую промежуточную, воздействующую на измерительный механизм.

В качестве измерительного механизма могут быть использованы магнитоэлектрические, электромагнитные или электростатические приборы. В вольтметрах, используемых для радиоизмерений, применяют, как правило, магнитоэлектрические измерительные механизмы. Эти механизмы обладают высокой чувствительностью (существуют приборы с отклонением стрелки на всю шкалу при токе $0,1 - 0,01$ мкА). Класс точности магнитоэлектрических приборов может быть не хуже $0,1$, а в некоторых случаях – и $0,05$.

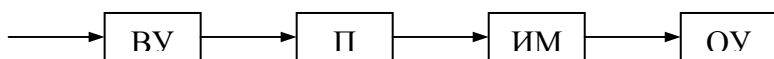


Рис. 5

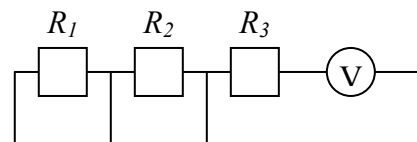


Рис. 6

Простейшим вольтметром непосредственной оценки является прибор, использующий магнитоэлектрический механизм с последовательно соединённым добавочным резистором. Схема подобного вольтметра на несколько пределов измерения представлена на рис. 6. Добавочные резисторы необходимы для преобразования измеряемого напряжения в пропорциональный ему ток, необходимый для работы ИМ. Значение сопротивления R для измерения напряжения u_x определяется по формуле

$$I_0 = u / (R_M + R),$$

где I_0 - ток полного отклонения, R_M – сопротивление измерительного механизма. Для приведённой на рис. 6 схемы в качестве R необходимо брать R_1 , $R_1 + R_2$ или $R_1 + R_2 + R_3$. При этом для каждого R пределы измерения напряжений различны.

Погрешность измерения складывается из погрешности измерительного механизма и погрешностей добавочных резисторов.

Вольтметры, построенные по схеме рис. 5, имеют равномерную шкалу, обладают большой чувствительностью, достаточно высокой точностью и широким диапазоном измеряемых величин (от микровольт до тысяч вольт). Однако существенным недостатком подобных вольтметров является их низкое входное сопротивление.

Подобного недостатка не имеют электронные вольтметры. Электронные вольтметры строятся по структурной схеме, представленной на рисунке 7, где в качестве измерительного преобразователя используется усилитель постоянного тока. Для повышения входного сопротивления используют катодный, эмиттерный или истоковый повторитель. К усилителям постоянного тока предъявляются такие требования, как высокая линейность амплитудной характеристики, постоянство коэффициента усиления, малый температурный и временной дрейфы нуля. С целью удовлетворения перечисленным требованиям применяют мостовые балансные схемы. Однако

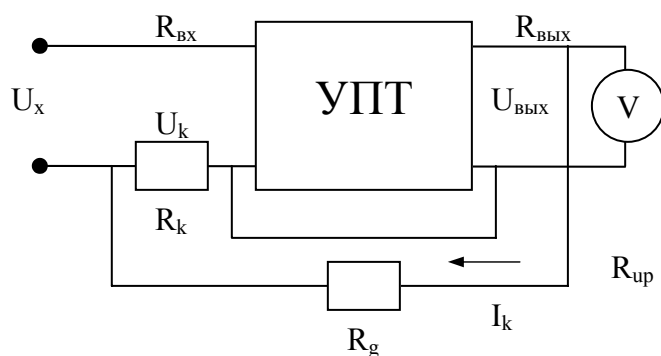


Рис. 7

удовлетворить этим требованиям в полной мере на практике не удаётся. Так, нестабильность нулевого уровня приводит к уменьшению чувствительности электронных вольтметров. В целом электронные вольтметры, обладая общим входным сопротивлением (до сотен мегаом), не обеспечивают высокой чувствительности и точности измерений (погрешность $1,5 - 2,5\%$).

Большая чувствительность и

высокая точность при большом входном сопротивлении достигаются в автокомпенсационных вольтметрах. Структурная схема автокомпенсационного вольтметра с компенсацией напряжения приведена на рис. 7. Она содержит прямую и обратную цепи. На вход усилителя постоянного тока УПТ поступает напряжения $\Delta u_{\text{вх}}$, равное разности измеряемого напряжения u_x и компенсирующего напряжения u_k . Таким образом, $\Delta u_{\text{вх}}$ является напряжением некомпенсации. Величина компенсирующего напряжения определяется величиной $u_{\text{вых}}$ и коэффициентом передачи цепи обратной связи β :

$$u_k = \beta \cdot \Delta u_{\text{вых}}.$$

Но в тоже время напряжение $u_{\text{вых}}$ определяется коэффициентом передачи прямой цепи K и величиной напряжения некомпенсации $\Delta u_{\text{вх}}$:

$$u_{\text{вых}} = K \Delta u_{\text{вх}}; \Delta u_{\text{вх}} = u_x - u_k;$$

$$u_k = \beta \cdot K \cdot \Delta u_{\text{вх}};$$

$$u_x = u_k + \Delta u_{\text{вх}} = \Delta u_{\text{вх}} = \Delta u_{\text{вх}} (1 + K\beta).$$

Коэффициент передачи автокомпенсатора K_a определяется по формуле

$$K_a = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{K \Delta u_{\text{вх}}}{\Delta u_{\text{вх}} (1 + K\beta)} = \frac{K}{1 + K\beta}.$$

Погрешность автокомпенсационного вольтметра, таким образом, будет определяться нестабильностью коэффициентов передачи прямой и обратной цепи. Определим относительную погрешность измерения δ_a :

$$\Delta K_a = \left| \frac{\partial K_a}{\partial K} \right| \Delta K + \left| \frac{\partial K_a}{\partial \beta} \right| \Delta \beta = \frac{\Delta K}{(1 + K\beta)^2} + \frac{K \Delta \beta}{(1 + K\beta)^2};$$

$$\delta_a = \frac{\Delta K_a}{K_a} = \frac{\delta K}{1 + K\beta} + \frac{\delta_\beta \cdot K\beta}{1 + K\beta}.$$

Приведённое выражение позволяет сделать вывод, что в автокомпенсационном вольтметре погрешность из-за нестабильности коэффициента усиления уменьшается в $(1 + K\beta)$ раз.

Достоинством автокомпенсационных вольтметров является их высокая чувствительность – $(1 \cdot 10) \cdot 10^{-9}$ В, достаточно широкий динамический диапазон (от единиц нановольт до 1 В). точность измерения при этом достигает 0,5 – 1%.

2.2. Аналоговые вольтметры, использующие метод сравнения

Измерение напряжения вольтметрами непосредственной оценки позволяет получить результат с погрешностью $\sim 0,1\%$. Более точный результат может быть достигнут с помощью вольтметров, использующих метод сравнения.

При построении вольтметров на нулевом методе (метод полной компенсации измеряемого напряжения напряжением меры), называют потенциометрами. Упрощённая структурная схема потенциометра, использующего компенсацию напряжения, представлена на рис. 8. измеряемое напряжение u_x компенсируется напряжением u_k . напряжение u_k противоположно по знаку u_x . При равенстве напряжений ток, протекающий через индикатор, равен нулю. Напряжение u_k регулируется путём изменения образцового резистора R_k : $u_k = I R_k$. При неизменном токе I величину измеряемого сопротивления R_k (потенциометр) можно проградуировать в единицах измеряемого напряжения.

При полной компенсации измеряемого напряжения ($u_k \rightarrow u_x$) ток во входной цепи стремится к нулю, входное сопротивление вольтметра приближается к бесконечности. В этом случае можно говорить об измерении ЭДС. Потенциометры являются наиболее точными приборами измерения напряжения. Потенциометры постоянного тока выпускаются различных классов точности – от 0,2 до 0,0005.

В зависимости от сопротивления измерительной цепи потенциометры делят на низкоомные и высокоомные. Низкоомные (сопротивление до 1000 Ом) применяют для измерения малых напряжений (до 100 мВ). Высокоомные потенциометры (сопротивление более 1000 Ом) применяют для измерения напряжений до 1 – 2,5 В.

Потенциометры (вольтметры) бывают неавтоматические, полуавтоматические и автоматические. В автоматических потенциометрах весь процесс компенсации осуществляется автоматически.

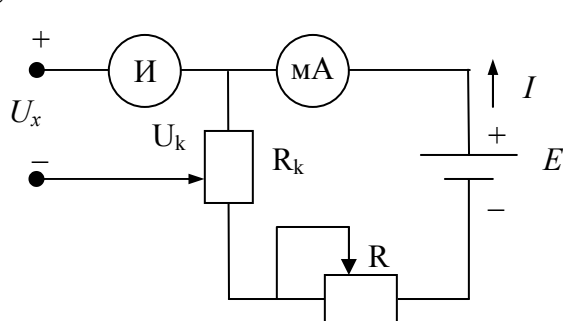


Рис. 8

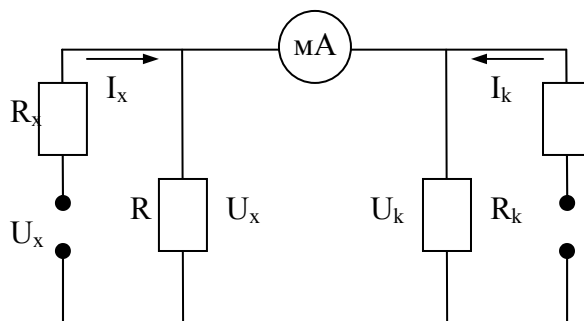


Рис. 9

Упрощенная схема дифференциального вольтметра показана на рис. 9. В этом случае не происходит полной компенсации измеряемого напряжения. Микровольтметр измеряет разность между измеряемым напряжением u_x и уравнивающим напряжением u_k . Уравнивающее (компенсирующее) напряжение образуется с помощью образцового источника ЭДС $E_{обр}$ и ступенчатого делителя напряжения R_k . Измеряемое напряжение определяется величиной u_k и некомпенсированной величиной напряжения, измеряемой вольтметром непосредственной оценки.

Дифференциальный метод измерения используется в некоторых цифровых вольтметрах. Подобные вольтметры позволяют измерять постоянное напряжение от $5 \cdot 10^{-6}$ до 1000 В с погрешностью, составляющей десятые или сотые доли процента от предела измерения.

Проиллюстрировать уменьшение погрешности дифференциальных вольтметров по сравнению с вольтметрами непосредственной оценки можно следующим примером. Пусть необходимо измерить постоянное напряжение 9,5 В. Имеются вольтметры класса точности 1,5 непосредственной оценки с пределами измерения 10 В; 5 В; 0,1 В. Предельная погрешность измерения для каждого предела определяется по формуле (6) и соответственно равна 0,15 В; 0,075 В; 0,0015 В. Измерение первым вольтметром приводит к предельной погрешности 0,15 В. Допустим, что имеются образцовые источники напряжения 5 В и 10 В. Тогда, подключив последовательно и встречно с источником измеряемого напряжения первый образцовый источник, можно воспользоваться вторым вольтметром. Предельная погрешность измерения будет 0,075 В. Подобное измерение третьим вольтметром с использованием второго образцового источника напряжения позволяет получить результат с еще меньшей предельной погрешностью, а именно - 0,0015 В (без учета погрешности источника образцового напряжения).

В приведенном примере используется неполная компенсация измеряемого напряжения. При этом, чем меньше некомпенсированная (измеряемая) часть напряжения, тем с меньшей погрешностью можно получить результат измерения приборами одинакового класса точности.

Сравнение аналоговых вольтметров показывает, что простейшие вольтметры непосредственной оценки на основе магнитоэлектрического прибора (см. рис. 5) позволяют измерять напряжения в больших пределах с удовлетворительной чувствительностью. Недостатком подобных вольтметров является низкое сопротивление (единицы - сотни килоом). Электронные вольтметры обладают существенно большим входным сопротивлением (единицы - десятки мегаом), но имеют малую чувствительность, что не позволяет измерять малые напряжения.

В отличие от вольтметров непосредственной оценки вольтметры, использующие метод сравнения, обладают значительно большей точностью. Наиболее точным вольтметром является потенциометр (вольтметр). Он позволяет измерять малые величины напряжения при теоретически бесконечном входном сопротивлении. Недостатком потенциометров является невозможность измерения больших (более 1 - 2 В) напряжений. Дифференциальные вольтметры позволяют измерять напряжения в несколько большем диапазоне. Однако они имеют меньшую чувствительность, точность и входное сопротивление, чем потенциометры.

2.3. Цифровые вольтметры

Цифровые вольтметры предназначены для измерения напряжения постоянного (или переменного) тока. Они автоматически вырабатывают дискретные сигналы измерительной информации, представленные в цифровой форме. Современные цифровые вольтметры обладают высокой точностью, большим быстродействием, возможностью использования в автоматических системах и измерительно-вычислительных комплексах.

В цифровых вольтметрах используются те же методы измерения напряжения, что и в аналоговых вольтметрах. Формально структурная схема цифрового вольтметра отличается от соответствующей структурной схемы аналогового вольтметра наличием после входного устройства аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Отсчетное устройство является цифровым.

Из множества АЦП в цифровых вольтметрах нашли применение: преобразователь «напряжение – временной интервал – цифровой код», время-импульсный преобразователь интегрирующего типа, преобразователь «напряжение – частота – цифровой код», которому в силу особенностей измерения частоты также относится к АЦП интегрирующего типа. На практике встречаются цифровые вольтметры с АЦП поразрядного уравнивания. Преобразователи интегрирующего типа используются в большинстве современных цифровых вольтметров. При этом вольтметр измеряет среднее значение напряжения за период интегрирования, что позволяет при соответствующем выборе периода интегрирования подавить напряжение аддитивных помех, присутствующих в исследуемом сигнале. Действительно, если напряжение, поданное на вход вольтметра постоянного тока, обозначить $u_{ex}(t)$, измеряемое напряжение - u_x , а аддитивную помеху с нулевым средним $u_{II}(t)$, то

$$u_{ex}(t) = u_x(t) + u_{II}(t).$$

Вольтметр средних значений измеряет u_{cp}^T :

$$u_{cp}^T = \frac{1}{T} \int_0^T [u_x + u_{II}(t)] dt = u_x + \frac{1}{T} \int_0^T u_{II}(t) dt.$$

Если $u_{II}(t)$ – периодический сигнал (например, помеха промышленной частоты 50 Гц), то при T , кратном периоду помехи, интеграл равен нулю. Даже в случае, если помеха является случайной с нулевым средним, то выбором T (больше интервала корреляции) второе слагаемое можно сделать пренебрежимо малым.

Вольтметры с АЦП неинтегрирующего типа (преобразователь «напряжение – временной интервал – цифровой код») измеряют мгновенное значение напряжения. Таким образом, при наличии помехи результат измерения может существенно отличаться от истинного значения.

АЦП «напряжение – временной интервал – цифровой код». Структурная схема и временный диаграммы, поясняющие принцип работы, приведены на рис. 10, а и б соответственно. На схеме приняты обозначения: $СС_I$ и $СС_{II}$ – схемы сравнения, ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения, ФТ – формирователь временного

интервала, ВС – временной селектор, Г – генератор счётных импульсов, СЧ – счётчик импульсов, ОУ – отсчётное устройство, БУ – блок управления.

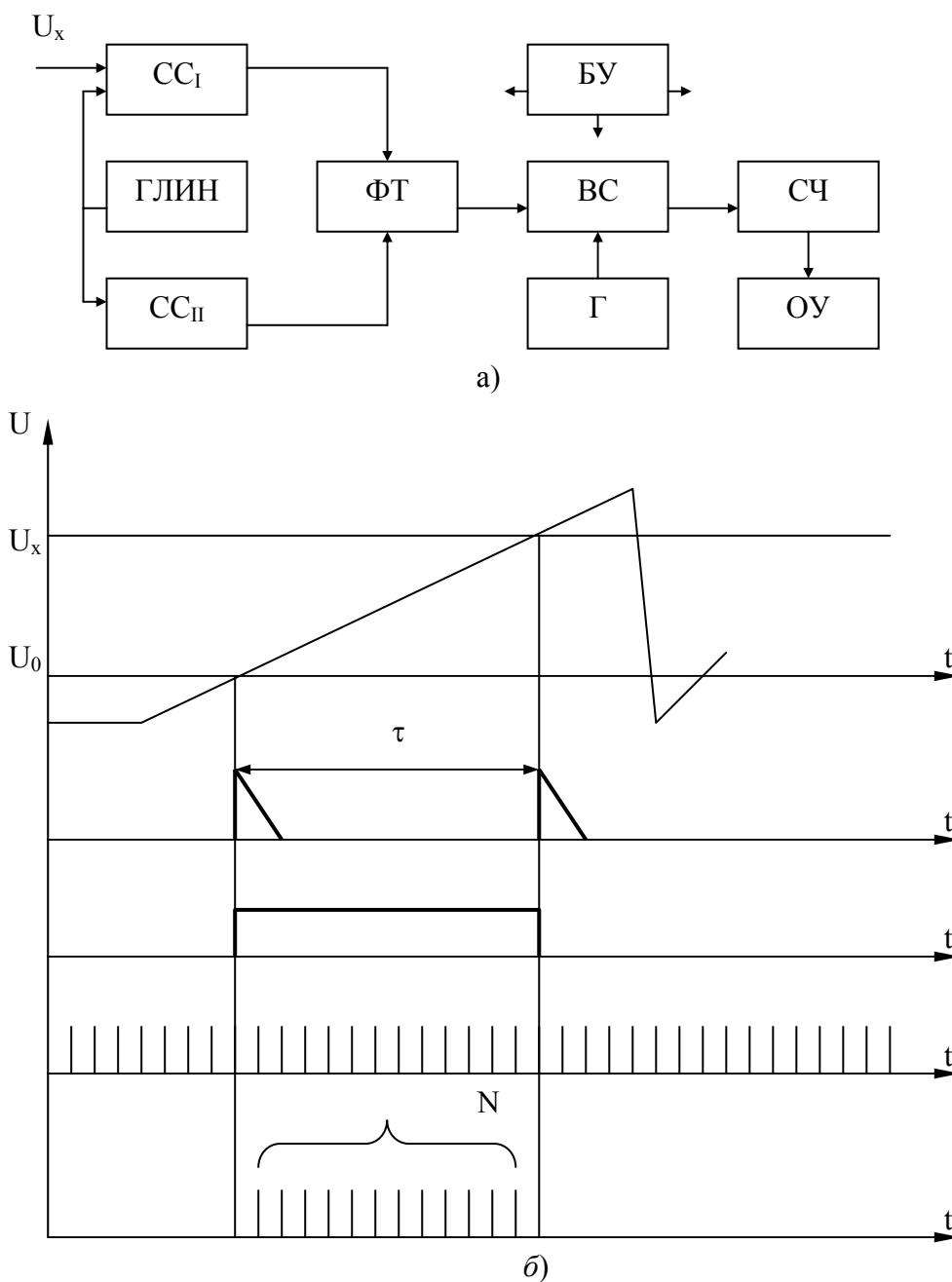


Рис. 10

АЦП работает следующим образом. Напряжение с генератора линейно изменяющегося напряжения подаётся на две схемы сравнения, где сравнивается с нулевым напряжением (начало интервала времени) и с измеряемым напряжением (конец интервала времени). Импульсы начала и конца соответствующего интервала подаются на формирователь, формирующий импульс, длительность T_x которого пропорциональна величине измеряемого напряжения. На один из выходов временного селектора поступают импульсы с генератора счётных импульсов, которые далее проходят на счётчик, если на второй вход временного селектора воздействует импульс, сформированный формирователем. Количество подсчитанных импульсов m за время T при неизменной

частоте генератора счётных импульсов пропорционально величине измеряемого напряжения.

Основными слагаемыми погрешностей в подобном АЦП являются:

непостоянство угла наклона и нелинейность напряжения, вырабатываемого генератором линейно изменяющегося напряжения;

погрешность сравнения напряжений u_x и u_0 с линейно изменяющимся напряжением;

нестабильность частоты генератора счетных импульсов;

погрешность дискретности, вызванная как несинхронностью начала измеряемого интервала времени T_x и начала появления счетных импульсов, так и в общем случае отсутствием кратности измеряемого периода и периода счетных импульсов;

воздействие напряжения помех на результат измерения.

Устранение последнего недостатка возможно путем включения фильтров на входе АЦП. Однако это приводит как к усложнению конструкции АЦП, так и к увеличению времени измерения.

Цифровые вольтметры, использующие подобные АЦП, имеют погрешность 0,1 - 0,05%. Преимуществом таких АЦП является простота их технической реализации. Это преимущество теряется при повышении требования к точности преобразователя в основном за счет усложнения конструкции ГЛИН.

Время-импульсные АЦП интегрирующего типа. Наибольшее распространение получили АЦП с двойным интегрированием. Структурная схема и временные диаграммы, поясняющие принцип работы приведены на рис. 11, а и б соответственно. На схеме введены дополнительные обозначения: ИНТ - интегратор (например RC), БУ - блок управления.

АЦП работает следующим образом. Блок управления формирует последовательность прямоугольных импульсов с длительностью T_1 , и пауз - длительностью T_2 . В момент появления импульса входное напряжение $u_{вх}$ подается на вход интегратора. Интегрирование напряжения осуществляется за время T_1 . Напряжение на выходе интегратора RC в момент окончания импульса запишется в виде

$$u_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^{T_1} u_{\text{вх}}(t) dt = u_x \frac{T_1}{RC} + \frac{1}{RC} \int_0^{T_1} u_{\text{п}}(t) dt \approx u_x \frac{T_1}{RC}.$$

По окончании импульса заканчивается первый такт интегрирования. В начале такта T_2 от интегратора отключается измеряемое напряжение $u_{\text{вх}}$, и подключается опорное образцовое напряжение $E_{\text{обр}}$ обратной полярности. Во втором такте интегрируется опорное напряжение до момента времени, когда напряжение на интеграторе сравняется с нулем. Длительность второго такта интегрирования T_x пропорциональна величине измеряемого напряжения. Чем больше величина измеряемого напряжения, тем больше длительность второго такта. Действительно, напряжение $u_2(t)$ на выходе интегратора в момент окончания второго такта запишется в виде

$$u_2(t) = \frac{u_x T_1}{RC} - \frac{1}{RC} \int_0^{T_x} E_{\text{обр}} dt = \frac{u_x T_1}{RC} - \frac{E_{\text{обр}} T_x}{RC} = 0.$$

Отсюда

$$u_x = \frac{E_{\text{обр}} T_x}{T_1}.$$

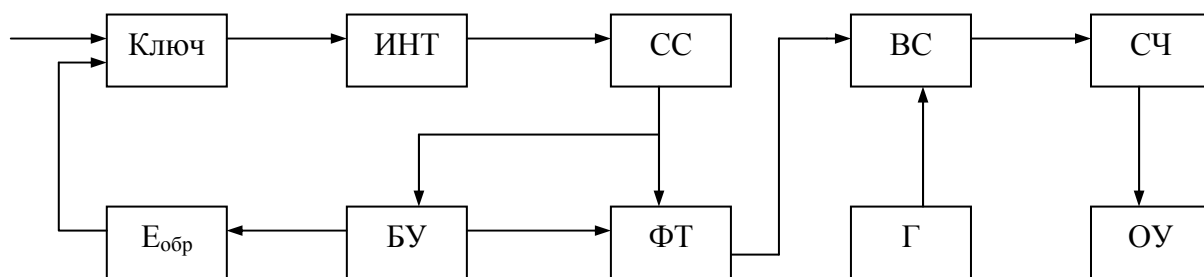
Так как $E_{\text{обр}}$ и T_1 известны, то $u_x = AT_x$, где A – некоторый постоянный коэффициент. Обычно интервал интегрирования T_1 формируются путём заполнения счётчика счётными импульсами до некоторой величины N , которая, например, равна ёмкости счётчика.

Тогда

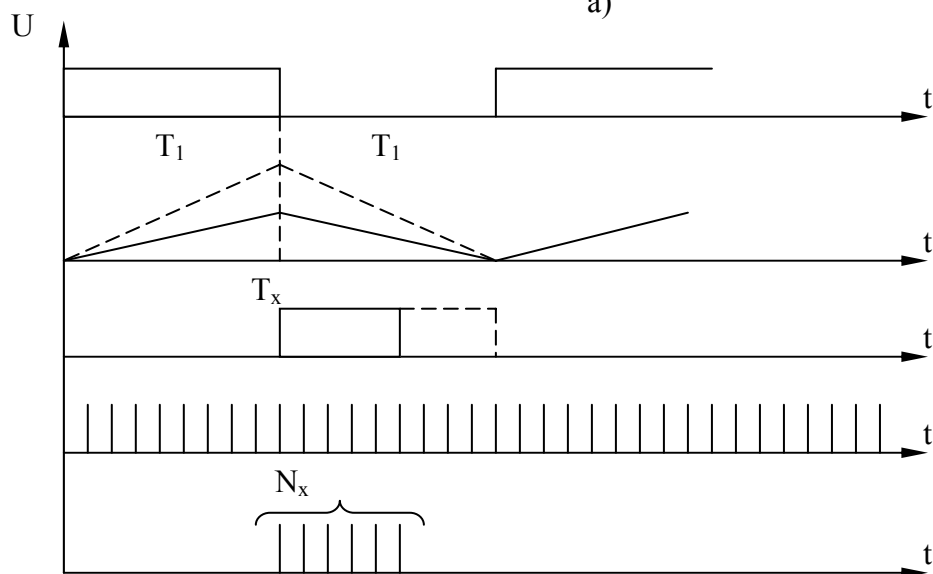
$$T_1 = N\tau,$$

где τ - период следования счётных импульсов;

$$T_x = N_x \tau;$$



а)



б)

Рис. 11

$$u_x = E_{обр} \frac{N_x \tau}{N \tau} = E_{обр} \frac{N_x}{N}.$$

Полученное выражение показывает, что в этом случае результат измерения напряжения не зависит от частоты генератора счётных импульсов. Результат измерения не зависит также от постоянной времени интегратора. Это является одним из основных преимуществ АЦП перед АЦП с генератором линейно изменяющегося напряжения. Другим преимуществом является повышение помехоустойчивости.

Основными слагаемыми погрешности являются:

нестабильность образцового напряжения;

кратковременная нестабильность частоты генератора счетных импульсов;

погрешность дискретности;

погрешность сравнения.

В большинстве современных цифровых вольтметров используется АЦП время-импульсного типа с двойным интегрированием. Погрешность таких цифровых вольтметров может достигать 0,02 - 0,005%. Для поддержания условия кратности периода интегрирования T периоду помехи (50 и 400 Гц) в цифровых вольтметрах используют автоматическую подстройку частоты.

АЦП с преобразованием напряжения в частоту. Несмотря на сравнительную сложность практической реализации, подобные АЦП используются в ряде цифровых вольтметров, а также в дополнительных блоках к электронно-счетным частотомерам. Это позволяет расширить возможности частотомеров и использовать их в качестве вольтметров. Структурная схема и временные диаграммы наиболее часто используемого преобразователя приведены на рис. 12, а и б соответственно, где ПОС - преобразователь обратной связи; УПТ - усилитель постоянного тока, который совместно с R_1 , R_2 и C представляет собой интегратор. Подобный преобразователь называют преобразователем с импульсной обратной связью. Выходная мгновенная частота преобразователя пропорциональна среднему значению напряжения за время интегрирования $T_{инт}$. Однако измеренная частота на интервале измерения $T_{из}$ пропорциональна среднему значению напряжения на этом интервале.

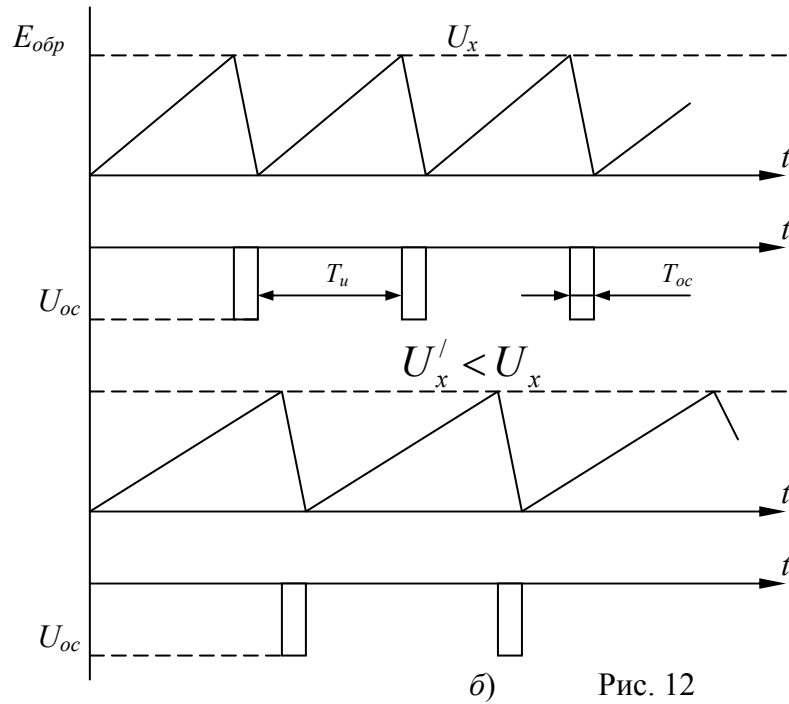
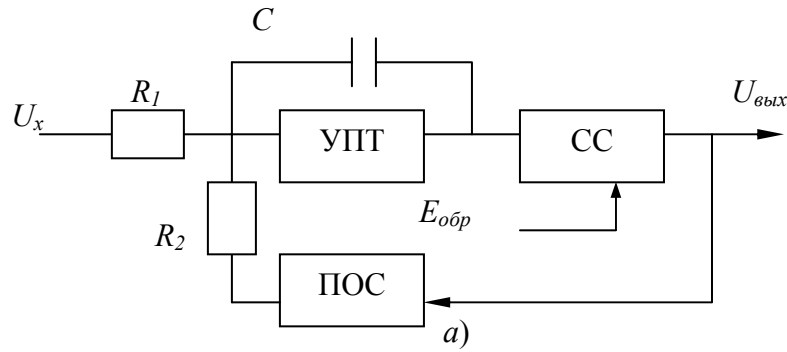


Рис. 12

Преобразователь "напряжение - частота" работает следующим образом. При подаче напряжения u_x на вход интегратора с постоянной времени интегратора R_1C напряжение на выходе интегратора растет. При равенстве этого напряжения и $E_{обp}$ преобразователь обратной связи вырабатывает сигнал, возвращающий интегратор в первоначальное состояние. При постоянном u_x эти операции повторяются периодически. Для процесса нарастания и сброса напряжения на интеграторе можно записать

$$\frac{1}{R_1C} \int_0^{T_u} u_x dt = E_{обp} = \int_0^{T_{oc}} \left(\frac{1}{R_2C} u_{oc} - \frac{1}{R_1C} u_x \right) dt,$$

где u_{oc} - напряжение обратной связи, T_{oc} - времени подачи напряжения обратной связи; если $T_x = T_u + T_{oc}$, то

$$\frac{T_x}{R_1C} u_x = \frac{T_{oc}}{R_2C} u_{oc}.$$

Отсюда

$$f = \frac{1}{T_x} = \frac{R_2 u_x}{R_1 u_{oc} T_{oc}} = A' u_x.$$

Таким образом, при известных R_1 , R_2 , u_{oc} и T_{oc} частота выходного сигнала однозначно определяет измеряемое напряжение. При этом параметры преобразователя не зависят от значений ёмкости C и $E_{обp}$, а определяются отношением и стабильностью величины, которую называют вольт-секундной площадью.

Основными слагаемыми погрешности преобразователя являются нестабильность $u_{oc} \cdot T_{oc}$ и погрешность сравнения. Если рассматривать АЦП в целом, то необходимо ещё учитывать погрешность преобразования частоты в цифровой код, которая состоит из погрешности дискретности и погрешности формирования временного интервала, на котором определяется частота.

Вольтметры, использующие подобные АЦП, позволяют получить погрешность измерения 0,1 – 0,005% и возможность подавления помех.

3. ВОЛЬТМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Принципы построения вольтметров переменного тока

Для измерения параметров напряжения переменного тока могут быть использованы методы, применяемые для измерения напряжения постоянного тока (разд. 2). Структурные схемы цифровых вольтметров переменного тока отличаются от структурных схем аналогичных типов вольтметров постоянного тока наличием измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное.

Для компенсации малой чувствительности отдельных преобразователей используют усилители. Если усилители включают в схему до преобразователя, то они должны обладать широкой полосой частот. После преобразователя используется усилитель постоянного тока. В простейших вольтметрах переменного тока усилители могут отсутствовать.

В вольтметрах переменного тока, использующих метод сравнения (полная или неполная компенсация), перед операцией компенсации обычно осуществляется преобразование переменного измеряемого напряжения в постоянное. Это позволяет применять для компенсации постоянное напряжение, что даёт определённое преимущество, так как для непосредственной компенсации измеряемого переменного напряжения с высокой точностью необходимо иметь переменное компенсирующее напряжение аналогичной формы. Это усложняет прибор и существенно ограничивает его возможности.

Наибольшее распространение на практике имеют электронные вольтметры. Электронные вольтметры непосредственной оценки обычно выполняются по одной из двух структурных схем. Первая схема содержит последовательно соединённые входное устройство, усилитель переменного тока, преобразователь переменного напряжения в постоянное, измеритель постоянного напряжения. Вторая схема состоит из последовательно соединённых входного устройства, преобразователя переменного напряжения в постоянное, усилителя постоянного тока, измерителя постоянного напряжения.

Вольтметры, использующие первую структурную схему, обладают высокой чувствительностью, но сравнительно узким диапазоном частот (2 Гц – 100 МГц). Это объясняется особенностями построения широкополосных усилителей переменного тока. Вольтметры, имеющие вторую структурную схему, отличаются большим частотным диапазоном (20 Гц – 1000 МГц). Недостатком является меньшая чувствительность из-за особенностей работы усилителя постоянного тока.

Частотный диапазон вольтметра определяется не только амплитудно-частотными характеристиками входных цепей, но и особенностями преобразователей. В задачу преобразователя входит преобразование напряжения переменного тока в постоянное, соответствующее измеряемому параметру напряжения. Применяются следующие преобразователи или детекторы: амплитудные (пиковые), средневыпрямленного значения и среднеквадратического значения. При этом в силу конструктивных особенностей преобразователей или особенностей измерения различают преобразователи с закрытым

либо открытым входом. При закрытом входе в результате измерения отсутствует постоянная составляющая измеряемого напряжения.

Преобразователи амплитудных значений (амплитудный или пиковый детектор).

Подобные преобразователи наиболее широко используются вследствие простоты их схемного решения и широкополосности. Они являются самыми широкополосными из известных преобразователей напряжения переменного тока в постоянное напряжение. Схемы амплитудных детекторов с открытым и закрытым входами приведены на рис. 13, а и б соответственно. Принцип действия амплитудного детектора основан на быстром заряде конденсатора C до амплитудного значения измеряемого напряжения через диод с малым прямым сопротивлением R_0^{II} и медленном разряде через сопротивление,

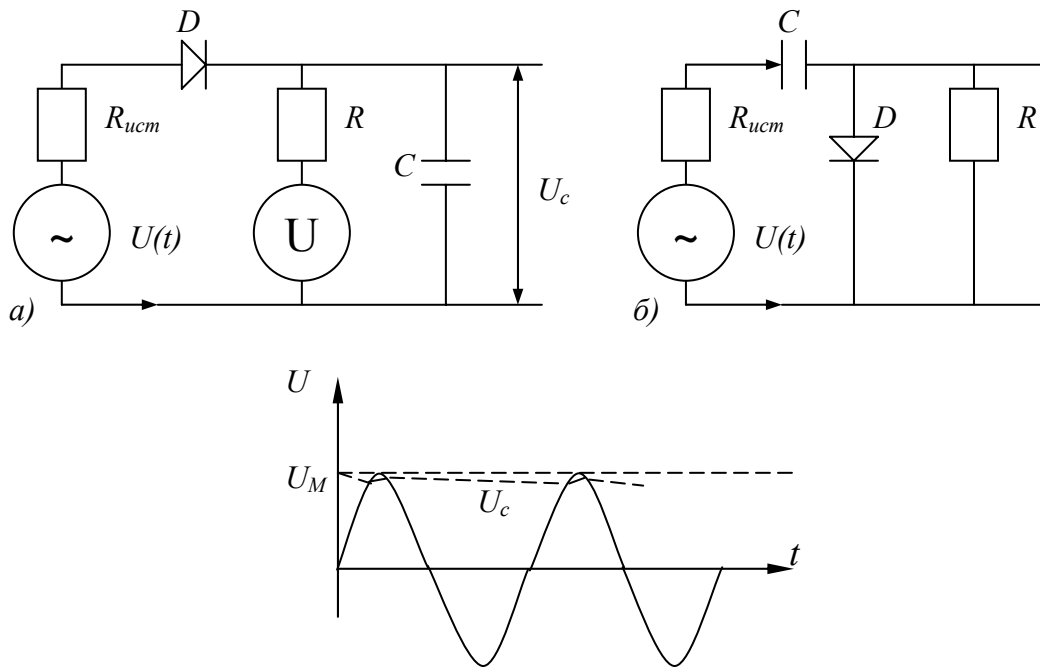


Рис. 13

включающее сопротивление источника R_{uctm} , сопротивление нагрузки детектора R и большое обратное сопротивление диода R_0^{II} .

Амплитудный детектор с открытым входом (Рис. 13, а) работает следующим образом. От источника напряжения с сопротивлением R_{uctm} на вход преобразователя подаётся напряжение $u(t)$:

$$u(t) = u_0 + u_m \sin \omega t.$$

При $u(t) > u_c$ диод открыт (рис. 13, в), и происходит заряд конденсатора. Время заряда τ_3 определяется следующим образом:

$$\tau_3 \approx (R_{uctm} + R_0^{\text{II}})C \text{ при } R \gg R_{uctm} + R_0^{\text{II}}$$

При $u(t) < u_c$ диод закрывается, и начинается разряд конденсатора. Если $R \ll R_{uctm} + R_0^{\text{II}}$, то время разряда $\tau_p \approx RC$. Так как $\tau_3 \ll \tau_p$, то через несколько периодов будет выполняться соотношение

$$u_{cp} \approx u_m + u_0,$$

где u_{cp} – среднее значение напряжения на выходе детектора; на практике

$$u_{cp} < u_m + u_0.$$

Относительную погрешность преобразования можно вычислить по формуле

$$\delta = \frac{u_{cp} - u_m - u_0}{u_m + u_0} = -\frac{T}{2RC} = \frac{1}{2fRC}, \quad (12)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

При этом необходимо иметь в виду, что величина RC не может быть большей, так как при этом увеличивается инерционность вольтметра.

В амплитудном детекторе с закрытым входом (рис. 13, б) диод включён параллельно резистору нагрузки R . При положительной полуволне диод открывается, и заряжается конденсатор C . Время заряда

$$\tau_z = C(R_0 + R_{uct}).$$

При $u_c > u(t)$ диод закрывается, начинается разряд конденсатора. Время разряда

$$\tau_p = C(R + R_{uct}).$$

Так как вход преобразователя закрыт, то $u_c \approx u_m$. Таким образом, вольтметры, использующие амплитудные детекторы с закрытым входом измеряют амплитудное значение без постоянной составляющей. Изображенные на рис. 13 преобразователи амплитудных значений пригодны для измерения положительных пиковых значений. Для измерения отрицательных пиковых значений необходимо поменять полярность включения диодов.

Амплитудные детекторы с закрытым и открытым входами применяются в универсальных и высокочастотных вольтметрах. Погрешность измерения зависит от частоты. Выражение (7) показывает, что погрешность увеличивается с уменьшением частоты. Это выражение позволяет определить нижнее значение рабочей частоты.

Верхнее значение рабочей частоты ограничено паразитными параметрами и выбирается значительно ниже резонансной частоты, определяемой выражением (6). Обычно верхняя рабочая частота вольтметра ограничивается частотами

$$f \leq (0,3 \div 0,5)f_0.$$

Для повышения величины f_0 применяют выносные детекторы с электровакуумными диодами. Применение выносных детекторов позволяет уменьшить паразитные параметры входных цепей. Электровакуумные диоды имеют меньшую ёмкость и большее обратное сопротивление. Однако дальнейшее увеличение частоты приводит к появлению пролётной погрешности. В этом случае период измеряемого напряжения становится соизмеримым с временем пролёта электронов между электродами диода. Относительная величина пролётной погрешности δ_{II} может быть определена по формуле

$$\delta_{II} = -kdf / \sqrt{u_m},$$

где d – расстояние между анодом и катодом, f – рабочая частота, k – коэффициент, зависящий от конструкции диода. Резонансная погрешность приводит к увеличению результата измерения, а пролётная погрешность к его уменьшению.

Для повышения чувствительности вольтметров, использующих амплитудные детекторы, применяют усилители постоянного тока (обычно балансные схемы). В этом случае чувствительность вольтметра ограничена дрейфом нулевого уровня усилителя постоянного тока (УПТ). Типовые параметры подобного вольтметра: частотный диапазон до 1 ГГц, первый предел измерения 300 мВ, класс точности 1,5 – 2,0.

Преобразователи средневыпрямленных значений. Схемы преобразователей средневыпрямленных значений можно разделить на две группы: однополупериодные и двухполупериодные схемы. Простейшие схемы этих преобразователей представлены на рис. 14, а и б.

Однополупериодная схема (рис. 14, а) обычно применяется в простейших измерительных приборах (тестерах). Ток через измеритель проходит во время положительного полупериода измеряемого напряжения (диод D_1). Диод D_2 служит для защиты диода D_1 от пробоя обратным напряжением.

В качестве двухполупериодного преобразователя чаще используется мостовая схема (рис. 14, б). Средний ток, протекающий через измеритель, в этом случае в два раза больше, чем в однополупериодной схеме, что повышает чувствительность вольтметра в два раза. Это вызвано тем, что ток через диагональ моста протекает в одном и том же направлении в течении обоих полупериодов переменного напряжения (направление тока в схеме соответствует проводящему направлению диодов).

Недостатками подобных преобразователей являются влияние нелинейности вольт-амперной характеристики диодов при измерении малых напряжений (нелинейность шкалы), влияние температурной зависимости параметров диодов и их нестабильность. Порог чувствительности вольтметров, построенных по приведённым выше схемам, не лучше 100 мВ.

Двухполупериодные преобразователи используются и в электронных вольтметрах, где за счёт схемных решений достигается повышение чувствительности, увеличение динамического диапазона и точности измерения. Одна из возможных структурных схем электронного вольтметра с двухполупериодным преобразователем представлена на рис. 15, где $У$ – усилитель переменного напряжения. Усилитель охвачен отрицательной обратной связью, в которую включён двухполупериодный преобразователь. Введение отрицательной обратной связи повышает стабильность и улучшает амплитудно-частотную характеристику усилителя, уменьшает нелинейность, обусловленную нелинейностью прямого сопротивления диода. Частотный диапазон вольтметра не

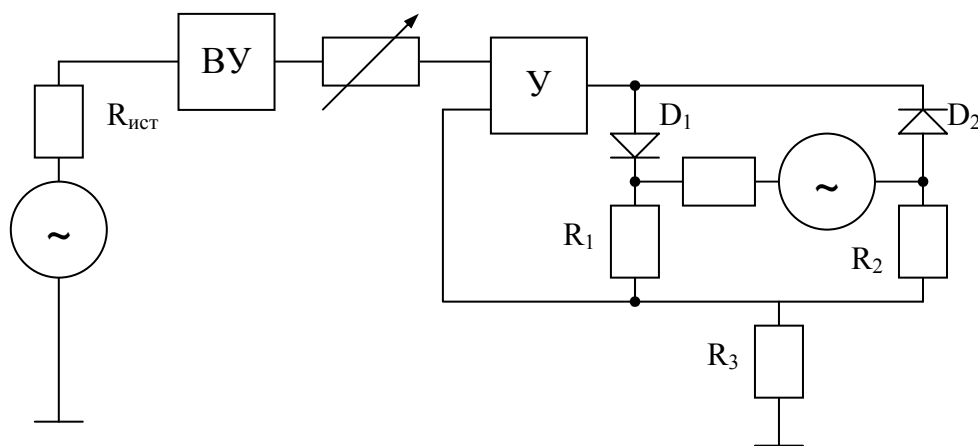
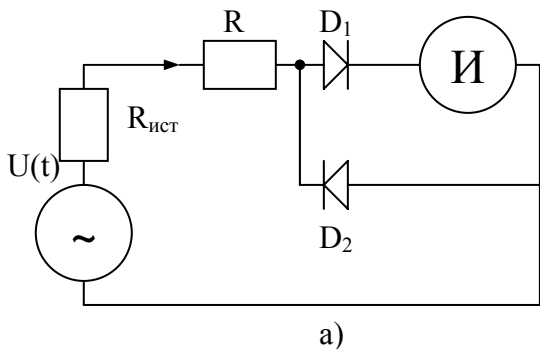


Рис. 15



а)

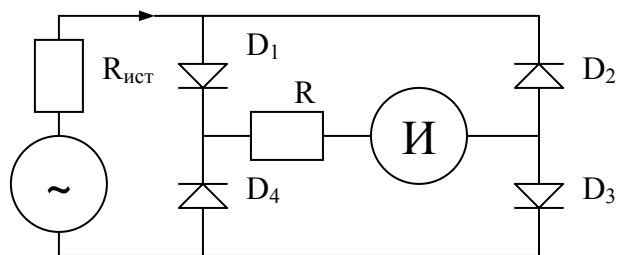


Рис. 14

б)

превышает десятков килогерц.

Преобразователи среднеквадратических значений. Основным элементом преобразователя является элемент с квадратичной вольт-амперной характеристикой. Квадратичную зависимость имеет начальный участок вольт-амперной характеристики полупроводникового диода. Однако полупроводниковые диоды отличаются большим разбросом характеристик, квадратичный участок которых имеет очень малую протяженность. На практике нашли применение элементы, построенные на основе диодных цепочек, и термопреобразователи.

Упрощенная схема преобразователя, построенного на основе диодных цепочек, представлена на рис. 16. К делителю R_5, R_6, R_7 приложено напряжение стабильного источника E . На каждом из резисторов создается падение напряжений E_1, E_2, E_3 , которые запирают диоды. При входном напряжении $u(t) < E_1$ открыт диод D_1 , и через диодную цепочку протекает ток $i = i_1$. При $E_2 > u(t) > E_1$ открывается диод D_2 и ток через R становится равным сумме токов, протекающих через D_1 и D_2 : $i = i_1 + i_2$. В дальнейшем при $E_3 > u(t) > E_2$ $i = i_1 + i_2 + i_3$. Таким образом, крутизна характеристики с увеличением $u(t)$ возрастает. Соответствующим подбором сопротивления делителя можно получить вольт-амперную характеристику преобразователя в виде ломаной линии, приближающейся к квадратичной параболе. В действительности за счёт плавного изменения токов диодов вблизи напряжения отсечки изломы на характеристике незначительны.

Нестабильность параметров диодов в подобных преобразователях приводит к значительным погрешностям преобразования ($3 \div 5\%$). Частотный диапазон промышленных образцов составляет $30 \text{ Гц} \div 1 \text{ МГц}$.

Термопреобразователи имеют квадратичную функцию преобразования. Термопреобразователь включает в себя подогреватель и термочувствительный элемент (термопару или терморезистор). Входное напряжение подается на нагреватель. Выделенное при этом тепло преобразуется в термочувствительном элементе, например в термопаре, в термоЭДС, которая пропорциональна квадрату измеряемого напряжения. Недостатками подобных преобразователей являются малая чувствительность, большая инерционность, квадратичный характер шкалы, низкая электрическая прочность. Для устранения этих недостатков используют усилители постоянного тока, специальные методы линеаризации шкалы, отрицательную обратную связь. Частотный диапазон подобных преобразователей - от нескольких герц до сотен мегагерц.

Преобразователь среднего значения. В таком преобразователе используются инерционные свойства входных цепей и отсчетного устройства. У аналоговых приборов это ярко выраженная инерционность стрелочного прибора. Таким образом, в определенных пределах вольтметр постоянного тока можно использовать в качестве вольтметра переменного тока, измеряющего среднее значение напряжения.

В зависимости от используемого в вольтметре переменного тока преобразователя вольтметр измеряет амплитудное, средневыврямленное или среднеквадратическое значение напряжения. Обычно шкалы вольтметров переменного тока (за исключением импульсных вольтметров) градуируются в среднеквадратических значениях гармонического сигнала.

3.2. Измерение параметров напряжения переменного тока

На практике различают вольтметры для измерения переменного тока гармонических сигналов и вольтметры для измерения напряжений сигналов сложной формы. Отличие их заключается в основном в амплитудно-частотных характеристиках цепи от входа до преобразователя включительно. Основные особенности измерения напряжений переменного тока заключаются в следующем.

I. Из-за ограничения диапазона частот (в области низких и высоких частот) при

измерениях возникают дополнительные погрешности, которые в общем случае являются систематическими. Погрешности увеличиваются при снижении и увеличении частоты сигнала относительно частоты сигнала, используемого при градуировке вольтметра.

Для вольтметров устанавливается нормальная область частот $F_{\min} \div F_{\max}$ которая выбирается из условия пренебрежимости частотной погрешности δ_f . Градуировочная частота должна находиться в этой области. При выходе частоты сигнала из этой области частотная погрешность растет и может достигать 15 ÷ 25% и более. Для измерения напряжений гармонических сигналов в паспортах ряда вольтметров переменного тока приводится зависимость дополнительной частотной погрешности от частоты сигнала при превышении последней величины F_{\max} : $\delta_f = F(f)$.

Эта зависимость задается таблично, графически или аналитически. При измерении напряжений сложной формы определить подобную зависимость можно лишь для определенной формы сигнала. Обычно она определяется для прямоугольного сигнала.

2. Показания любого вольтметра зависят от формы сигнала и от преобразователя переменного напряжения в постоянное, применяемого в вольтметре. Погрешность измерения может возникать при отличии реальной формы сигнала от принятой. Другой погрешностью может быть погрешность, вызванная искажением формы сигнала в тракте вольтметра, что связано с амплитудно-частотной и амплитудной характеристиками последнего.

3. Необходимо учитывать возможность соизмеримости длины волны сигнала с линией передачи между источником и нагрузкой, а так же влияние сопротивления нагрузки линии на режим ее функционирования (бегущая волна и стоячая волна, смешанный режим). Очевидно, что в режиме бегущей волны место подключения вольтметра к линии не имеет значения. Однако при других режимах показание вольтметра будет зависеть от места его подключения. Для получения достоверных результатов измерения напряжения необходимо тщательно анализировать эти явления в каждом конкретном случае.

4. Соединительные провода вольтметра удлиняют входную цепь прибора. Они представляют собой цепь с распределенными постоянными. Это приводит к тому, что на соответствующих частотах показание вольтметра существенно отличается от измеряемого значения. При выборе длины соединительных проводов l рекомендуется пользоваться следующим условием:

$$l < \lambda_{\min} / (50 \div 100),$$

где λ_{\min} - длина волны электромагнитного колебания, выраженная в см.

Требования к измерению переменных напряжений можно сформулировать следующим образом:

1. Необходимо выбирать метод измерения, приводящий к заданной погрешности.
2. Входное сопротивление вольтметра должно обеспечивать пренебрежимо малую погрешность шунтирования.
3. Наличие реактивного сопротивления входной цепи вольтметра не должно вызывать существенной погрешности в заданном диапазоне частот.
4. Длина соединительных проводов должна быть много меньше минимальной длины волны электромагнитных колебаний.
5. Резонансная частота вольтметра должна быть на порядок выше наибольшей частоты измеряемого напряжения.

3.3. Особенности измерения параметров напряжения переменного тока различной формы

Выпускаемые вольтметры переменного тока содержат различные преобразователи переменного напряжения в постоянное. Шкалы вольтметров могут градуироваться для разных параметров переменного напряжения. При градуировке шкалы имеет большое значение форма переменного напряжения. Следовательно, в зависимости от принятого преобразователя и условий градуировки вольтметр переменного тока может измерять

одни параметры напряжения переменного тока, а показывать другие значения. При градуировке шкалы учитывается коэффициент пересчета k_{Π} измеряемого параметра переменного напряжения в показываемое значение. Это приводит к тому, что показания различных вольтметров переменного тока при измерении одного и того же параметра переменного напряжения могут быть различны.

Необходимо отметить, что подавляющее большинство вольтметров переменного тока (за исключением импульсных вольтметров) проградуировано в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения. Измеряемые параметры и показываемые значения переменных напряжений, а также коэффициенты пересчета для этого случая приведены в табл. 3.

Таблица 3

Преобразователь переменного напряжения в постоянное	Значение напряжения, измеряемое вольтметром	Значение напряжения, показываемое вольтметром	k_{Π}
Амплитудный (пиковый) детектор	Амплитудное	Среднеквадратическое	$1/k_a$ 0,707
Преобразователь средневыпрямленных значений	Средневыпрямленное	Среднеквадратическое	k_{ϕ} 1,11
Преобразователь среднеквадратических значений	Среднеквадратическое	Среднеквадратическое	1

Подобная таблица может быть предложена и для случая градуировки вольтметра в других значениях напряжения. Необходимо иметь в виду также различие вольтметров с открытым и закрытым входом.

При измерении параметров переменного напряжения необходимо знать:

форму измеряемого напряжения;

возможный диапазон измеряемого параметра напряжения;

измеряемое и показываемое значения напряжения используемого вольтметра;

открытый или закрытый вход вольтметра;

частотную характеристику вольтметра.

Рассмотрим на примерах особенности измерения параметров напряжений различной формы. Будем считать, что применяемые вольтметры проградуированы в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения.

Задача I. Вольтметр переменного тока с амплитудным детектором показал 12 В. Измеряемое напряжение имеет синусоидальную форму (рис. 17). Определить амплитудное, среднеквадратическое и средневыпрямленное значение напряжения.

Решение. В данном случае при отсутствии постоянной составляющей показания подобного вольтметра с открытым и закрытым входом одинаковы. Показание вольтметра 12 В соответствует среднеквадратическому значению измеряемого напряжения:

$$u = 12 \text{ В};$$

$$u_m = 12 \cdot k_a = 12 \cdot \sqrt{2} = 16,9 \text{ В};$$

$$u_{ca} = 12 / k_{\phi} = 12 / 1,11 = 10,8 \text{ В}.$$

Аналогичные решения будут и для случая использования вольтметров с преобразователями средневыпрямленных и среднеквадратических значений.

Задача 2. На выходы вольтметров переменного тока с амплитудным детектором, преобразователями средневыпрямленного и среднеквадратического значений подаётся напряжение прямоугольной формы со скважностью $Q = 2$, $u_0 = 10$ В (рис. 18). Определить, что покажет каждый вольтметр (u_α).

Решение. Для такого напряжения $k_a = k_\phi = 1$ или $u = u_m = u_{св}$.

1. Вольтметр с амплитудным детектором покажет $u_\alpha = u_m/k_a = 10/1,41 = 7,1$ В, что не соответствует ни одному значению измеряемого напряжения.
2. Вольтметр с преобразователем средневыпрямленных значений покажет $u_\alpha = u_{св} \cdot k_\phi = 10 \cdot 1,11 = 11,1$ В, что также не соответствует действительности.
3. Вольтметр с преобразователем среднеквадратических значений покажет $u_\alpha = u \cdot 1 = 10$ В.

Задача 3. Измерить амплитудное значение пилообразного напряжения (рис. 19) вольтметрами переменного тока с амплитудным детектором, преобразователями средневыпрямленных и среднеквадратических значений.

Решение. 1. Вольтметр переменного тока с амплитудные значения без постоянной составляющей:

$$u'_m = u_m - u_0.$$

Очевидно, что в рассматриваемом случае $u_0 = u_m / 2$, тогда

$$u_\alpha = u'_m / 1,41 = \frac{u_m - u_0}{1,41} = \frac{u_m}{2 \cdot 1,41}.$$

Отсюда $u_m = u_\alpha \cdot 2,82 = 15 \cdot 2,82 = 42,3$ В.

2. Вольтметр переменного тока с преобразователем средневыпрямленных значений с открытым входом показал 23,48 В. Для этого случая показания прибора $u_\alpha = u_{св} \cdot k_\phi$. Вместе с тем для подобного случая однополярного сигнала $u_{св} = u_0 = \frac{u_m}{2}$. Таким образом,

$$u_m = \frac{2 \cdot u_\alpha}{1,11} = \frac{2 \cdot 23,48}{1,11} = 42,3 \text{ В.}$$

3. Вольтметр переменного тока с преобразователем среднеквадратических значений с закрытым входом показал 12,23 В. Показание прибора соответствует среднеквадратическому значению сигнала (см. рис. 19) без постоянной составляющей u' :

$$u' = u_\alpha = \frac{u'_m}{k_a} = \frac{u'_m}{1,73}.$$

Отсюда

$$u_m = 2u'_m = 2 \cdot 1,73 \cdot u_\alpha = 42,3 \text{ В.}$$

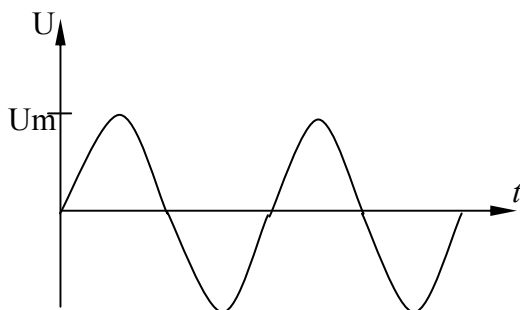


Рис. 17

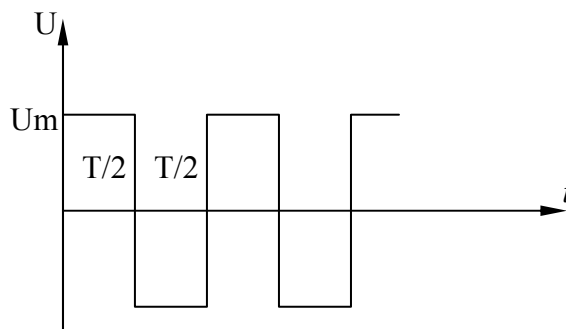


Рис. 18

Задача 4. Измерить амплитудное значение напряжения периодической последовательности положительных импульсов длительностью $\tau_{и} = 200$ мкс и периодом $T = 1$ мс (рис. 20) вольтметрами, указанными в задаче 3.

Решение. 1. Вольтметр переменного тока с амплитудным детектором и закрытым входом показал $u_{\alpha} = 7$ В. вольтметр измеряет величину напряжения u'_m :

$$u'_m = u_m - u_0,$$

которая связана с показанием вольтметра соотношением

$$u_{\alpha 1} = \frac{u'_m}{1,41} = \frac{u_m - u_0}{1,41},$$

t

где $u_0 = u_m \frac{\tau_{и}}{T} = \frac{u_m}{Q}$,

тогда

$$u_{\alpha 1} = \frac{u_m - u_m / Q}{1,41},$$

откуда

$$u_m = 1,41 \cdot 7 \cdot \frac{5}{4} = 12,34 \text{ В.}$$

2. Вольтметр переменного тока с преобразователем средневыпрямленных значений с открытым входом показал $u_{\alpha 2} = 13$ В.

Так как вход открытый, то средневыпрямленное значение измеряемого напряжения

$$u_{св} = \frac{u_{\alpha 2}}{k_{\phi}} = \frac{u_{\alpha 2}}{1,11}.$$

Так как для подобного сигнала

$$u_m = Q \cdot u_0 = Q \cdot u_{св},$$

то

$$u_m = \frac{u_{\alpha 2} \cdot Q}{1,11}$$

или

$$u_m = \frac{13 \cdot 5}{1,11} = 58,6 \text{ В.}$$

3. Вольтметр переменного тока с преобразователем среднеквадратических значений

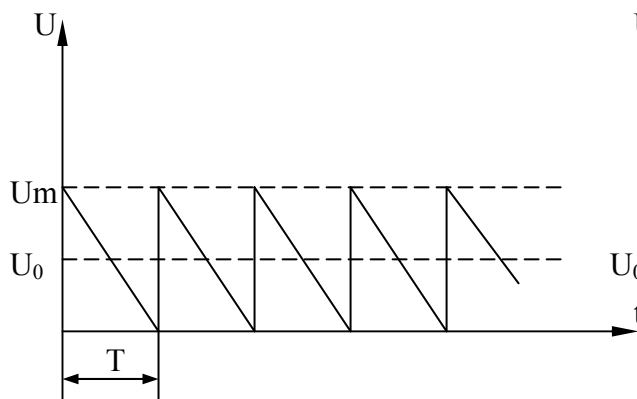


Рис. 19

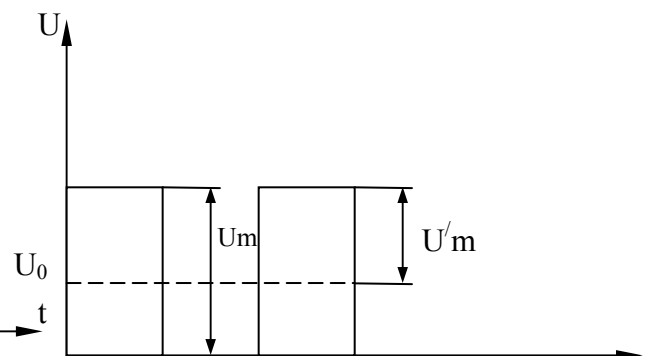


Рис. 20

с закрытым входом показал $u_{\alpha 3} = 17$ В. Показание прибора соответствует среднеквадратическому значению напряжения u' ($u' = u_{\alpha 3}$) (рис. 21). Учитывая, что коэффициент пересчёта градуировки шкалы равен 1, имеем

$$u' = u'_m / k_a,$$

где k_a - коэффициент амплитуды для подобного сигнала, равный $\sqrt{Q-1}$, тогда

$$u' = u_{\alpha 3} = \frac{u_m(Q-1)}{Q\sqrt{Q-1}} = \frac{u_m\sqrt{Q-1}}{Q},$$

откуда

$$u_m = \frac{u_{\alpha 3} \cdot Q}{\sqrt{Q-1}}$$

или

$$u_m = 17 \cdot 5 / 2 = 42,5 \text{ В.}$$

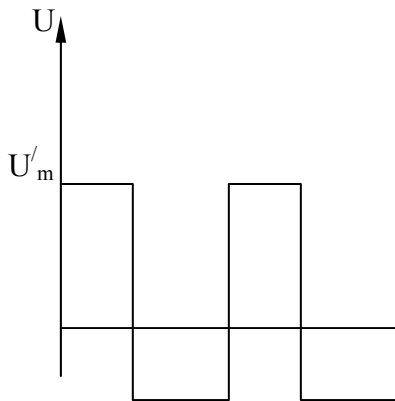


Рис. 21

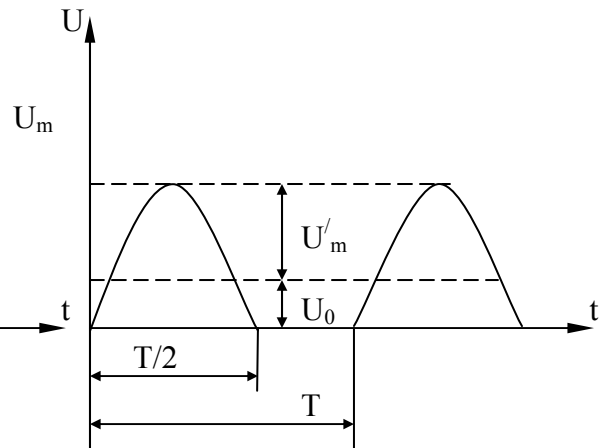


Рис. 22

Задача 5. По результатам измерения вольтметром переменного тока определит значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя (рис. 22).

Решение. 1. Вольтметр переменного тока с амплитудным детектором, имеющим закрытый вход, показал $u_{\alpha 1} = 6 \text{ В}$:

$$\begin{aligned} u_m &= u'_m + u_0; \\ u'_m &= u_{\alpha} \cdot k_a = u_{\alpha 1} \cdot 1,41; \\ u_0 &= u_m / \pi \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} u_m - \frac{u_m}{\pi} &= u_{\alpha 1} \cdot 1,41; \\ u_m &= \frac{u_{\alpha 1} \cdot 1,41 \cdot \pi}{\pi - 1}; \\ u_m &= \frac{6 \cdot 1,41 \cdot 3,14}{2 \cdot 14} = 12,4 \text{ В.} \end{aligned}$$

2. Вольтметр переменного тока с преобразователем средневыпрямленных значений с открытым входом показал $u_{\alpha 2} = 4,4 \text{ В}$:

$$\begin{aligned} u_0 &= u_{\alpha 2} = \frac{u_{\alpha 2}}{k_{\phi}} = \frac{u_{\alpha 2}}{1,11}; \\ u_{\alpha 2} &= 4,41 / 1,11 = 3,96 \text{ В}; \\ u_m &= u_{\alpha 2} \cdot k_{\phi} \cdot k_a = 3,96 \cdot 3,14 = 12,4 \text{ В.} \end{aligned}$$

3.4. Измерение параметров напряжения переменного тока неизвестной формы

На практике при измерении параметров напряжения встречаются следующие случаи:

форма напряжения неизвестна;
форма напряжения известна, но затруднительно вычислить необходимые коэффициенты амплитуды и формы;
форма напряжения известна, но искажена шумом или в результате прохождения сигнала через различные цепи.

При этом в общем случае пользоваться приемами, изложенными в разд. 3.3, нельзя. Задача измерения параметров напряжения может быть решена следующим образом. Для измерения амплитудного значения напряжения необходимо использовать вольтметр с амплитудным детектором; для измерения средневыпрямленного значения – вольтметр с преобразователем средневыпрямленных значений; для измерения среднеквадратических значений - вольтметр с преобразователем среднеквадратических значений.

При измерении необходимо учитывать открытый и закрытый вход вольтметра. Измеряя напряжение вольтметром с закрытым входом, следует учитывать наличие или отсутствие постоянной составляющей. Постоянная составляющая может быть измерена вольтметром постоянного тока, содержащим интегрирующее звено (элемент). Используя вольтметр с открытым входом, необходимо также предварительно знать знак постоянной составляющей и ориентировочно ее значение. Отсутствие этой информации может привести к тому, что исследуемая переменная составляющая напряжения выйдет за пределы рабочего диапазона вольт-амперной характеристики преобразователя. Это повлечет за собой существенную непредсказуемую погрешность измерения.