

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

А. Г. Костюрина, Ю. А. Орлов

Работы 2.1, 2.2

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Учебно-методическое пособие

Новосибирск
2012

Представлено переработанное описание модернизированной лабораторной работы измерительного практикума кафедры общей физики НГУ. Описание состоит из общего теоретического введения и двух лабораторных работ.

В общей части рассмотрены основы измерения тока и напряжения в цепях постоянного и переменного тока.

В первой работе студенты знакомятся с измерением тока и напряжения в цепях постоянного тока, определяют внутреннее сопротивление приборов, изучают режимы работы источников питания.

Во второй работе студенты постигают основы измерений в цепях переменного тока, активно используя цифровые измерительные приборы и источники периодических сигналов, знакомятся с понятием согласования в электрических цепях.

Работа предназначена для студентов 1–2-го курсов физического факультета, факультета информационных технологий, геолого-геофизического, медицинского факультетов и факультета естественных наук, а также может быть использована при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов.

Рецензент

д-р физ.-мат. наук А. Д. Косинов

Издание подготовлено в рамках реализации *Программы развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет»* на 2009–2018 годы.

© Новосибирский государственный университет, 2012

Содержание

| | |
|--|-----------|
| Основы измерений..... | 5 |
| Измерение физических величин..... | 5 |
| Измерительная система | 7 |
| Структура измерительной системы..... | 7 |
| Характеристики измерительной системы..... | 10 |
| Погрешности измерения..... | 12 |
| Электрические цепи..... | 13 |
| Источники питания | 14 |
| Эквивалентное представление источников..... | 14 |
| Классификация режимов работы электрической цепи..... | 18 |
| Некоторые сведения об электроизмерительных приборах..... | 21 |
| Приборы для измерения тока и напряжения..... | 21 |
| Эквивалентные схемы амперметров и вольтметров..... | 22 |
| Изменение пределов измерения аналоговых электроизмерительных приборов..... | 24 |
| Приложение 1. Принцип действия некоторых электроизмерительных приборов..... | 26 |
| Аналоговые электромеханические приборы..... | 26 |
| Цифровые измерительные приборы..... | 31 |
| Приложение 2. Условные обозначения на шкалах приборов..... | 38 |
| Список литературы..... | 39 |
| Работа 2.1. Электроизмерительные приборы и источники питания постоянного тока..... | 40 |
| Подготовка к проведению эксперимента..... | 40 |
| Изучение влияния измерительного прибора на объект измерения | 41 |
| <i>Задание 1. Изучение влияния вольтметра на режим работы электрической цепи постоянного тока.....</i> | <i>41</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Задание 2. Изучение влияния амперметра на режим работы электрической цепи постоянного тока</i> | <i>43</i> |
| <i>Задание 3. Определение сопротивления электростатического вольтметра.....</i> | <i>45</i> |
| Изучение режимов работы источников питания постоянного тока и определение их параметров..... | 46 |
| <i>Задание 4. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника</i> | <i>47</i> |
| <i>Задание 5. Изучение работы источника питания постоянного тока в режимах стабилизации тока и стабилизации напряжения.....</i> | <i>48</i> |
| Содержание отчета..... | 50 |
| Работа 2.2. Основы измерений в цепях переменного тока..... | 51 |
| Электрическая цепь переменного тока..... | 51 |
| Подготовка к проведению эксперимента..... | 52 |
| Изучение влияния частоты измеряемого сигнала на показания вольтметров..... | 54 |
| <i>Задание 1. Определение рабочего интервала частоты вольтметров.....</i> | <i>54</i> |
| Влияние формы сигналов на показания вольтметров..... | 56 |
| <i>Задание 2. Измерение напряжения периодических сигналов без постоянной составляющей.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Задание 3. Измерение напряжения периодических сигналов с постоянной составляющей.....</i> | <i>61</i> |
| Режимы работы источника гармонических сигналов..... | 63 |
| <i>Задание 4. Изучение зависимости мощности, выделяемой на нагрузке, от соотношения сопротивления источника и сопротивления нагрузки.....</i> | <i>65</i> |
| Содержание отчета..... | 66 |

Основы измерений

Измерение – это процесс получения информации об объекте в форме результата измерения с помощью измерительных систем. Целью измерений является поиск таких параметров изучаемых явлений, которые можно измерить, получив при этом численные значения. Для получения правильных результатов необходимо предварительно изучить теорию, используемую аппаратуру, спланировать эксперимент, овладеть навыками его проведения. При этом очень важно исключить или хотя бы свести к минимуму воздействие внешних факторов на процесс измерения.

Измерение должно быть:

- избирательным, т. е. давать информацию только об измеряемой величине;
- объективным – не зависеть от наблюдателя. Измерение можно считать объективным, если прибор преобразует измеряемую характеристику к такому виду, в котором результат не зависит от наблюдателя, например в число на цифровом дисплее;
- подготовленным. Измерения бывают качественными и количественными. Качественные измерения в основном проводят при подготовке количественных измерений. Качественное измерение обеспечивает измерителя / наблюдателя информацией, необходимой для того, чтобы спланировать и выбрать приборы для проведения количественных измерений.

Измерение физических величин

Измерение физических величин позволяет получить информацию о физических состояниях объекта или явлениях с помощью технических средств / измерительных систем. Используемые в физике экспериментальные методы и измерительная техника весьма многообразны. Специальные методы измерений имеются не только в физике, но и в других разделах естественных и технических наук.

Для проведения измерений требуется определённая совокупность приборов и других технических средств. На рис. 1. приведена обобщённая структурная схема измерения, состоящая из объекта изме-

рения, измерительной системы и наблюдателя, находящихся в определённой окружающей среде.

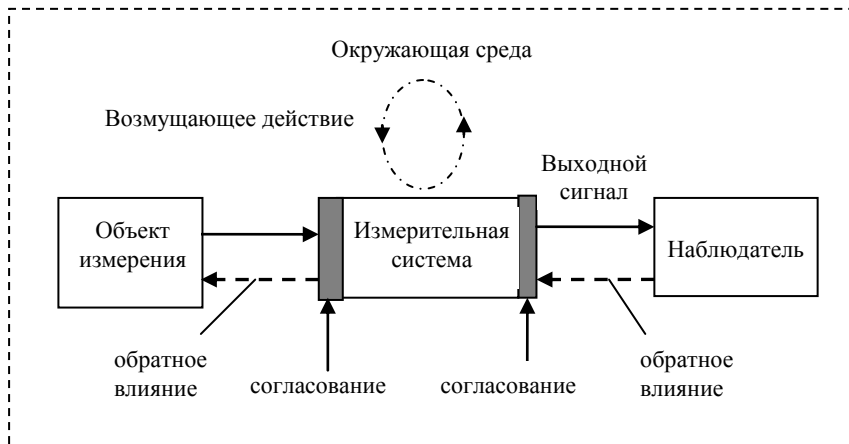


Рис. 1. Структурная схема измерения

Сплошными стрелочками на рисунке показана передача измерительной информации от объекта измерения в измерительную систему и далее к наблюдателю. Штриховыми стрелочками показано обратное влияние на объект измерения, которое может быть значительным, что приведёт к заметному изменению измеряемой величины. Чтобы свести это влияние к минимуму, необходимо согласовать входной каскад измерительной системы с объектом измерения. Аналогичную процедуру согласования необходимо провести между регистратором и выходом измерительной системы.

Кроме того, на измерительную систему оказывает действие окружающая среда, которая может вызывать в ней возмущения и помехи, например, за счёт влияния температуры, внешних электрических и магнитных полей и т. д.

Источником погрешностей измерения является также несовершенство самой измерительной системы, которое приводит к неправильным измерениям.

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте в пассивной или активной форме. *Информация является активной*, если она имеет форму энергетической характеристики изучаемого явления (сигналов). Регистрация пассивной ин-

формации техническими средствами возможна только после преобразования её в активную форму. Для активизации пассивных свойств объекта необходим внешний источник энергии (возбуждение). Например, величину сопротивления резистора можно определить, пропустив через него ток от дополнительного источника, который вызовет появление на нём падения напряжения, которое можно регистрировать техническими средствами, т. е. с помощью измерительной системы.

Измерительная система

Измерительной системой можно назвать как одиночный прибор, так и совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединённых между собой каналами связи, предназначенную для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и / или использования в автоматических системах управления (рис. 2).

Структура измерительных систем

Измерительные системы могут иметь разное число подсистем и иметь особый порядок их расположения.

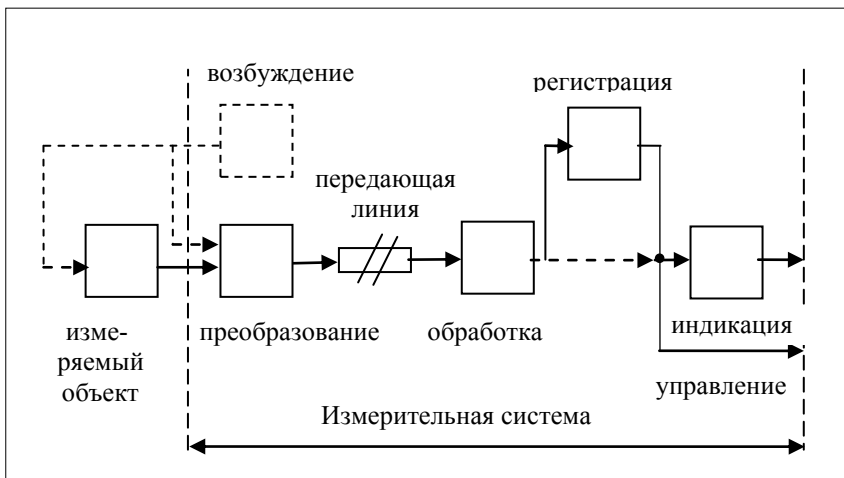


Рис. 2. Примерная структура измерительной системы

Рассмотрим подсистемы, из которых состоит типичная измерительная система.

Преобразователь. Первым звеном в измерительной системе является преобразователь, который преобразует измеряемую величину в сигнал для последующей передачи, обработки или регистрации. Обязательное условие *измерительного* преобразования – сохранение в выходной величине преобразователя информации о количественном значении измеряемой величины с *требуемой точностью*.

Имеются два основных вида преобразователей: активный и пассивный. **Активный преобразователь** непосредственно преобразует одну форму энергии в другую, не нуждаясь во внешнем источнике энергии (возбуждении). Примером активного преобразователя является термопара, которая сразу преобразует тепловую энергию в электрическую.

Пассивный преобразователь не может непосредственно преобразовать измеряемую характеристику объекта в электрическую величину. Для преобразования ему необходим дополнительный источник энергии. Примером пассивного преобразователя является термометр сопротивления (терморезистор). Сопротивление терморезистора зависит от температуры. Для перевода величины сопротивления в электрическую величину требуется дополнительный источник.

Передающая линия предназначена для передачи сигнала от источника к регистратору с минимальными потерями, без искажений формы сигнала и с защитой от посторонних помех. Линии передачи могут состоять из *параллельных проводников* (двухпроводная линия), *витой пары*, *коаксиальных кабелей* и т. д.

Двухпроводная линия используется в *цепях постоянного напряжения* и в *низкочастотных цепях переменного напряжения*.

Витая пара – это два изолированных и перекрученных друг друга проводника. Основной характеристикой качества витой пары является сбалансированность, т. е. электромагнитные поля (помехи), возникающие при протекании тока по проводникам, находятся в противофазе, за счёт этого суммарное излучение или восприимчивость к помехам «идеальной витой пары» стремится к нулю.

В *коаксиальном кабеле* влияние помех ослаблено за счёт экранирования внутренней центральной жилы внешним цилиндрическим проводником.

При передаче *высокочастотных* сигналов и коротких импульсов большое значение имеет *волновое сопротивление* передающей линии. Если волновое сопротивление линии не равно сопротивлению нагрузки, то возникает отраженная электромагнитная волна, что может приводить к искажению сигнала. При равенстве этих сопротивлений происходит согласование передающей линии с приемным устройством, и передаваемый сигнал поступает в приемное устройство без искажений. Аналогичная ситуация возникает, если нет согласования передающей линии с источником.

Для линии без потерь волновое сопротивление (характеристический импеданс Z) определяется по формуле $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$,

где L – погонная индуктивность, которой обладают образующие линию проводники, а C – погонная ёмкость между ними.

Волновые сопротивления некоторых соединительных линий

| Тип линии | Сопротивление, Ом |
|------------------------|-------------------|
| Коаксиальный кабель | 50, 75, 100 |
| Витая пара | 100, 120 |
| Свободное пространство | 377 |

Примечание. Характеристический импеданс свободного пространства (воздуха) рассчитывается, так же как импеданс вакуума,

по формуле $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, где μ_0 , ϵ_0 – соответствующие магнитная и электрическая постоянные. С изменением влажности воздуха импеданс меняется.

Обработка. Иногда электрический сигнал на выходе преобразователя / датчика имеет такой вид, в котором он не может быть представлен наблюдателю. Тогда необходимо провести соответствующую обработку / преобразование сигнала, например, фильтрацию, усиление / ослабление, оцифровку АЦП, выпрямление. Желательно, чтобы преобразования были линейными функциями входного сигнала.

Регистрация результата измерения производится для того, чтобы сохранить экспериментальные данные, которыми затем можно воспользоваться в любое более удобное время. Сохранение результатов измерений можно производить в аналоговом и цифровом виде.

Устройство индикации предназначено для представления результатов измерения человеку-наблюдателю. Устройство индикации может быть аналоговым (электронный луч осциллографа) или цифровым (аналого-цифровой дисплей или светящиеся элементы индикации). Поскольку устройства индикации рассчитаны на визуальное наблюдение, поэтому они являются электрооптическими преобразователями.

Управление. Существуют измерительные системы, в которых результат не регистрируется и не воспроизводится способом индикации, а используется для управления процессом. Целью управления процессом является такое регулирование, при котором выходной сигнал соответствует определенным требованиям.

Характеристики измерительной системы

Основными характеристиками электроизмерительных систем являются: функция преобразования, чувствительность, порог чувствительности, диапазон измерений, область рабочих частот, класс точности, потребляемая мощность, быстродействие, входное сопротивление.

Уравнение преобразования $Y = f(X)$ – зависимость между входной X и выходной Y величиной. Вид уравнения преобразования определяется конструктивными параметрами прибора.

Чувствительность измерительной системы / прибора определяется из уравнения преобразования и равна отношению изменения сигнала ΔY на выходе прибора к его изменению ΔX на входе:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

Если передаточное соотношение $Y = f(X)$ – линейное, то чувствительность постоянная и определяется по формуле $S = Y/X$.

Обратная чувствительности величина $\alpha = 1/S$ является *ценой деления*. Чувствительность измерительной системы зависит от частоты $S = f(w)$.

Для цифровых приборов величиной ΔY является единица младшего разряда (шаг квантования).

Порог чувствительности – наименьшее значение входной величины, которое можно обнаружить с помощью данного прибора с заданной точностью.

Разрешающая способность \mathfrak{R} – это наименьший интервал Δx значения измеряемой величины x , который всё ещё вызывает изменение результата измерения, т. е. $\mathfrak{R} = \frac{x}{\Delta x}$. Для всех измерительных систем разрешающая способность имеет конечное значение.

Диапазон измерений (y_{\max}, y_{\min}) – область значений измеряемой величины, для которой показания прибора соответствуют его классу точности. Диапазон измерений может состоять из нескольких поддиапазонов.

Область рабочих частот – полоса частот, в пределах которой погрешность измерительной системы, вызванная изменением частоты, соответствует паспортному значению.

Класс точности γ – отношение абсолютной погрешности ΔX к предельному значению шкалы прибора X_{\max} :

$$\gamma = \pm \frac{\Delta X}{X_{\max}} 100 \, \%.$$

Следует отличать класс точности прибора от его относительной погрешности, определяемой по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta X}{X} 100 \, \%,$$

где X – текущее значение измеряемой величины.

Поясним сказанное на примере. Пусть напряжение 30 В измеряется вольтметром класса точности $\gamma = 0,5$ со шкалой $U_{np} = 300$ В. Это означает, что абсолютная погрешность прибора

$$\Delta U = \frac{\gamma U_{\max}}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 300}{100} = \pm 1,5 \, \text{В}.$$

Следовательно, относительная погрешность нашего измерения

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 \cdot \% = \pm \frac{1,5}{30} 100 \% = \pm 5 \, \%,$$

а не 0,5 %, если бы величина измеряемого напряжения была равна 300 В.

Из данного примера видно, что для проведения измерения с высокой точностью следует подобрать такой прибор (или предел многопредельного прибора), чтобы измеряемая величина составляла 70–90 % предельного значения шкалы, если измеряется постоянное напряжение / ток. При измерении переменного напряжения стрелочными вольтметрами (для RMS вольтметров) измеряемая величина не должна превышать 70 % предельного значения шкалы.

Примечание. Основные параметры измерительных приборов приведены в его паспортных данных.

Погрешности измерений

Результат измерения физической величины должен представлять значение измеряемой величины с указанием погрешности. По характеру происхождения погрешности принято подразделять на систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематические погрешности – это погрешности, которые повторяются при измерении определённой физической величины с использованием одной и той же измерительной системы и при неизменных условиях проведения измерения. Возникновение систематических погрешностей можно определить или тщательным анализом измерительной системы, или проведением измерений по другому принципу и с использованием другой аппаратуры.

Случайные погрешности обусловлены одновременным действием множества неконтролируемых факторов, которые случайно меняются по величине и знаку при повторении измерений.

Грубые погрешности / промахи – это случайные и большие отклонения измеряемой величины от действительного значения. Их появление, как правило, связано или с неисправностью аппаратуры, или с невнимательностью экспериментатора.

Электрические цепи

Обычно в измерительной системе измеряемая физическая величина преобразуется в электрический сигнал. Это делается потому, что электрический сигнал удобен для передачи, хранения, дальнейшего преобразования в любую форму, а разнообразие электронных операций позволяет быстро провести необходимую обработку сигнала. Поэтому далее рассмотрим некоторые функциональные устройства электрической цепи.

Электрической цепью называется совокупность соединённых устройств и объектов, электромагнитные процессы в которых можно описать с использованием понятий об ЭДС (электродвижущая сила), электрическом токе и напряжении.

В электрическую цепь входят: источники питания, генераторы сигналов различной формы, датчики / преобразователи, усилители, потребители (нагрузка), измерительные приборы и регистрирующие устройства.

Электрическая цепь представляется в виде электрической схемы, в которой реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями входящих в неё элементов и способов их соединения. *Простейшая* электрическая цепь (рис. 3) состоит из источника питания, сопротивления нагрузки и измерительных приборов: амперметра и вольтметра.

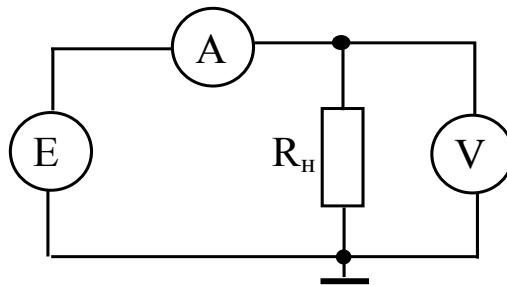


Рис. 3. Схема простейшей электрической цепи:
 E – источник ЭДС, A – амперметр, V – вольтметр,
 R_n – сопротивление нагрузки

Источники питания

В качестве источников питания электрических цепей могут использоваться как стандартные приборы (генераторы, источники ЭДС), так и специальные датчики и детекторы, преобразующие неэлектрический сигнал (механический, световой, тепловой, поток частиц и т. д.) в электрический. Источник характеризуется уровнем выходной мощности P , внутренним сопротивлением r , частотой ν и формой генерируемого сигнала.

По *форме генерируемых сигналов* различают генераторы гармонических сигналов, импульсов, шума и специальной формы. Наиболее широкое применение находят генераторы гармонических сигналов и генераторы импульсов прямоугольной и треугольной формы.

По *диапазону генерируемых частот* различают генераторы низких (от долей герца до 1 МГц), высоких (от 100 кГц до 500 МГц) и сверхвысоких (от 500 МГц и выше) частот.

В данных работах используются источники питания постоянного тока и генераторы низких частот сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы.

Поскольку разнообразие современных приборов очень велико, то для анализа работы электрической цепи удобно использовать понятие эквивалентных схем.

Эквивалентная схема – электрическая схема, в которой все реальные элементы заменены максимально близкими по функциональности цепями из *идеальных элементов*. Эквивалентная схема может состояться как для одного элемента, так и для сложной цепи.

Эквивалентное представление источников

При анализе электрических цепей любой источник электрической энергии (реальный источник) может быть представлен или *эквивалентным источником напряжения*, или *эквивалентным источником тока*.

Эквивалентная схема источника ЭДС состоит из идеального источника E и внутреннего сопротивления r (рис. 4).

Идеальный источник ЭДС – это такой источник, напряжение на выходе которого не зависит от сопротивления нагрузки, т. е. оно

постоянно и равно ЭДС ($U = E$). Собственное сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю. Идеальный источник ЭДС – физическая абстракция, т. е. такое устройство не может существовать. В реальности любой источник напряжения (E) имеет внутреннее сопротивление r , которое является конструктивным свойством данного источника.

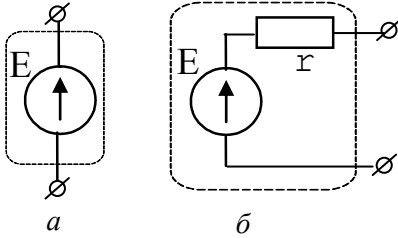


Рис. 4. Обозначения на схемах идеального (а) и реального (б) источника напряжения (стрелка указывает направление возрастания потенциала источника)

Эквивалентная схема источника напряжения состоит из идеального источника ЭДС E с последовательно соединённым сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению реального источника r .

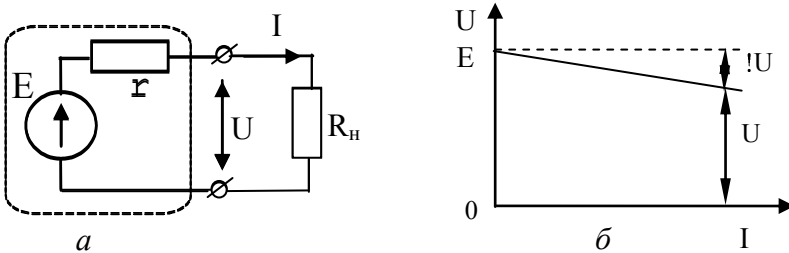


Рис. 5. Эквивалентный источник напряжения (а) и его характеристика с внешней нагрузкой (б)

При подключении к выходным клеммам источника сопротивления нагрузки R_n (рис. 5, а) в цепи возникает ток $I = E/(R_n + r)$ и, соответственно, напряжение U на выходе источника уменьшается за счёт падения напряжения на его внутреннем сопротивлении r $!U = Ir$.

Действительно, согласно второму закону Кирхгофа ЭДС источника равна сумме падений напряжения:

$$E = U + !U \quad \text{или} \quad U = E - !U, \quad (1)$$

где $U = I R_n$ – падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

Если изменять величину сопротивления нагрузки, то произойдет как изменение тока I , так и падение напряжений U и $!U$, в результате получим нагрузочную / вольт-амперную характеристику, графическое изображение которой приведено на рис. 5, б. Штриховая горизонтальная линия соответствует идеальному источнику ЭДС, сплошная – реальному.

Эквивалентная схема источника тока состоит из идеального источника тока с параллельно включенным внутренним сопротивлением r (рис. 6), равным сопротивлению реального источника энергии.

Идеальный источник тока характеризуется неизменным по величине током (независящим от сопротивления нагрузки), равным току короткого замыкания $\left[I_{кз} = E/r \right]$ (сопротивление идеального источника тока равно бесконечности).

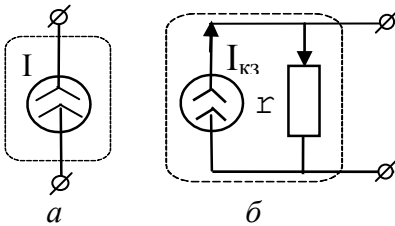


Рис. 6. Эквивалентная схема идеального (а) и реального (б) источников тока

Подключение к источнику тока сопротивления нагрузки R_n (рис.7, а) приведёт к разветвлению тока источника $I_{кз}$ на две состав-

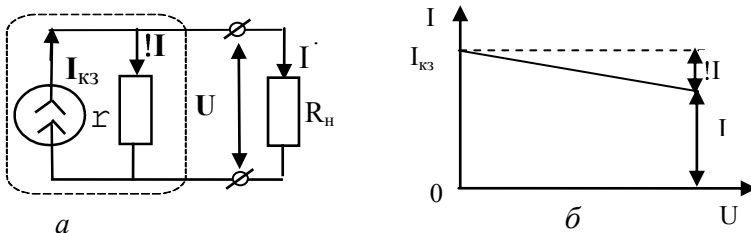


Рис. 7. Эквивалентный источник тока (а) и его нагрузочная характеристика (б)

ляющие: $!I$ – ток, текущий через внутреннее сопротивление источника r , и I – через сопротивление нагрузки R_n . Используя первый закон Кирхгофа, запишем уравнение для данной цепи:

$$I = I_{кз} - !I = I_{кз} - U/r. \quad (2)$$

Уменьшение тока нагрузки I при увеличении напряжения U источника тока обусловлено *увеличением внутреннего тока $!I$* .

Изменяя величину сопротивления нагрузки, получим вольт-амперную характеристику $I(U)$, представленную на рис. 7, б, на которой штриховой линией изображена характеристика идеального источника тока, сплошной – реального.

Из сравнения вольт-амперных характеристик источника напряжения и источника тока следует, что они одинаково реагируют на изменение величины сопротивления нагрузки R_n , причём *ток в нагрузке одинаков* и определяется соотношением

$$\left[I = \frac{E}{r + R_n} \right].$$

Напряжение на нагрузках в обеих схемах также одинаково.

Следовательно, схема источника тока эквивалентна схеме источника напряжения в отношении энергии, выделяющейся в сопротивлении нагрузки R_n , но не эквивалентна ей в отношении энергии, выделяющейся во внутреннем сопротивлении источника питания, т. е. мощность, выделяемая на сопротивлении нагрузки, одинакова, а на внутреннем сопротивлении эквивалентных источников – различна.

Классификация режимов работы электрической цепи

Режим работы электрической цепи зависит от параметров нагрузки, в нашем случае величиной сопротивления нагрузки R_n . Как известно, работа источника под нагрузкой определяется вольт-амперной (внешней) характеристикой, уравнение которой для данной цепи (рис. 8, а) имеет вид $U = E - Ir$.

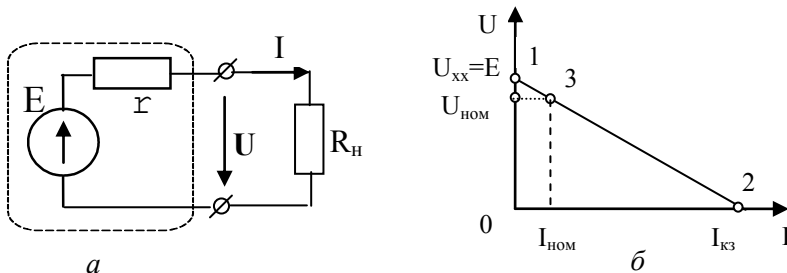


Рис. 8. Электрическая цепь (а) и её вольт-амперная характеристика (б)

При теоретическом анализе электрической цепи рассматриваются следующие режимы работы: *короткого замыкания*, *холостого хода*, *номинальный* и *согласованный*.

В режиме короткого замыкания выходные клеммы источника закорачиваются ($R_n = 0$), при этом в цепи остается только сопротивление источника r , поэтому *ток* в цепи становится *максимальным* и равным току короткого замыкания $I = I_{кз} = \frac{E}{r}$, а напряжение на

зажимах источника равным нулю ($U = 0$). При этом потребляемая от источника мощность ($P = IU = 0$) также равна нулю, следовательно, вся вырабатываемая мощность рассеивается внутри источника.

Примечание. Режим короткого замыкания опасен для источников, особенно с малым сопротивлением r .

Режим холостого хода (разомкнутой цепи) противоположен режиму короткого замыкания. В этом режиме нагрузка отключается от источника питания ($R_n = \infty$), поэтому ток в цепи становится равным нулю $I = 0$, а напряжение U на зажимах источника будет имеет

максимальное значение, равное ЭДС ($U = U_{xx} = E$). В этом случае мощность ($P = IU = 0$) от источника также не потребляется, т. е. источник работает в режиме холостого хода. Такой режим работы используется тогда, когда необходимо получить от источника большое напряжение.

Из анализа этих двух режимов можно определить параметры источника: его ЭДС E и внутреннее сопротивление r :

$$E = U_{xx} \quad \text{и} \quad r = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}.$$

Номинальный режим. Если сопротивление нагрузки установить в несколько раз больше сопротивления источника ($R_n \gg r$), то потери напряжения внутри генератора малы, а напряжение на зажимах источника близко к ЭДС. Такой режим работы источника принято называть *режимом номинальной нагрузки* (точка 3 на рис. 8, б), который используется для мощных источников ЭДС.

Согласованный режим электрической цепи обеспечивает максимальную передачу активной мощности P от источника питания к потребителю. При подключении к источнику нагрузки в цепи возникает ток $I = \frac{E}{r + R_n}$, при этом на нагрузке выделяется активная

мощность:

$$P = I^2 R_n = E^2 \frac{R_n}{(r + R_n)^2} = \frac{E^2}{R_n} \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{R_n}\right)^2}. \quad (3)$$

Примерный график зависимости активной мощности P от сопротивления нагрузки R_n при фиксированной величине внутреннего сопротивления источника r приведён на рис. 9.

Для определения соотношения между внутренним сопротивлением источника r и сопротивлением нагрузки R_n , при котором в сопротивлении нагрузки выделяется максимальная мощность, необходимо взять частную производную мощности P по R_n (уравнение (3)) и приравнять её к нулю:

$$\frac{dP}{dR_n} = \frac{E^2}{(r + R_n)^2} (r^2 - R_n^2) = E^2 \frac{r - R_n}{r + R_n} = 0.$$

Отсюда следует, что согласование наступает при условии равенства сопротивлений:

$$R_n = r. \quad (4)$$

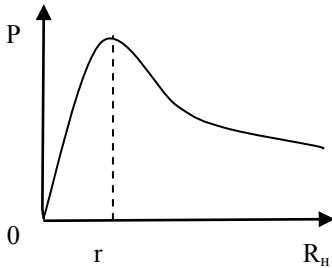


Рис. 9. Зависимость активной мощности от сопротивления нагрузки

Подставив (4) в (3), получим значение максимальной мощности, которая может быть выделена в нагрузке R_n :

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{E^2}{4R_n}.$$

Следовательно, полная мощность, развиваемая источником, равна: $P = \frac{E^2}{2r}$, т. е. коэффициент полезного действия при согласованном режиме работы равен 0,5.

Следует отметить, что рассмотренное выше условие согласования сопротивлений источника сигнала и нагрузки справедливо и в цепях переменного тока, только в последнем случае необходимо согласование как активных, так и реактивных составляющих сопротивлений.

Некоторые сведения об электроизмерительных приборах

Электроизмерительные приборы предназначены для измерения тока I , напряжения U , мощности P , частоты f , фазы φ , сопротивления R , индуктивности L , ёмкости C и других электрических величин. Они весьма разнообразны по принципу действия (прил. 1) и конструктивному оформлению. Измерительные приборы классифицируются по различным признакам:

- по физическим явлениям, на которых основана их работа – *электромеханические* и *электронные*;
- по виду выдаваемой информации – *аналоговые* и *цифровые*;
- по способу представления информации – *показывающие*, *регистрарующие*, *самопишущие*, *печатающие* и т. д.

Если показания прибора являются непрерывной функцией измеряемой величины, то такой прибор называется *аналоговым* (см. прил. 1). Цифровые измерительные приборы выдают значение измеряемой величины в цифрах (одна цифра скачком сменяет другую), т. е. ответ получается квантованным, хотя измеряемая величина меняется плавно.

Приборы для измерения тока и напряжения

При проведении экспериментов наиболее часто приходится измерять ток, напряжение и сопротивление.

Измерение тока и напряжения осуществляется в цепях постоянного тока, переменного тока широкого диапазона частот и в импульсных цепях. Выбор измерительных приборов, в основном, определяется родом измеряемого тока, амплитудным и частотным диапазоном, формой измеряемого сигнала и погрешностью измерения.

Измерение тока и напряжения производится, как правило, амперметрами и вольтметрами, которые могут быть электромеханическими или цифровыми.

Эквивалентные схемы амперметров и вольтметров

Эквивалентная схема амперметра. Независимо от того, являются амперметры электромеханическими или цифровыми, их можно представить общей эквивалентной схемой (рис. 10), состоящей из A – идеального амперметра, имеющего нулевое сопротивление, и R_A – сопротивления амперметра.

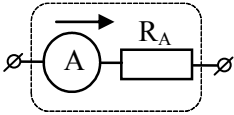


Рис. 10. Эквивалентная схема амперметра

Амперметр включается в разрыв цепи (рис. 11), в которой измеряется ток, т. е. последовательно с сопротивлением R_n , на которое нагружен источник ЭДС E , имеющий сопротивление r . Поскольку амперметр имеет сопротивление R_A , то после его включения ток в цепи уменьшится.

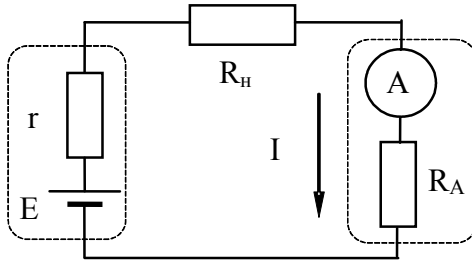


Рис. 11. Эквивалентная схема цепи для измерения тока: E – источник ЭДС; r – его внутреннее сопротивление; R_n – сопротивление нагрузки; A – идеальный амперметр (с нулевым сопротивлением); R_A – сопротивление амперметра

Определим условие, при котором амперметр не вносит искажений в исследуемую цепь. Ток в цепи до включения амперметра:

$$I_0 = \frac{E}{R_n + r},$$

после включения амперметра:

$$I_A = \frac{E}{R_n + r + R_A}.$$

Из этих уравнений следует, что только при выполнении условия $R_A \ll (R_n + r)$ амперметр не вносит заметного изменения в режим работы цепи. Таким образом, сопротивление амперметра должно быть *много меньше* суммарного сопротивления цепи, в которой измеряется ток. Если это условие не выполняется, то общая погрешность измерения тока будет равна сумме погрешности прибора, определяемой по его классу точности, и погрешности за счёт введения в схему амперметра.

Измерение тока можно провести *косвенным* методом с использованием вольтметра. Для этого в разрыв цепи нужно включить известное сопротивление R , измерить на нем падение напряжения U , а затем по закону Ома рассчитать ток I : $I = U/R$.

Эквивалентная схема вольтметра. Вольтметры также могут быть электромеханическими (аналоговыми) или цифровыми, их можно представить эквивалентной схемой (рис. 12), состоящей из идеального вольтметра V , имеющего бесконечно большое сопротивление, и эквивалентного сопротивления R_V .

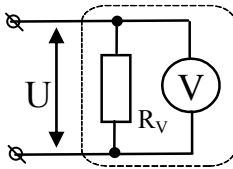


Рис. 12. Эквивалентная схема вольтметра

Вольтметр включается параллельно участку цепи, на котором измеряется падение напряжения (рис. 13), поэтому при подключении вольтметра в его цепь ответвляется ток, что приводит к уменьшению падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_n .

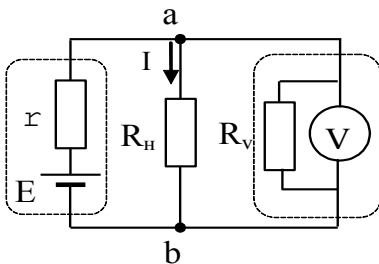


Рис. 13. Схема включения вольтметра:

E – источник ЭДС; r – его внутреннее сопротивление; R_n – сопротивление нагрузки; V – идеальный вольтметр (с бесконечным сопротивлением); R_V – сопротивление вольтметра

Если до подключения вольтметра ток в цепи I и падение напряжения на сопротивлении R_n были равны соответственно

$$I = \frac{E}{R_n + r}, \quad U_{ab} = E \frac{R_n}{R_n + r}, \quad (5)$$

то после включения:

$$I^* = \frac{E}{R^* + r}, \quad U_{ab}^* = E \frac{R^*}{R^* + r}, \quad \text{где } R^* = \frac{R_n R_V}{R_n + R_V}. \quad (6)$$

Если потребовать выполнение двух условий: чтобы при измерении не изменялся как ток в цепи, так и напряжение на сопротивлении, то необходимо, чтобы сопротивление вольтметра значительно превышало сопротивление нагрузки. Действительно, из выражений (5) и (6) следует, что требования $U_{ab} \cong U_{ab}^*$ и $I \cong I^*$ приводят к условию $R_V \gg R_n$. Если условие неизменности тока и напряжения не обязательно, то возможно измерение напряжения и без выполнения условия $R_V \gg R_n$.

Требования к проведению измерений можно сформулировать следующим образом: изменения тока и напряжения, вызванные подключением приборов, должны *быть меньше погрешности, с которой требуется выполнить эти измерения*. В одних случаях существенным требованием является неизменность тока, в других – неизменность напряжения.

Следует отметить, что, хотя аналоговые амперметры и вольтметры измеряют разные физические величины и по-разному включаются в цепь, но принципиальной разницы в их устройстве нет. Поэтому один и тот же прибор можно использовать как в качестве амперметра, так и в качестве вольтметра в зависимости от соотношения его внутреннего сопротивления и сопротивления элементов цепи, в которой производится измерение (исключение составляет электростатический вольтметр). Например, если к амперметру последовательно подключить известное (достаточно большое) сопротивление, то получим прибор для измерения напряжений, и, наоборот, если параллельно к вольтметру подключить (известное и достаточно малое) сопротивление, то вольтметр вместе с шунтом можно включать последовательно в цепь и измерять ток. Естественно, показания этих приборов необходимо будет пересчитать в требуемые значения.

В заключение отметим, что основное требование к *любому* измерительному прибору сводится к *минимизации влияния* прибора на объект измерения.

Изменение пределов измерения электроизмерительных приборов

Многие измерительные приборы являются многопредельными. В *аналоговых* приборах изменение пределов измерения для амперметра достигается параллельным подключением дополнительного сопротивления (шунта $R_{ш}$), уменьшающего ток, протекающий через измерительный механизм. В вольтметрах изменение пределов измерений производится последовательным подключением дополнительных сопротивлений $R_{д}$ (рис. 14).

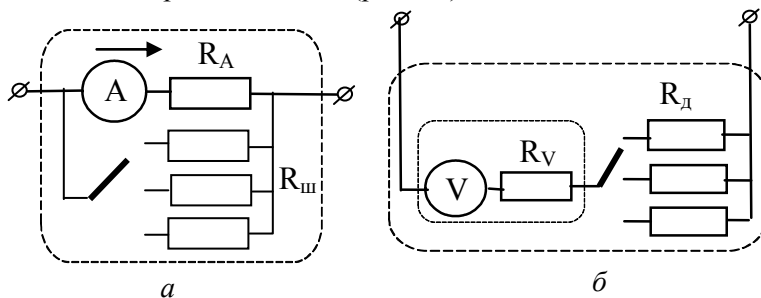


Рис. 14. Схема многопредельного амперметра (а) и вольтметра (б) (измерительный механизм реагирует на ток и имеет нулевое сопротивление)

Обычно многопредельные измерительные приборы имеют одну шкалу, размеченную в относительных единицах. В таком случае значение измеряемой величины X определяется по формуле

$$X = nA_{max} / N,$$

где n – показание стрелки прибора в относительных единицах; N – полное число делений шкалы; A_{max} – предельное значение шкалы на данном диапазоне измерения.

Для вольтметров электростатической системы изменение пределов измерения производится механическим изменением расстояния между неподвижным и подвижным электродом.

Примечание. Сопротивление цифровых вольтметров постоянное для всех пределов измерения (см. прил. 1).

Измерение сопротивлений

Измерение сопротивлений можно проводить прямым методом (с использованием омметров), косвенным (метод вольтметра-амперметра) и компенсационным (раб. 4.2).

Приложение 1

Принцип действия некоторых электроизмерительных приборов

Аналоговые электромеханические приборы

Измерительный механизм аналоговых электромеханических приборов имеет, как правило, подвижную и неподвижную части. Электромагнитная энергия, подведенная к прибору из измерительной цепи, преобразуется в механическую энергию углового перемещения подвижной части относительно неподвижной. По перемещению подвижной части судят об измеряемой величине.

В зависимости от того, какое физическое явление положено в основу работы прибора, различают следующие системы: магнитоэлектрическую, электростатическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую и др.

Расшифровка условных обозначений, нанесенных на шкалы электромеханических приборов, приведена в прил. 2.

Магнитоэлектрическая система (МЭ)

Работа приборов этой системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля измеряемого тока, проходящего по обмотке подвижной катушки (рамки).

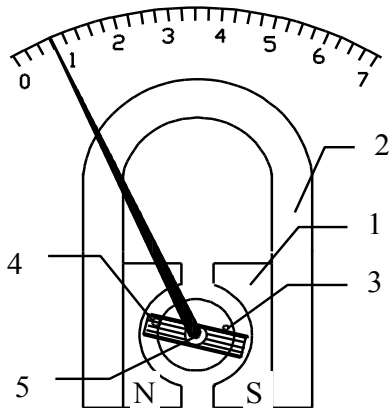


Рис. 15. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

Магнитное поле создается между полюсными наконечниками постоянного магнита 2 и цилиндрическим сердечником 3 из магнитомягкого материала (рис. 15). Легкая подвижная рамка 4 насажена на ось 5 и может поворачиваться вокруг сердечника в сильном и достаточно однородном радиальном магнитном поле за-

зора. К рамке прикреплена стрелка (или зеркальце), которая удерживается в нулевом положении двумя пружинами. При любом угле поворота рамки нормаль к плоскости, в которой находятся витки, перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} магнитного поля постоянного магнита. При протекании по рамке постоянного тока I на ее витки действует пара сил, создающая вращающий момент $\vec{M}_{BP} = [\vec{m}\vec{B}]$, где $\vec{m} = nI\vec{S}$ – магнитный момент рамки, n и S – число витков и площадь соответственно. Противодействующий момент M_{PP} создают пружины $M_{PP} = k\varphi$ (k – коэффициент упругости пружины; φ – угол поворота рамки).

В положении равновесия $M_{BP} = M_{PP}$, тогда $\varphi = \frac{nSB}{k}I$. Отсюда

следует, что угол поворота рамки (и стрелки прибора) пропорционален измеряемому току, поэтому шкала прибора магнитоэлектрической системы равномерная.

При изменении направления тока изменяется направление вращающего момента и соответственно отклонение стрелки. Поэтому для измерения тока различной полярности используют приборы, имеющие нулевую отметку на середине шкалы.

Для измерения в цепях переменного тока требуется предварительное преобразование переменного тока в постоянный.

Итак, приборы магнитоэлектрической системы используются для измерений в цепях постоянного тока, имеют равномерную шкалу, высокую чувствительность, высокую точность (класс точности – до 0,05), малую чувствительность к внешним помехам.

Электромагнитная система (ЭМ)

Работа приборов электромагнитной системы основана на взаимодействии магнитного поля измеряемого тока с подвижным ферромагнитным сердечником. При прохождении по неподвижной катушке I (рис. 16) измеряемого тока I возникает магнитное поле, пропорциональное току. Магнитное поле, действуя на сердечник 2, намагничивает его. В результате он втягивается внутрь катушки. При этом сердечник, эксцентрично насаженный на ось 3, поворачивается до тех пор, пока вращающий момент M_{BP} не уравнивается противодействующим моментом M_{PP} пружин 4. Магнитное поле катушки пропорционально измеряемому току $H \sim I$. Намагни-

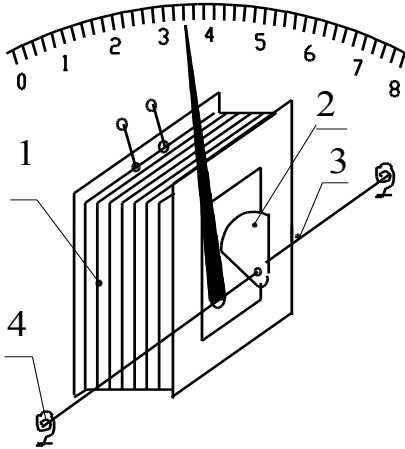


Рис. 16. Устройство прибора электромагнитной системы

ченность сердечника в рабочих диапазонах частоты и амплитуды пропорциональна магнитному полю, а следовательно, току. Поэтому вращающий момент M_{BP} будет пропорционален I^2 . Противодействующий момент пружин $M_{ПР} = k_I \varphi$. Равновесие стрелки будет достигнуто при равенстве моментов $M_{BP} = M_{ПР}$, тогда $\varphi = kI^2$. Отсюда следует, что шкала прибора должна быть квадратичной, но подбором сердечника специальной формы добиваются более равномерной шкалы на большей части диапазона измерения.

Однако начальная часть шкалы прибора при этом выходит за класс его точности и считается нерабочей.

Поскольку φ является функцией I^2 , знак угла поворота не зависит от направления тока в катушке. Поэтому приборы электромагнитной системы одинаково пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока. Если по катушке пропускать переменный ток $I = I_0 \sin(\omega t)$, то мгновенное значение вращающего момента $m(t) = k_1 I_0^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} k_1 I_0^2 (1 - \cos 2\omega t)$. В силу инерционности прибор реагирует на среднее значение вращающего момента за период

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} k_1 I_0^2 (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{1}{2} k_1 I_0^2.$$

Из полученного соотношения следует, что вращающий момент, а следовательно, и отклонение стрелки прибора пропорциональны среднему значению квадрата измеряемого тока $\varphi = kI_0^2/2$.

Напомним, что среднеквадратичное значение сигнала за период определяется по формуле

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

Среднеквадратичное значение называют также действующим (эффективным). Для синусоидального сигнала $I_{эф} = \sqrt{I^2} = I_0 / \sqrt{2}$.

К *достоинствам* приборов электромагнитной системы можно отнести возможность измерения постоянных и переменных токов, простоту конструкции, прочность. *Недостатки*: неравномерность шкалы, малая точность, малая чувствительность, малый частотный диапазон, влияние внешних магнитных полей, невозможность измерения на начальном участке шкалы.

Электростатическая система (ЭС)

Принцип действия электростатического прибора основан на взаимодействии электрически заряженных проводников. Измерительная часть представляет плоский воздушный конденсатор, состоящий из неподвижного 1 и подвижного 2 электродов (рис. 17). При подаче напряжения U на электроды между ними возникает сила электростатического взаимодействия $F = k'q^2 = kU^2$. Под действием этой силы подвижная пластина 2, закрепленная вместе со стрелкой (зеркальцем) на оси 3, втягивается в пространство между неподвижными пластинами, создавая вращающий момент $M_{вр} \sim U^2$. Движение пластины прекращается, когда противодействующий момент закрученной пружины $M_{пр} \sim k_1\phi$ становится равным вращающему моменту. Из условия равенства моментов следует, что угол отклонения ϕ определяется квадратом измеряемого напряжения $\phi = kU^2$.

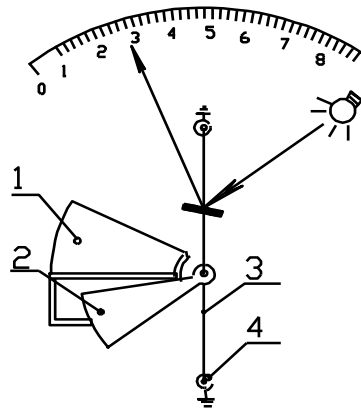


Рис. 17. Устройство электростатического вольтметра

Квадратичная зависимость показаний электростатического прибора вносит те же особенности в его характеристику, что и для приборов электромагнитной системы:

- 1) возможность измерения постоянных и переменных напряжений;
- 2) неравномерность шкалы;
- 3) наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Аналогично прибору электромагнитной системы при подаче переменного напряжения угол отклонения стрелки φ будет пропорционален $\overline{U^2}$:

$$\varphi = k\overline{U^2} = k \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt.$$

Шкала электростатического вольтметра, так же как и шкала приборов электромагнитной системы, градуируется в единицах эффективного напряжения $\sqrt{\overline{U^2}}$.

Достоинствами приборов электростатической системы являются высокое входное сопротивление ($> 10^{10}$ Ом), возможность измерения постоянных и переменных напряжений, достаточно широкий частотный диапазон.

Благодаря высокому входному сопротивлению R заряд на электродах вольтметра сохраняется довольно длительное время, несмотря на малую емкость ($C \sim 10$ пф). **Поэтому перед установкой указателя вольтметра на «0» необходимо снять сторонний заряд, замкнув входные клеммы.**

К *недостаткам* следует отнести низкую чувствительность, невысокую точность, необходимость экранировки от внешних электрических полей, чувствительность к чистоте и влажности воздуха и чистоте поверхности изоляторов входных клемм, неравномерность шкалы, наличие нерабочего участка в начале шкалы.

Примечание. Электрическая схема электростатического вольтметра приведена на рис. 18. Измерительная цепь вольтметра содержит защитное сопротивление $R = 1$ кОм, предохраняющее измерительный механизм от повреждения при случайном замыкании между неподвижными и движущимися электродами, например при резком толчке во время измерения. Для экранировки прибора от

внешних электрических полей его корпус изнутри покрывается проводящим составом, соединенным с клеммой «экран».

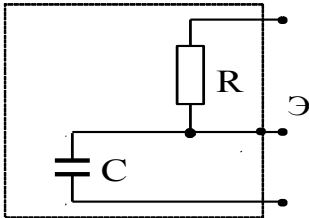


Рис. 18. Схема электро-статического вольтметра

При измерении напряжения постоянного тока и переменного до 20 кГц вольтметр следует включать по схеме с защитным сопротивлением, на частотах выше 20 кГц – без защитного сопротивления, а на частотах выше 1 МГц длина соединительных проводов должна быть минимальной. Несоблюдение этого условия приводит к появлению большой частотной погрешности.

Цифровые измерительные приборы

Цифровые измерительные приборы многопредельны и универсальны и предназначены для измерения постоянного и переменного напряжения, тока, сопротивления, частоты, фазы, мощности, интервалов времени, индуктивности, ёмкости и т. д.

Во всех цифровых измерительных приборах (рис. 19) используются аналоговые усилители и другие электронные блоки для

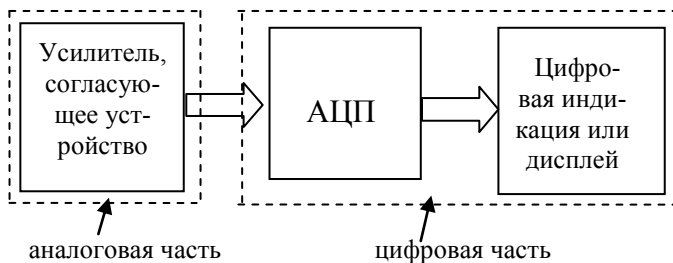


Рис. 19. Блок-схема цифрового прибора

преобразования входного сигнала в электрический сигнал, который затем преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Далее цифровое значение измеренной величи-

ны подвергается преобразованиям, необходимым для вывода на индикатор (дисплей), который может быть светодиодным, вакуумным люминесцентным или жидкокристаллическим, либо записывается в память.

Отметим, что усилитель в цепи цифрового измерительного прибора играет роль согласующего звена между входным сигналом и АЦП. Если измеряемый сигнал слабый (маленькая амплитуда), то будут задействованы только младшие разряды АЦП, и измерения будут иметь плохую точность. Для более точного измерения необходимо задействовать максимум разрядов АЦП. Это выполняется изменением диапазона измерения. Если сигнал имеет амплитуду больше установленного диапазона, то происходит сбой работы АЦП, о чем сигнализирует индикация результатов измерений. В некоторых приборах есть возможность автоматического выбора диапазона измерения, что осуществляется изменением коэффициента усиления (ослабления) под разрядность АЦП.

Второй важной характеристикой усилителя является его частотный диапазон. Обычно частотный диапазон указывается в описании прибора совместно с величиной погрешности. Таким образом, рабочий диапазон частот цифрового измерительного прибора – это полоса частот, в которой измерения выполняются с заданной точностью.

По сравнению с аналоговыми цифровые приборы, как правило, имеют следующие преимущества:

- более широкий рабочий диапазон частот;
- высокую точность;
- быстродействие;
- получение результатов измерения в удобной для считывания форме;
- возможность ввода результатов измерения в ЭВМ.

Цифровые измерительные приборы автоматически преобразуют непрерывно меняющуюся во времени величину в дискретную форму (рис. 20), затем подвергают цифровому кодированию и выдают результат измерения в цифровом виде. Любая непрерывная величина, ограниченная некоторыми предельными значениями, может быть дискретизирована во времени и квантована по уровню.

Преобразование текущего значения напряжения в цифровой код осуществляется АЦП, основными характеристиками которого являются быстродействие и количество двоичных разрядов квантования измеряемого напряжения.

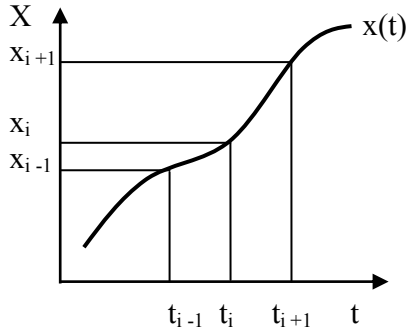


Рис. 20. Преобразование непрерывной величины в дискретную

Дискретизация – преобразование непрерывной величины $x(t)$ в дискретную последовательность x_i , при этом сохраняется её текущее значение только в определенные моменты времени t_i . Следовательно, при дискретизации теряется часть информации о сигнале. Преобразование непрерывного (аналогового) сигнала выполняется за конечный временной интервал (иногда очень малый), который называется временем усреднения измеряемой величины.

В автоматическом режиме цифровой прибор выводит значения измеряемой величины через определённые промежутки времени, например, несколько раз в секунду. Иногда последовательность x_i записывается в память прибора, усредняется, а затем выводится на дисплей.

Шаг дискретизации – промежуток Δt между соседними отсчетами по времени. В большинстве случаев интервал времени между измерениями, или шаг дискретизации, устанавливается одинаковым. Частота дискретизации $f = 1/\Delta t$. Шаг дискретизации не может быть меньше времени, затраченного АЦП на одно преобразование. Количество разрядов АЦП определяет динамический диапазон цифрового прибора. (Например, осциллограф Tektronix имеет $2^8 = 256$ уровней дискретизации напряжения, но высокую частоту дискретизации.) Современные АЦП имеют от 6 до 24 двоичных разрядов для квантования входного напряжения.

Цифровой вольтметр

Среди цифровых измерительных приборов особое место занимают цифровые вольтметры постоянного тока. В цифровых вольтметрах постоянного тока измеряемое напряжение подается на входное согласующее устройство, в котором с помощью делителя это напряжение приводится к номинальному значению и далее поступает на усилитель постоянного тока (см. рис. 19). **В совокупности согласующий каскад цифрового вольтметра имеет постоянное сопротивление на всех пределах измерения.**

Цифровой вольтметр создаётся на основе АЦП с единственным диапазоном измерения (обычно 10 В). Очевидно, что цифровой вольтметр должен иметь несколько диапазонов измеряемых напряжений. Расширение диапазона измерений производится с помощью усиления слабых по величине сигналов (усилителем) или ослабления больших – делителем с 10-кратным изменением пределов.

На основе цифровых вольтметров постоянного тока создаются цифровые мультиметры, с помощью которых можно измерять другие величины, например, *переменное напряжение, ток, сопротивление* и т. д.

Измерение *переменного напряжения* в разных мультиметрах осуществляется по-разному. В некоторых приборах (например, мультиметр DT838) путем выпрямления и сглаживания осуществляется преобразование переменного напряжения в постоянное, которое затем измеряется вольтметром постоянного тока, и полученная величина зависит от формы переменного напряжения. В других приборах (например, мультиметр GDM-8145) проводится оцифровка переменного напряжения на некотором интервале времени и непосредственное вычисление требуемой величины, что приводит к независимости ее от формы. Преобразование выполняется для получения среднего, среднеквадратического и амплитудного значений. Погрешность цифровых вольтметров переменного тока больше погрешности цифровых вольтметров постоянного тока и зависит от частотного диапазона.

Измерение тока цифровыми приборами производится косвенным методом. Измеряемый ток протекает через шунт мультиметра R , падение напряжения U_R на котором усиливается усилителем, оцифровывается, переводится в единицы измерения тока и индицируется.

Величина сопротивления определяется путём пропускания через измеряемый резистор точно известного тока и измерения падения напряжения на нём. Далее производится расчёт по закону Ома, перевод в единицы измерения сопротивления и индикация.

Цифровой мультиметр GDM-8145

Используемый в данной работе цифровой мультиметр серии GDM-8145 является универсальным прибором для измерения постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления постоянному току, проверки *p-n*-переходов. Мультиметр GDM-8145 имеет преобразователь среднеквадратического значения, поэтому он **обеспечивает измерение среднеквадратического значения переменного напряжения / тока произвольной формы, с постоянной и без постоянной составляющей.**

Органы управления мультиметра GDM-8145

Кнопки:

ON / OFF – включение / выключение питания прибора;

AC / DC – выбор режима измерения переменного тока / напряжения или постоянного тока / напряжения;

V, mA, k Ω – режим измерения напряжения, тока, сопротивления соответственно;

2, 20.... – выбор пределов измерений;



+ – измерение суммы переменной и постоянной составляющей;

□ – измерение только переменной составляющей.

Эти два режима используются только при измерении переменного тока / напряжения.

Гнезда:

COM – общий (для отрицательного провода);

COM-2A – для измерения токов до 2 ампер;

COM-20A – для измерения токов до 20 ампер;

COM – V, Ω – для измерения напряжения, сопротивления.

Входное сопротивление:

- в режиме измерения напряжения – 10 Мом;
- в режиме измерения тока $R_A = 0,3 \text{ В/}I_{\text{предельное}}$, т. е. зависит от выбранного предела измерения.

Прибор обеспечивает технические характеристики только после 15-минутного прогрева.

Цифровой мультиметр DT838

Цифровой мультиметр DT838 предназначен для измерения постоянного, переменного напряжения, постоянного тока, сопротивления, температуры, проверки диодов и транзисторов.

Выбор функций и диапазонов измерений, а также включение и выключение прибора производится с помощью переключателя.

Гнезда:

COM – общий (отрицательный провод);

V, Ω , mA – для положительного провода при измерении сопротивления, постоянного и переменного напряжения, тока, кроме тока 10 А.

При измерении постоянных напряжений / токов переключатель пределов установите на требуемый предел **DCV/DCA**. Если измеряемое значение заранее неизвестно, необходимо установить на максимальный предел, а затем уменьшать его до тех пор, пока не получится необходимая точность измерений.

При измерении переменного напряжения установите переключатель пределов на соответствующий предел **ACV**, при этом показания прибора будут соответствовать **среднеквадратическому значению переменного напряжения синусоидальной формы**.

Примечание. Необходимо отметить, что в данном приборе в режиме измерения переменного тока не определяется истинное среднеквадратическое значение. В них ток предварительно выпрямляется (т. е. отрицательная часть сигнала инвертируется и становится положительной, например, с помощью диодного мостика), затем поступает в измерительную часть, где определяется среднее значение, и далее это значение умножается на коэффициент формы

$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$, и с учетом этого множителя калибруется шкала прибора.

Легко убедиться, что при таком способе измерения правильно опре-

деляется эффективное значение только для сигналов синусоидальной формы. Действительно, вычислим среднее значение выпрямленного синусоидального сигнала:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 |\sin(\omega t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_0 |\sin(\omega t)| dt = \frac{2}{\pi} U_0.$$

Отсюда видно, что если это значение умножить на коэффициент $\pi/2\sqrt{2}$, то получим эффективное напряжение.

Примечание. Технические данные измерительных приборов приведены в паспортных данных.

Приложение 2

Условные обозначения на шкалах приборов



– магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой.



– магнитоэлектрический прибор с выпрямителем.



– электромагнитный прибор.



– электростатический прибор.



– прибор работает в горизонтальном положении.



– прибор работает в вертикальном положении.



– класс точности прибора.



– прибор для измерения постоянного тока (напряжения).



– прибор для измерения переменного тока (напряжения).



– прибор для измерения постоянного и переменного тока (напряжения).

A – амперметр.

V – вольтметр.

W – ваттметр.

Ω – омметр.

mA – миллиамперметр.
mkA – микроамперметр.

Список литературы

Атамаян Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Дрофа, 2005.

Клаассен К. Б. Основы измерений. Д.: Изд-й дом «Интеллект», 2008.

Костюрина А. Г., Орлов Ю. А. Электроизмерительные приборы. Новосибирск, 2007.

Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.

Методы физических измерений / Под ред. Р. И. Солоухина. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975.

Работа 2.1

Электроизмерительные приборы и источники питания постоянного тока

Цель работы – познакомиться с устройством, принципом действия электромеханических и цифровых измерительных приборов; научиться проводить измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока, а также с режимами работы источников питания постоянного тока.

Оборудование: источники питания постоянного тока, вольтметры, амперметры, цифровые мультиметры, магазин сопротивлений, макетные платы.

Подготовка к проведению эксперимента

Перед выполнением задания изучите паспортные данные каждого из используемых приборов и соответствующий раздел приложения. Обратите внимание на погрешность прибора и его внутреннее сопротивление.

До включения измерительных приборов в схему установите максимальные пределы измерения соответствующих величин (если прибор многопредельный). При проведении измерений предел измерения измерительных приборов можно уменьшить таким образом, чтобы для аналогового прибора было максимальное (в пределах шкалы) отклонение стрелки, а для цифрового – максимальное (по модулю) цифровое значение, но не наступал режим перегрузки. Индикация режима перегрузки цифрового прибора осуществляется миганием или появлением нецифрового символа в первой позиции.

Цифровые приборы обеспечивают технические характеристики в пределах погрешности после 15-минутного прогрева, поэтому необходимо включить их в сеть предварительно: осциллограф **Tektronix** (кнопка на корпусе сверху), мультиметр GDM и генератор GFG (кнопка **Power**).

На генераторе предварительно установите минимальное значение выходного напряжения – ручка регулировки A_{mpl} повернута против часовой стрелки до упора.

При сборке электрических схем обращайтесь внимание на полярность включения приборов. Черный разъем мультиметров **COMMON** (общий) – для отрицательного провода, красный разъем **V, Ω , mA** – для положительного провода.

Примечание. Используемые обозначения на цифровых приборах: **DC** (*direct current*) – постоянный ток; **AC** (*Alternating Current*) – переменный ток и **TRUE RMS** (*Root Mean Square*) – истинное среднеквадратическое значение; **DC, A** – режим измерения постоянного тока; **DC, V** – режим измерения постоянного напряжения; **AC, A** – режим измерения переменного тока; **AC, V** – режим измерения переменного напряжения.

По окончании монтажа схемы перед включением источников питания обязательно пригласите преподавателя или дежурного инженера для проверки правильности сборки схемы и выбора режимов работы источника и измерительных приборов.

Перед демонтажем предварительно обесточьте схему, т. е. сведите к минимуму выходное напряжение источника и выключите сетевой тумблер.

Экспериментальные данные рекомендуется записывать в таблицы.

Все измеряемые величины должны быть приведены с учетом погрешности измерения и указанием размерности в виде $x \pm \Delta x$. Например: $(5,32 \pm 0,07)$ мВ.

Изучение влияния измерительного прибора на объект измерения

В данном разделе изучается влияние измерительного прибора (амперметра и вольтметра) на параметры *электрической цепи постоянного тока*.

Задание 1. Изучение влияния вольтметра на режим работы электрической цепи постоянного тока

Оборудование: вольтметр магнитоэлектрической системы М2044 (или аналогичный); цифровой мультиметр серии GDM-8145; источник питания постоянного тока Б5-47; панель с делителем напряжения.

1. Включите мультиметр GDM-8145, установите режим измерения сопротивления (нажать кнопку **kΩ**, предел измерения **200 kΩ**) и измерьте сопротивления (R_1 , R_2) делителя.

2. Установите на источнике выходное напряжение 20 В, ток 0,1 А, переведите мультиметр в режим измерения постоянного напряжения (кнопки **DC**, **V**) – предел измерения 20 В. Включите источник и измерьте разность потенциалов на его выходных клеммах.

3. Подключите делитель напряжения к источнику и измерьте мультиметром разность потенциалов в точках А, В. Сравните со значениями, полученными в п. 2. Рассчитайте падение напряжения на сопротивлении R_2 , используя данные п. 1.

4. Подключая два вольтметра поочередно, как показано на рис. 1, запишите в таблицу их показания. Измерение напряжения вольтметром магнитоэлектрической системы проведите на трех пределах шкалы: 75, 30 и 15 В.

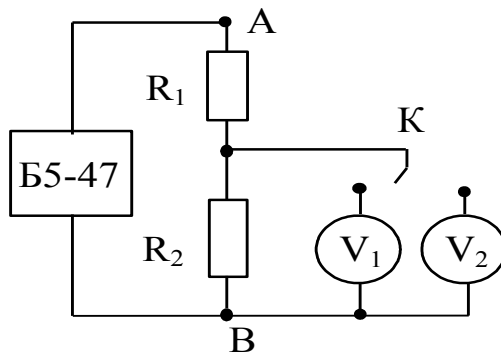


Рис. 1. Схема измерения напряжения:

Б5-47 – источник питания постоянного тока;

R_1 , R_2 – делитель напряжения ($R_1 \approx R_2 \approx 10^5$ Ом);

V_1 – вольтметр магнитоэлектрической системы;

V_2 – мультиметр GDM-8145; K – переключатель

5. Используя паспортные данные вольтметров, рассчитайте погрешности измерений ΔU . Сравните показания вольтметров, объясните их различие, а также отличие от расчетного значения, полученного в п. 3.

| Вольт-метр | Шкала, В | U , В | ΔU , В | $U_{\text{расч}}$, В | R_v , Ом | U , В при параллельном соединении | |
|------------|----------|---------|----------------|-----------------------|------------|-------------------------------------|-----|
| GDM | 20 | | | | | M2044 | GDM |
| M2044 | 75 | | | | | | |
| M2044 | 30 | | | | | | |
| M2044 | 15 | | | | | | |

Примечание. Сопротивление вольтметра магнитоэлектрической системы можно рассчитать по данным на его шкале.

6. Соедините вольтметры параллельно и запишите их показания в таблицу. Сравните полученные значения с данными п. 4.

Задание 2. Изучение влияния амперметра на режим работы электрической цепи постоянного тока

Оборудование: амперметр – цифровой мультиметр DT838 (или аналогичный); источник питания постоянного тока Б5-47; панель с сопротивлением $R \approx 10$ Ом.

1. Измерьте мультиметром величину сопротивления R .
2. Установите на источнике напряжение 0,1 В, ток 0,1 А. Включите источник и измерьте цифровым мультиметром GDM-8145 разность потенциалов на выходных клеммах. Используя полученное значение напряжения, рассчитайте ток в цепи при подключении сопротивления нагрузки R (без учёта сопротивления амперметра R_A) и запишите величину тока в таблицу.
3. Соберите схему (рис. 2), установите на амперметре режим измерения постоянного тока **DC, A**, предел измерения 200 мА.
4. Включите источник Б5-47, запишите в таблицу показания амперметра $I_{\text{эсп}}$ и погрешность измерения тока ΔI .

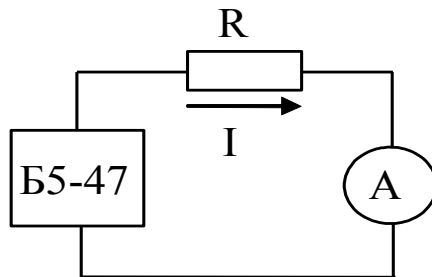


Рис. 2. Схема измерения тока:

Б5-47 – источник питания постоянного тока;*R* – сопротивление ≈ 10 Ом; *A* – мультиметр DT838

5. Переключите предел измерения амперметра на 20 мА, затем на 2 мА и запишите соответствующие значения тока с указанием погрешности. Объясните разницу показаний амперметра.

| Предел, мА | $I_{\text{эсп}}$, мА | ΔI , мА | R_A , Ом | I_p , мА (с учё- том R_A) | I_p , мА (без учёта R_A) |
|---------------|-----------------------|-----------------|------------|--------------------------------------|--|
| 200 | | | | | |
| 20 | | | | | |
| 2 | | | | | |

6. Зная выходное напряжение источника и сопротивление цепи, рассчитайте ток. Сравните расчетные I_p и измеренные $I_{\text{эсп}}$ значения тока.

7. Объясните полученные результаты. Сформулируйте требования к амперметру.

Примечание. Сопротивление амперметра можно измерить цифровым мультиметром, записав при этом протекающие через него токи.

Задание 3. Определение сопротивления электростатического вольтметра

Оборудование: электростатический вольтметр С-50, секундомер.

При измерении параметров электростатического поля используются электростатические вольтметры, принцип действия которых основан на взаимодействии заряженных проводников. Измерительной частью электростатического вольтметра является конденсатор, поэтому сопротивление вольтметра в основном связано с токами утечки и сильно зависит от влажности воздуха, загрязненности поверхностей и других факторов, т. е. от условий эксплуатации. Поэтому изготовитель в паспортных данных не указывает сопротивление вольтметра, но его можно оценить по времени разряда конденсатора. Известно, что изменение напряжения U во времени t при разряде ёмкости через сопротивление происходит по экспоненциальному закону:

$$U = U_0 \exp(-t / RC),$$

где R – сопротивление; C – ёмкость вольтметра (≈ 10 пф); U_0 – начальное напряжение.

1. Зарядите ёмкость электростатического вольтметра любым известным Вам методом и запишите изменение показаний вольтметра через некоторые интервалы времени или напряжения (например, 5 мин, или 5 В). Закончите измерения при уменьшении напряжения примерно в 2 раза или по истечении 40 минут.

Внимание. При проведении измерений требуется экранирование прибора от внешних электростатических помех. В противном случае вольтметр может не разряжаться, а перезаряжаться от внешних источников. При отсутствии экрана установите вольтметр как можно дальше (насколько позволяет рабочий стол) от источника помех.

2. По полученным экспериментальным данным постройте график зависимости $\ln(U / U_0)$ от времени t . Методом наименьших квадратов проведите прямую, по угловому коэффициенту которой, равному $-1/RC$, рассчитайте сопротивление вольтметра.

Примечание. Поскольку время разряда конденсатора достаточно большое, то рекомендуется одновременно выполнять задание 4.

Изучение режимов работы источников питания постоянного тока, и определение их параметров

Изучение режимов работы источников питания начнем с определения параметров: ЭДС (E) и сопротивления (r). Для этого рассмотрим *простейшую* электрическую цепь (рис. 3), состоящую из источника ЭДС E с внутренним сопротивлением r , нагруженного на внешнее сопротивление R .

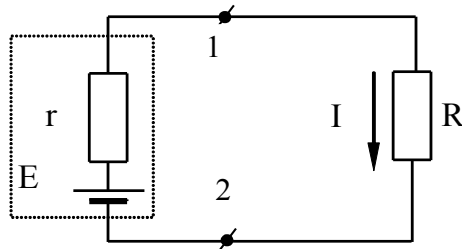


Рис. 3. Схема электрической цепи для определения параметров источника

Если в качестве нагрузочного сопротивления использовать вольтметр, сопротивление которого обозначим через R_v , то уравнение для такой цепи будет иметь следующий вид:

$$E = I_1(r + R_{v1}) = Ir + U_1,$$

где I_1 – ток, а $U_1 = IR_{v1}$ – показание вольтметра, равное падению напряжения на его сопротивлении.

Но одного уравнения недостаточно для определения двух параметров. Поэтому необходимо провести измерения разности потенциалов в точках 1, 2 другим вольтметром, сопротивление которого должно отличаться от значения R_{v1} . Записав систему уравнений для двух цепей

$$E = I_1(r + R_{v1}); \quad U_1 = I_1 R_{v1}; \quad (1)$$

$$E = I_2(r + R_{v2}); \quad U_2 = I_2 R_{v2}; \quad (2)$$

и решив её, получим выражения для расчета ЭДС E и сопротивления r источника (рекомендуется провести решение этой системы уравнений самостоятельно).

Задание 4. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника

Оборудование: источник питания постоянного тока с большим внутренним сопротивлением; цифровой мультиметр серии GDM-8145, вольтметр магнитоэлектрической системы серии M2044 (или аналогичный).

1. Соберите схему рис. 4. Включите мультиметр, установите режим измерения постоянного напряжения (кнопки **DC**, **V**) – предел измерения 200 В; для магнитоэлектрического прибора – предел измерения 150 В.

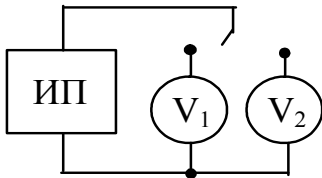


Рис. 4. Схема измерения напряжения:
ИП – источник питания постоянного тока с большим внутренним сопротивлением; V_1 – вольтметр магнитоэлектрической системы; V_2 – мультиметр GDM-8145

2. Измерьте напряжение на зажимах источника поочередно цифровым мультиметром и вольтметром магнитоэлектрической системы. Запишите в таблицу полученные значения напряжений U с указанием погрешности измерений ΔU и сопротивления используемых вольтметров R_v .

| Вольтметр | Шкала, В | U , В | ΔU , В | R_v , Ом |
|-----------|----------|---------|----------------|------------|
| GDM | 200 | | | |
| M2044 | 150 | | | |
| M2044 | 75 | | | |

4. Используя полученные значения напряжений и сопротивлений вольтметров, рассчитайте ЭДС источника E и его сопротивление r .

Задание 5. Изучение работы стабилизированного источника питания постоянного тока в режимах стабилизации тока и стабилизации напряжения

В зависимости от соотношения величины сопротивления источника r и нагрузки R один и тот же стабилизированный источник может работать как источник тока, или как источник напряжения.

Режим стабилизации тока реализуется при сопротивлениях нагрузки R , меньших по сравнению с сопротивлением источника r ($R \ll r$). В этом случае ток в цепи равен
$$I = \frac{E}{r + R} \approx \frac{E}{r} \approx \text{const},$$
 и

соответственно $U = I \cdot R \approx E \frac{R}{r}$, т. е. падение напряжения на нагрузке меняется пропорционально её сопротивлению.

В режиме стабилизации напряжения источник питания работает при условии, когда $r \ll R$. В этом случае ток в цепи
$$I = \frac{E}{r + R} \approx \frac{E}{R}$$
 (обратно пропорционален сопротивлению нагрузки), а напряжение на нагрузке $U = I \cdot R \approx E \approx \text{const}$, т. е. не зависит от сопротивления нагрузки.

В данном задании применяется стабилизированный источник питания, в котором используется обратная связь и внутреннее сопротивление источника считать постоянным можно только условно. В зависимости от заданных значений выходного напряжения и тока, источник (за счёт обратной связи) изменяет внутреннее сопротивление и (при подключении сопротивления нагрузки) реализует либо режим стабилизации напряжения, либо режим стабилизации тока, что определяется по световой индикации источника. При включении без нагрузки световой индикатор показывает режим стабилизации напряжения.

Оборудование: источник питания постоянного тока Б5-47, амперметр и вольтметр – цифровые мультиметры GDM-8145, R – магазин сопротивлений Р33.

1. Соберите схему рис. 5. Установите на источнике напряжение 12 В, ток 0,2 А, на магазине сопротивлений – 99,9 Ом, и соответствующие предельные значения тока и напряжения на мультиметрах 200 мА и 20 В.

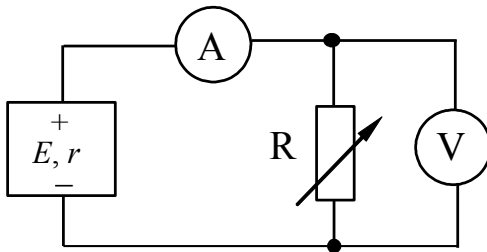


Рис. 5. Схема для изучения режимов работы источника: E – источник питания постоянного тока Б5-47; A – амперметр – мультиметр GDM-8145; V – вольтметр – мультиметр GDM-8145; R – магазин сопротивлений Р33

2. Уменьшая величину сопротивления нагрузки от 99,9 до 9,9 Ом с шагом 10 Ом, запишите в таблицу соответствующие значения тока и напряжения.

| R , Ом | U , В | I , мА | P , мВт |
|----------|---------|----------|-----------|
| 99,9 | | | |
| 89,9 | | | |
| ... | | | |
| 9,9 | | | |

3. Рассчитайте выделяемую на сопротивлении мощность P и постройте графики зависимости тока I , напряжения U и мощности P от сопротивления нагрузки R . Определите величину сопротивления нагрузки, соответствующей смене режима стабилизации. Сравните эту величину со значением, определенным из отношения напряжения к току, установленных на дисплеях источника.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие экспериментальные данные и результаты обработки.

Задание 1. Таблицу с экспериментальными данными измерения напряжения различными вольтметрами с указанием погрешности измерения. Указать причину различия показаний вольтметров. Сформулировать требование к вольтметру.

Задание 2. Таблицу со значениями токов, измеренных на различных пределах амперметра с указанием погрешности измерения, и сравнение их с расчётными. Сформулировать требование к амперметру.

Задание 3. Зависимость показаний электростатического вольтметра от времени, график зависимости $\ln(U / U_0) = f(t)$ и определенное из него сопротивление вольтметра.

Задание 4. Таблицу экспериментальных данных и значения ЭДС и сопротивления источника.

Задание 5. Таблицу экспериментальных данных, графики зависимостей тока, напряжения, мощности от сопротивления нагрузки, а также величину сопротивления нагрузки, соответствующую смене режима работы источника, и значение сопротивления источника.

Порядок установки режима работы источника НУ1503D

- Поверните по часовой стрелке ручку регулировки тока **Current** примерно в среднее положение.
- Включите сетевой тумблер **ON/OFF**.
- Ручкой регулировки напряжения **Voltage** установите выходное напряжение ~ 12 В.
- Соедините выходные клеммы проводом и ручкой регулировки тока **Current** выставьте величину тока $\sim 0,2$ А.
- Нажатием кнопки **ON/OFF** выключите питание источника.

Подсоедините к выходным клеммам рабочую схему и включите питание источника.

Работа 2.2

Основы измерений в цепях переменного тока

Цель работы – познакомиться с принципом действия цифровых измерительных приборов; научиться проводить измерения в цепях переменного тока, определить рабочий диапазон по частоте различных цифровых мультиметров, провести измерение величины напряжения сигналов сложной формы и определить режимы работы источника гармонических сигналов.

Оборудование: генератор гармонических сигналов типа GFG, цифровые мультиметры типа GDM-8145, DT838 (или аналогичный), осциллограф, диод, макетные платы, тройник-разветвитель.

Электрические измерения в цепях постоянного и переменного тока существенно различаются как по используемым приборам, так и по методам измерения. В цепях переменного тока измеряемые величины могут зависеть от частоты, характера их изменения, а также от того, какие характеристики переменных электрических величин (мгновенные, действующие, максимальные, средние) измеряются.

Электрическая цепь переменного тока

Схема простейшей электрической цепи переменного тока представлена на рис. 1, где Γ – источник сигналов произвольной формы

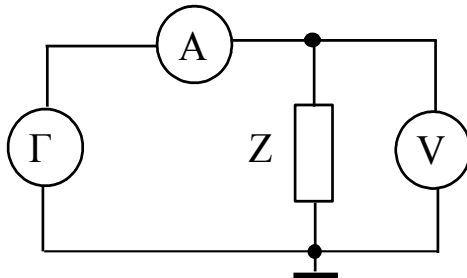


Рис. 1. Схема простейшей электрической цепи переменного тока: Γ – генератор сигналов, A – амперметр, V – вольтметр, Z – сопротивление нагрузки

и диапазона частот; A и V – измерительные приборы (мультиметры); Z – сопротивление нагрузки, которое может иметь активную

(R) и реактивную составляющие, т. е. индуктивное ($Z_L = \omega L$) и ёмкостное ($Z_C = 1/\omega C$) сопротивления: $Z = R + i(Z_L + Z_C)$.

В данной работе источником переменного напряжения является генератор типа **GFG**, на выходе которого можно получить сигналы синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы.

В качестве нагрузки используется магазин сопротивлений марки **P33**, декады которого выполнены в виде катушек, поэтому при работе на высоких частотах необходимо учитывать индуктивное и ёмкостное сопротивления. В данной работе P33 используется в задании 4, в котором рекомендуемая частота мала (≈ 100 Гц) и влиянием реактивных составляющих можно пренебречь.

Если для электрических измерений в цепях постоянного тока наиболее широко применяют магнитоэлектрические и цифровые приборы, то в цепях переменного тока – электромагнитные, электростатические, электродинамические, цифровые измерительные приборы и осциллографы (см. прил. 1).

В данной работе используются только цифровые измерительные приборы (мультиметры). Использование цифровых приборов в большинстве измерений предпочтительнее, так как они имеют высокую точность, более удобны при снятии показаний и универсальны. Цифровые универсальные измерительные приборы (мультиметры) применяются для измерения с достаточно высокой точностью сопротивления постоянному току, напряжения и тока как постоянного, так и переменного.

Цифровые приборы имеют много диапазонов с 10-кратным изменением. Эти диапазоны создаются с помощью усиления малых по величине сигналов и ослабления больших.

Подготовка к проведению эксперимента

Перед выполнением задания изучите паспортные данные каждого из используемых приборов и соответствующий раздел приложения. Обратите внимание на погрешность прибора и его внутреннее сопротивление.

До включения измерительных приборов в схему установите максимальные пределы измерения соответствующих величин (если прибор многопредельный). При проведении измерений предел измерения измерительных приборов можно уменьшить таким обра-

зом, чтобы для аналогового прибора было максимальное (в пределах шкалы) отклонение стрелки, а для цифрового – максимальное (по модулю) цифровое значение, но не наступал режим перегрузки. Индикация режима перегрузки цифрового прибора осуществляется миганием или появлением нецифрового символа в первой позиции.

Цифровые приборы обеспечивают технические характеристики в пределах погрешности после 15-минутного прогрева, поэтому необходимо включить их в сеть предварительно: осциллограф **Tektronix** (кнопка на корпусе сверху), мультиметр GDM и генератор GFG (кнопка **Power**). **На генераторе предварительно установите минимальное значение выходного напряжения – ручка регулировки Ampl повернута против часовой стрелки до упора.**

При сборке электрических схем обращайтесь внимание на полярность включения приборов. Черный разъем мультиметров **COMMON** (общий) – для отрицательного провода, красный разъем **V, Ω , mA** – для положительного провода.

Примечание. Используемые обозначения на цифровых приборах: **DC** (*direct current*) – постоянный ток; **AC** (*Alternating Current*) – переменный ток и **TRUE RMS** (*Root Mean Square*) – истинное среднеквадратическое значение; **DC, A** – режим измерения постоянного тока; **DC, V** – режим измерения постоянного напряжения; **AC, A** – режим измерения переменного тока; **AC, V** – режим измерения переменного напряжения.

По окончании монтажа схемы перед включением источников питания обязательно пригласите преподавателя или дежурного инженера для проверки правильности сборки схемы и выбора режимов работы источника и измерительных приборов.

Перед демонтажем предварительно обесточьте схему, т. е. сведите к минимуму выходное напряжение источника и выключите сетевой тумблер.

Экспериментальные данные рекомендуется записывать в таблицы.

Все измеряемые величины должны быть приведены с учетом погрешности измерения и указанием размерности в виде $x \pm \Delta x$. Например: $(5,32 \pm 0,07)$ мВ.

Изучение влияния частоты измеряемого сигнала на показания вольтметров

Измерительные приборы, как правило, могут измерять как постоянные, так и переменные токи (напряжения). Рабочий интервал частот для различных типов (серий) измерительных приборов может значительно отличаться. Рабочим интервалом частот является диапазон частот, в котором указано значение его погрешности. Для экспериментального определения рабочего интервала частот необходимо снять амплитудно-частотную характеристику – зависимость показаний прибора от изменения частоты для гармонического сигнала (синусоидальной формы). Примерный вид амплитудно-частотной характеристики приведен на рис. 3.

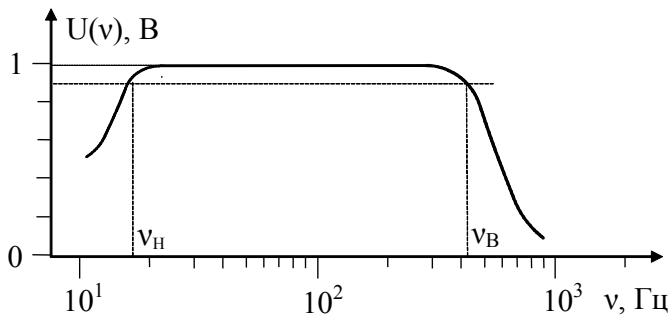


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика

Задание 1. Определение рабочего интервала частоты вольтметров

Оборудование: генератор GFG 8255; вольтметры – цифровые мультиметры GDM-8145 и DT838, разветвитель – тройник.

Перед проведением измерений наблюдайте, как изменяются показания вольтметра во времени на очень низкой частоте. Установите генератор GFG в режим генерации синусоидального сигнала и самую малую частоту (множитель 1 и ручку **frequency** против часовой стрелки в крайнее положение). Установите на вольтметре GDM-8145 режим **DC, V**, предел измерения – 20 В и подключите его к генератору. В этом режиме время усреднения вольтметра много меньше периода сигнала, и показания вольтметра будут отслежи-

вать изменение во времени $U(t)$. Дождитесь, когда на генераторе покажется стабильная индикация частоты и проследите за изменением показаний вольтметра в течение нескольких периодов (без записи показаний). Проведите наблюдения для прямоугольного сигнала.

То же самое проделайте в двух режимах измерения переменного напряжения: **AC** с постоянной и без постоянной составляющей. Эти режимы измерения определяются положением переключателя **TRUE RMS** в положение \approx – с постоянной составляющей и в \sqcup – без постоянной составляющей.

1. Соберите схему, приведенную на рис. 4.

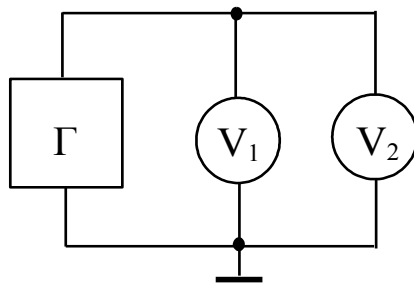


Рис. 4. Схема для получения частотной характеристики вольтметров:

Γ – генератор гармонических колебаний GFG; V_1 – цифровой мультиметр GDM-8145; V_2 – цифровой мультиметр DT838

Установите: генератор GFG в режим генерации синусоидального сигнала; мультиметры – в режим измерения переменного напряжения: GDM-8145 – нажать кнопки **AC**, **V**, **TRUE RMS** отжать в положение \sqcup ; предел измерения – 20 В; мультиметр DT838 – режим **ACV**, предел измерения – 200 В.

2. Включите генератор, установите максимальное значение выходного напряжения. Снимите зависимость показаний вольтметров от частоты ν для гармонического сигнала. Диапазон изменения частоты от 5 Гц до 5 МГц. Требуется приблизительно определить рабочий диапазон, поэтому шаг по частоте выбирайте самостоятельно, но так, чтобы изменение амплитуды на соседних частотах было не более 10 %. Если в некотором диапазоне частот показания изменяются меньше, чем на 3 %, то достаточно для этого диапазона записать одно значение.

3. Постройте графики зависимости $U(\nu)$ для обоих приборов, откладывая на оси X частоту в логарифмическом масштабе (см. рис. 3). Из графиков оцените рабочий интервал частот для каждого вольтметра по уровню 0,9 от максимального значения. Этот уровень принят условно, так как генератор данного типа не может обеспечить амплитудную стабильность на уровне погрешности вольтметра. Сравните полученные значения с паспортными данными для сигнала синусоидальной формы.

Влияние формы сигнала на показание вольтметра

Переменные во времени сигналы могут иметь самую разнообразную форму. Амплитуда сигнала может изменяться случайным образом (например, у электронного шума) или по заданному периодическому закону. Как правило, полный сигнал состоит из суммы случайной, периодической и постоянной составляющей сигнала

$$A(t) = A_{случ}(t) + A_{пер}(t) + \bar{A}.$$

Принято различать: *статические сигналы* (нет зависимости от времени – постоянное напряжение / ток), *квазистатические* (слабо меняются во времени), *периодические* – сигнал повторяется во времени с периодом T , *одионые* и *случайные*.

В данной работе рассматривается измерение характеристик некоторых (часто встречающихся) периодических сигналов без постоянной и с постоянной составляющей.

Отклик измерительного прибора на входной сигнал зависит от его формы. Для определения отклика измерительного прибора при измерении периодического сигнала необходимо знать, на какую характеристику сигнала реагирует измерительный прибор, т. е. *значение какого параметра сигнала измеряется*. Для динамического сигнала *тока* или *напряжения*, описываемого функцией $y(t)$ от времени можно указать следующие значения.

– Пиковое значение:

$$y_{pk} = \max|y(t)|.$$

– Полный размах:

$$y_{pk,pk} = \max\{y(t)\} - \min\{y(t)\}.$$

При измерении пиковых значений и полного размаха надо учитывать то, что они очень чувствительны к шуму, накладывающемуся на полезный сигнал, и к возможным искажениям сигнала.

Менее чувствительными к искажениям и помехам являются усреднённые по времени характеристики сигнала, такие как:

- среднее по времени значение

$$y_{cp} = \bar{y} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} y(t) dt; \quad (1)$$

- среднее значение от абсолютной величины

$$|y|_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} |y(t)| dt;$$

- среднеквадратическое (действующее, эффективное) значение y_{RMS} :

$$y_{RMS} = y_{эф.} = \sqrt{\overline{y^2}} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} y^2(t) dt}, \quad (2)$$

где τ – время усреднения.

Постоянную составляющую (среднее значение) переменного сигнала измеряют приборами в режиме измерения постоянного тока. В этом режиме проводятся измерения постоянного тока или напряжения как в заданиях работы 2.1.

Важной измеряемой характеристикой сигнала является его среднеквадратическое значение. *Физический смысл среднеквадратического значения напряжения / тока раскрывается, по его тепловому действию на активное сопротивление R .* Оно такое же, какое оказывает постоянный ток (напряжение), равный по величине действующему значению переменного тока (напряжения).

Действительно мгновенная мощность $P(t)$, рассеиваемая на резисторе R от приложенного переменного напряжения $u(t)$ (тока $i(t)$);

$$P(t) = u(t)i(t) = i^2(t)R.$$

Тогда средняя мощность P_{cp} , рассеиваемая на резисторе за период времени T , равна

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt = \frac{1}{TR} \int_t^{t+T} u^2(t) dt = \frac{u_{RMS}^2}{R} = \frac{R}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt = I_{RMS}^2 R.$$

При выборе измерительного прибора необходимо знать, на какое значение сигнала он будет реагировать. Например, осциллограф воспроизводит мгновенные значения сигнала, вольтметр электромагнитной, электростатической и электродинамической системы – действующее / среднеквадратическое. Вольтметры и амперметры магнитоэлектрической системы реагируют на постоянный ток.


Некоторые приборы (например, GDM) позволяют измерять среднеквадратическое значение без постоянной составляющей $y_{RMS} \sim$:

$$y_{RMS,\square} = \sqrt{y(t) - \bar{y}}^2 = \sqrt{y^2(t) - 2y(t)\bar{y} + \bar{y}^2} = \sqrt{y^2 - \bar{y}^2}.$$

Для правильного измерения постоянной и переменной составляющей периодического сигнала необходимо, чтобы период переменной составляющей T был значительно меньше времени усреднения τ ($T \ll \tau$). Во сколько раз должно быть малым их отношение, зависит от требуемой точности, с которой необходимо провести измерение.

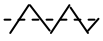
Как правило, в измерительных приборах время усреднения фиксировано, в аналоговых приборах это обусловлено конструкцией прибора, а в цифровых – измерительной схемой. Это приводит к тому, что частотный диапазон измерительного прибора ограничен снизу. Кроме того, частотный диапазон ограничен сверху, что также обусловлено или конструкцией прибора, или измерительной схемой. В паспорте прибора для каждой измеряемой величины и предела измерения указана погрешность измерения для определенного (рабочего) частотного диапазона. Вне этого диапазона погрешность неизвестна, а значит измерения бессмысленны.

Найдем связь эффективного напряжения с амплитудой для часто встречающихся периодических функций: синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы без постоянной составляющей. Будем предполагать, что период функций T достаточно мал по сравнению с временем усреднения τ , тогда в качестве времени усреднения в формуле (2) можно взять период T .

Для *гармонического* сигнала  $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота, получим

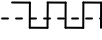
$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_0^2 \sin^2(\omega t) dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_0^2 \sin^2(\omega t) dt} = U_0 / \sqrt{2}. \quad (3)$$

Для гармонического сигнала эффективное напряжение в корень из двух меньше амплитудного $U_0 = \sqrt{2} U_{RMS}$.

Для *треугольного*  сигнала с одинаковыми, но разными по знаку полупериодами достаточно провести интегрирование на четверти периода, где этот сигнал можно записать в виде $U(t) = U_0 4t / T$ при $0 < t < T/4$:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} U^2(t) dt} = U_0 \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} (4t / T)^2 dt} = U_0 / \sqrt{3}, \quad (4)$$

т. е. для треугольного сигнала $U_0 = \sqrt{3} U_{RMS}$.

Для *прямоугольного* сигнала  с одинаковыми, но разными по знаку полупериодами получим

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_0^2 dt} = U_0, \quad U_0 = U_{RMS}. \quad (5)$$

Задание 2. Измерение напряжения периодических сигналов без постоянной составляющей

Оборудование: генератор GFG; осциллограф Tektronix; вольтметр – цифровой мультиметр GDM-8145; разветвитель-тройник.

1. Соберите схему, приведенную на рис. 5. Установите: режим генерации синусоидального напряжения частотой 1 кГц, ручку регулировки амплитуды **Ampl** в среднее положение; мультиметр – режим измерения переменного тока: кнопки **AC**, **V**, **TRUE RMS** в любом положении и предел 20 В; осциллограф – канал входа любой (**CH1** или **CH2**), режим **автоустановки**.

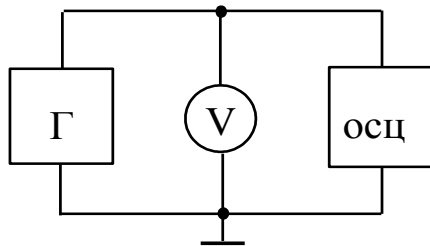


Рис. 5. Измерение периодических сигналов:
Г – генератор GFG; *V* – цифровой мультиметр
 GDM-8145; *ОСЦ* – осциллограф Tektronix

2. Включите осциллограф (кнопка включения расположена на верхней панели). В верхней части лицевой панели управления осциллографа нажмите кнопку **AUTOSET** (автоустановки), при этом осциллограф автоматически установит оптимальные значения цены деления по вертикали для измерения амплитуды сигнала, по горизонтали – для измерения временных интервалов, которые высвечиваются в нижней части экрана осциллографа.

Примечание. При измерении напряжений осциллографом в режиме автоустановки следует обращать внимание на возможное отображение результатов на экране с учетом включения пробника 1 : 10, при этом цена деления по вертикали увеличена в 10 раз. Для проверки включите кнопку **MENU** соответствующего канала, при этом в правой части экрана отобразится меню канала, параметры которого можно изменять функциональными кнопками, расположенными справа напротив меню. Функциональной кнопкой **PROBE** установите множитель в положение $\times 1$.

Убедитесь, что установлен режим открытого входа. Необходимо обратить внимание на то, что применяемые обозначения **АС** (закрытый вход) и **ДС** (открытый вход) для осциллографа совпадают с обозначениями цифровых вольтметров и амперметров (**АС** – переменный ток и **ДС** – постоянный ток). Но здесь имеется существенное отличие, заключающееся в том, что при закрытом входе в осциллографе последовательно к входу подключается ёмкость, поэтому постоянная составляющая сигнала не пропускается. Соответственно на экране осциллографа не наблюдается смещение сигнала по вертикали, вызванное этой постоянной составляющей. Для цифро-

вых вольтметров и амперметров эти обозначения соответствуют разным способам обработки входного сигнала. Подробнее с режимами работы осциллографа можно познакомиться в работе 3.1.

3. С помощью осциллографа измерьте амплитуду синусоидального сигнала. Для гармонического сигнала амплитуда равна половине значения $Pk-Pk$, отображаемого на экране осциллографа. Запишите значение амплитуды сигнала и показание вольтметра. Пересчитайте показание вольтметра в амплитуду сигнала и сравните с измеренным значением на осциллографе с учетом их погрешностей.

Для сравнения показаний вольтметра и осциллографа воспользуйтесь уравнениями (3), (4) и (5).

4. Проведите аналогичные измерения и расчеты для сигналов треугольной и прямоугольной формы.

Задание 3. Измерение напряжения периодических сигналов с постоянной составляющей

Оборудование: генератор GFG; осциллограф Tektronix; макет с диодом Д и сопротивлением R ; вольтметр – цифровой мультиметр GDM-8145.

1. Соберите схему (рис. 6), установите на генераторе режим генерации синусоидального сигнала частотой 50–100 Гц, максимальной амплитуды.

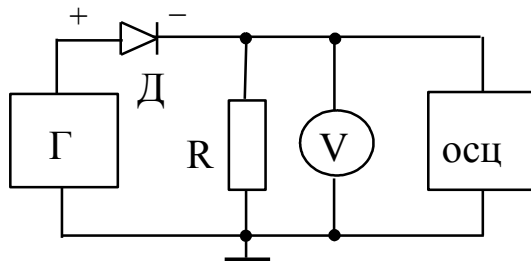


Рис. 6. Измерение сигналов сложной формы: Γ – генератор GFG; $ОСЦ$ – осциллограф Tektronix; V – цифровой мультиметр GDM-8145; $Д$ – полупроводниковый диод; R – сопротивление 1 кОм

2. Запишите показания осциллографа и мультиметра, причем измерение мультиметром проведите как в режиме измерения постоянного напряжения (**DC**), так и в режиме измерения переменного напряжения (**AC**) с нажатой кнопкой **True RMS** в положении \approx .

3. Используя показания мультиметра, вычислите амплитудное значение напряжения и сравните его с амплитудой сигнала, измеренной осциллографом.

4. Повторите измерения и расчеты для сигналов треугольной и прямоугольной формы.

Примечание. Диод – полупроводниковый прибор, принцип действия которого упрощенно можно описать так: диод пропускает ток в одном направлении (соответствует направлению стрелочки на его обозначении в схеме) и не пропускает в обратном. Диоды имеют широкую область применения, например, в схемах преобразования переменного напряжения в постоянное (выпрямителях). В схеме, приведенной на рис. 6, диод обеспечивает однополупериодное выпрямление напряжения. Для синусоидального входного сигнала форма напряжения на нагрузочном сопротивлении R изображена на рис. 7.

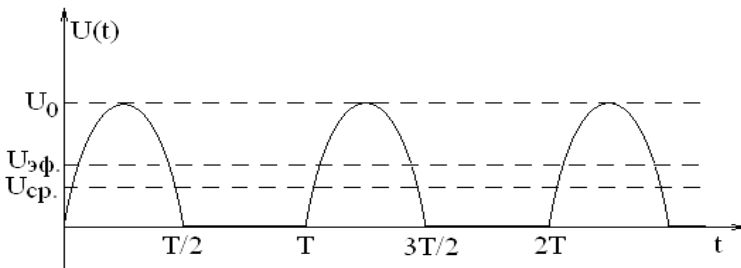


Рис. 7. Однополупериодный синусоидальный сигнал:
 U_0 – амплитуда; $U_{эф.}$ – среднеквадратическое значение;
 $U_{ср.}$ – среднее значение (постоянная составляющая)

В режиме измерения постоянного тока (**DC**) вольтметр показывает среднее значение измеряемой величины. Для сигналов с одинаковыми, но разными по знаку полупериодами после однополупериодного выпрямления среднее значение равно площади (между $U(t)$ и осью t), деленной на период (см. выражение (1)). Для сигналов тре-

угольной и прямоугольной формы это легко сделать самостоятельно.

Приведем лишь среднее значение для напряжения, изображенно-го на рис. 7:

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_0 \sin(\omega t) dt = \frac{U_0}{\pi}. \quad (6)$$

Отсюда получим соотношение между амплитудным и средним значениями напряжения $U_0 = \pi U_{cp}$.

В режиме измерения переменного напряжения (AC и **TRUE RMS** в положении \approx) показания вольтметра соответствуют средне-квадратическому значению сигнала за период (2). Если сигнал заданной формы с выхода генератора состоит из симметричных положительной и отрицательной составляющей, то для эффективного значения напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя (после диода) верно следующее выражение:

$$U_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} U(t)^2 dt} = \frac{U_{эф}(\text{до диода})}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Так, для синусоидальной формы сигнала подставим последнее выражение в формулу (3) и получим связь между амплитудой и эффективным напряжением однополупериодного выпрямленного напряжения $U_0 = 2U_{эф}$.

Соотношения между амплитудным и эффективным значением напряжения для входных сигналов треугольной и прямоугольной формы выведите самостоятельно по аналогии с вышеприведенным расчетом для гармонического сигнала и используя соотношения (6) и (7) для эффективных напряжений до диода.

Режимы работы источника гармонических сигналов

Если ЭДС источника E и его сопротивление r не зависят от отдаваемого тока, то зависимость тока в цепи I от напряжения U при изменении сопротивления нагрузки R будет линейной. Действительно, из закона Ома следует, что электродвижущая сила равна:

$$E = I(r + R) = Ir + U.$$

Из этого соотношения получается линейная зависимость тока от напряжения:

$$I = \frac{E - U}{r}.$$

При изменении внешнего сопротивления R от нуля (короткое замыкание) до бесконечности (разомкнутая цепь) напряжение на нагрузке ($U_H = IR$) возрастает от нуля до значения, равного ЭДС (напряжение холостого хода), а ток в цепи уменьшается от тока при коротком замыкании $I_{кз} = E/r$ до нуля. По графику (рис. 8) зависимости тока от напряжения $I(U)$ можно определить параметры источника:

$$E = U_{xx}, \quad r = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

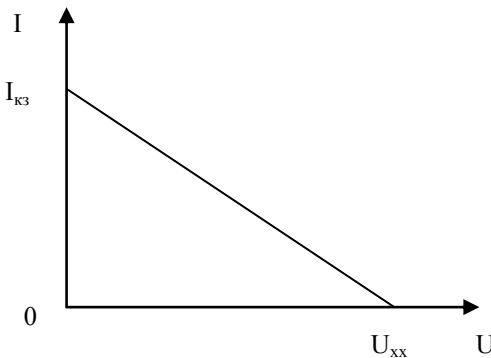


Рис. 8. Изменение тока в цепи и напряжения на нагрузке при неизменной ЭДС нестабилизированного источника

Мощность, выделяемая на нагрузке $P = IU_H$ (полезная мощность), равна нулю при коротком замыкании и разомкнутой цепи. Максимальная полезная мощность достигается при согласованном выходном сопротивлении источника r и сопротивлении нагрузки R , т. е. при $r = R$. Это условие называется условием согласования источника сигнала и нагрузки по мощности. При этом на внутреннем сопротивлении источника выделяется мощность $P = E^2/4r$, соответственно полная мощность, развиваемая источником, равна $E^2/2r$.

Напомним, что рассмотренное выше условие согласования сопротивлений источника сигнала и нагрузки справедливо для цепей

постоянного тока. Для передачи максимальной мощности в цепях переменного тока необходимо согласование как активных, так и реактивных составляющих сопротивлений.

Задание 4. Изучение зависимости мощности, выделяемой на нагрузке, от соотношения сопротивления источника и сопротивления нагрузки

Оборудование: амперметр и вольтметр – цифровые мультиметры GDM-8145, источник гармонических сигналов GFG-8255, магазин сопротивлений РЗЗ.

1. Соберите схему, приведённую на рис. 9.

Установите: один мультиметр типа GDM-8145 в режим измерения переменного напряжения – режим **АС** кнопка **V**, предел 20 В; другой мультиметр GDM-8145 – в режим измерения переменного тока – режим **АС**, кнопка **mA**, предел 200 мА; на магазине сопротивлений – 99,9 Ом (подключение к клеммам 0, и 99999,9), на генераторе – сигнал синусоидальной формы, частота примерно 100 Гц и максимальное выходное напряжение.

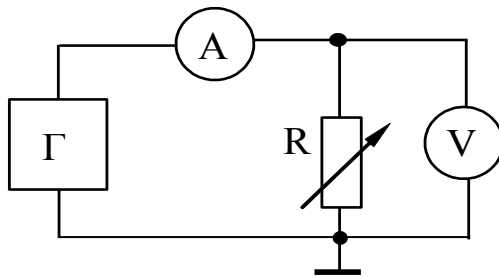


Рис. 9. Схема установки для изучения режима работы генератора: Γ – источник гармонических сигналов GFG; A – амперметр – мультиметр GDM-8145; V – вольтметр – мультиметр GDM-8145; R – магазин сопротивлений

2. Уменьшая сопротивление нагрузки от 99,9 до 9,9 Ом с шагом 10 Ом, снимите зависимость тока I и напряжения U от сопротивления нагрузки R .

| $R, \text{Ом}$ | $U, \text{В}$ | $I, \text{мА}$ | $P, \text{Вт}$ |
|----------------|---------------|----------------|----------------|
| 99,9 | | | |
| 89,9 | | | |
| ... | | | |
| 9,9 | | | |

3. Постройте график зависимости тока I от напряжения U , по которому определите *напряжение холостого хода*, *ток короткого замыкания*, а по угловому коэффициенту прямой определите сопротивление генератора r .

4. Рассчитайте мощность P , выделяемую на сопротивлении R . Постройте график зависимости $P = f(R)$. Из графика определите сопротивление генератора r . Сравните полученные в п. 3 и 4 значения сопротивления генератора, с приведёнными в паспортных данных.

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие экспериментальные данные и обработки.

Расчетные формулы и схемы выполнения эксперимента по всем заданиям.

Задание 1. Таблицу экспериментальных данных, графики амплитудно-частотной зависимости обоих мультиметров, интервал рабочих частот каждого из них и сравнение экспериментальных данных с паспортными.

Задание 2. Измеренные вольтметром значения напряжения для сигналов различной формы, сравнение с показаниями осциллографа и расчет коэффициентов амплитуды.

Задание 3. Измеренные вольтметром значения напряжения для сигналов сложной формы, сравнение с показаниями осциллографа и расчет коэффициентов формы.

Задание 4. Таблицу экспериментальных данных, графики зависимостей: а) тока от напряжения; б) мощности от сопротивления; величину сопротивления генератора.