

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

Ю.В. Матвеев, В.М. Цалоев

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания

к практическим занятиям для студентов специальности
26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики»
всех форм обучения

В двух частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2026

УДК [621.317:629.5.064.5](076.5)

ББК 31.221:39.459-5*я73

МЗЗ

Р е ц е н з е н т :

С.А. Конева - канд. техн. наук, доцент кафедры судового электрооборудования

Матвеев Ю. В.

МЗЗ Метрологическое обеспечение судовых электромеханических систем : методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» всех форм обучения. – В 2-х частях. Ч. 2 / Ю. В. Матвеев, В. М. Цалоев ; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование». – Севастополь : СевГУ, 2026. – 42 с. – Текст : электронный.

Методические указания предназначены для студентов Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 – «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» всех форм обучения, выполняющих практические занятия по дисциплине «Метрологическое обеспечение судовых электромеханических систем».

УДК [621.317:629.5.064.5](076.5)

ББК 31.221:39.459-5*я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры «Судовое электрооборудование», протокол № 3 от 22 октября 2025 г.

© Матвеев Ю.В., Цалоев В.М., 2026
© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Практическое занятие № 5. Измерение мощности и энергии в электрических цепях.....	5
Практическое занятие № 6. Измерение параметров напряжения и тока в электрических цепях.....	13
Практическое занятие № 7. Измерение сопротивления, емкости и индуктивности.....	20
Практическое занятие № 8. Измерение электрических параметров цифровыми приборами.....	27
Практическое занятие № 9. Измерение магнитных и неэлектрических величин.....	34
Библиографический список.....	41
Приложение А. Перечень единиц физических величин и приставок.....	42

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемых методических указаниях изложено содержание практических занятий по данной дисциплине, читаемых автором в Севастопольском национальном техническом университете для студентов специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики очной и заочной форм обучения. Материал практических занятий по дисциплине «Метрологическое обеспечение судовых электромеханических систем». изложен в двух частях методических указаний.

В соответствии с целями и задачами дисциплины содержание методических указаний охватывает: основы метрологии; основы теории электрических измерений; методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин.

Практические занятия имеют целью закрепить знания студентами теоретических положений курса, обучить их методам расчета и обработки данных, получаемых в ходе выполнения эксперимента, а также привить навыки научного анализа.

Материалы к каждому практическому занятию содержат: тему; учебную цель; основные теоретические положения; типовые аудиторские задачи и задачи для самостоятельного решения с ответами. Для лучшего усвоения материала в методических указаниях приведены примеры решения задач. Решение задач послужит одним из средств овладения системой знаний, а также поможет более глубоко и всесторонне усвоить программный материал по дисциплине.

В целях самопроверки и закрепления знаний, полученных при изучении определенной темы курса на практических занятиях, в конце материала по каждому практическому занятию предлагается примерный перечень контрольных вопросов.

Для лучшего освоения теоретического материала и подготовке студентов к практическим занятиям в методических указаниях приведен библиографический список [1 - 5].

Автор считает своим долгом выразить благодарность за рецензирование и ценные замечания канд. техн. наук, доценту кафедры СЭО, С.А. Коневой.

Автор

Практическое занятие № 5

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

5.1. Цель занятия

5.1.1. Ознакомление с методами измерения мощности и энергии в электрических цепях.

5.1.2. Усвоение и закрепление теоретических вопросов, связанных с измерением мощности и энергии в электрических цепях.

5.2. Основные теоретические положения

5.1. Измерение активной мощности в однофазной и трехфазной цепи

На рисунке 5.1 изображена схема включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока. Показание ваттметра определяется по выражению [1]:

$$P_W = UI \cos \varphi,$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока нагрузки; φ — разность фаз напряжения и тока.

Расширение диапазонов измерения в цепях переменного тока осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

На рисунке 5.2 изображена схема подключения измерительных трансформаторов тока и напряжения для расширения диапазона измерения мощности. В схеме рисунка 5.2 значение измеряемой мощности определяется по формуле [2]:

$$P = P_W K_{I\text{ном}} K_{U\text{ном}},$$

где $K_{I\text{ном}}$ — номинальный коэффициент трансформации применяемого измерительного трансформатора тока; $K_{U\text{ном}}$ — номинальный коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения.

При измерении мощности **в симметричных трехфазных цепях**, т. е. равенстве комплексных сопротивлений фаз достаточно включить один ваттметр.

На рисунке 5.3 изображены схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии: а) — нагрузка соединена треугольником; б) — нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна.

Если нагрузка симметричная, то

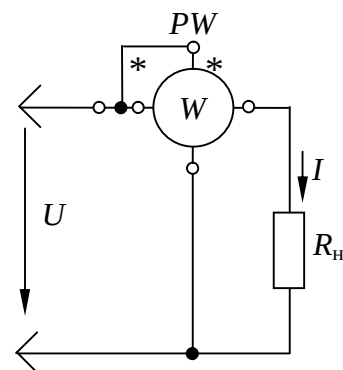


Рисунок 5.1 – Схема включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока

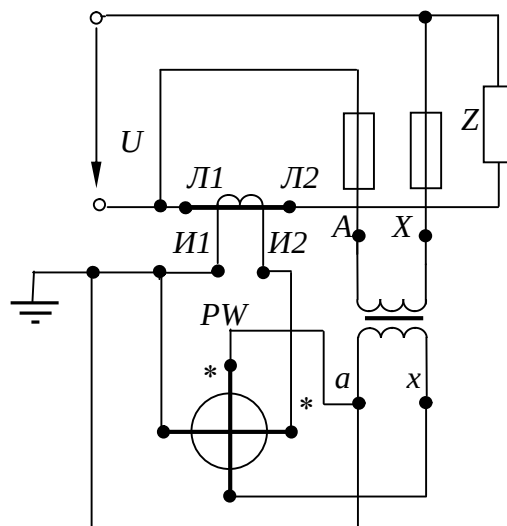


Рисунок 5.2 — Схема подключения измерительных трансформаторов тока и напряжения для расширения диапазона измерения мощности

$$P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi,$$

где φ_ϕ — сдвиг по фазе между фазным напряжением U_ϕ и фазным током I_ϕ .

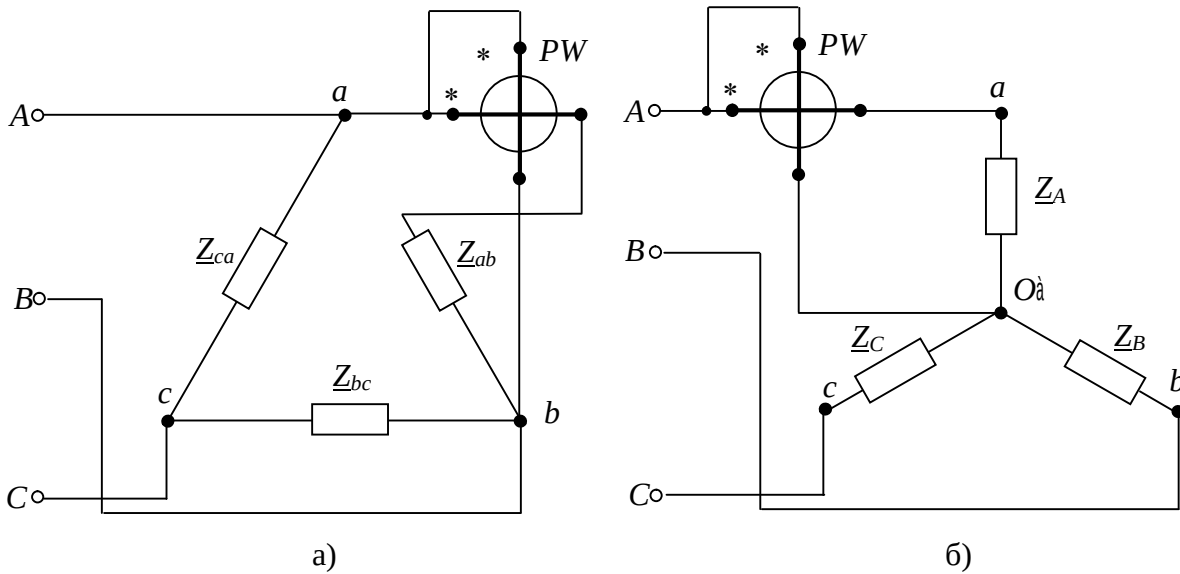


Рисунок 5.3 — Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии: а) — нагрузка соединена треугольником; б) — нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна

Для получения мощности всей трехфазной цепи необходимо показание ваттметра утроить:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi.$$

При измерении мощности в трехфазной трехпроводной цепи могут применяться два одноэлементных ваттметра. На рисунке 5.4 изображена схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь.

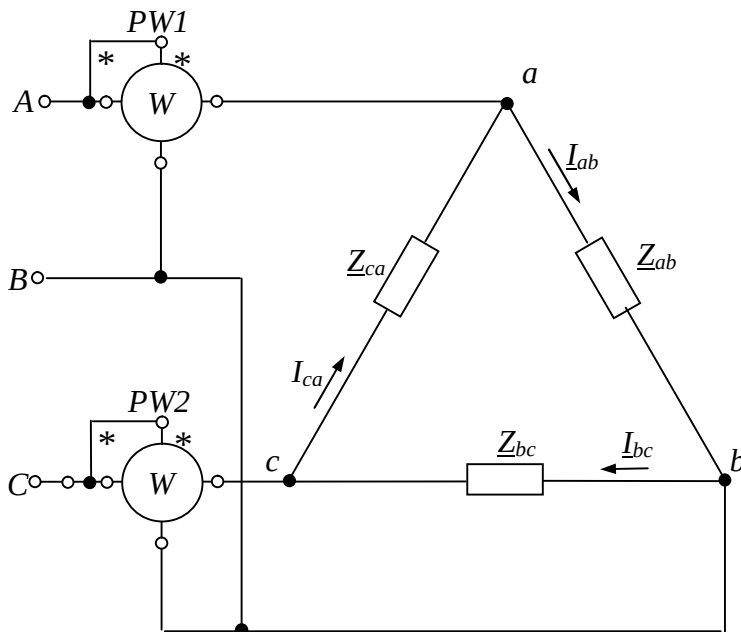


Рисунок 5.4 — Схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь

Данный метод дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки, как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. При проведении измерения мощности с помощью двух ваттметров, мощность, потребляемая трехфазной цепью определяется следующим образом:

$$P = P_{W1} + P_{W2},$$

где P_{W1} и P_{W2} — показания однофазных ваттметров PW1 и PW2.

Независимо от способа соединения нагрузки в звезду или в треугольник при симметричной нагрузке фаз [1]:

$$3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}\sqrt{3}U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}},$$

где $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение на нагрузке; $I_{\text{л}}$ — линейный ток нагрузки, поэтому при определении мощностей часто используют следующие выражения:

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}.$$

5.2. Измерение реактивной мощности в трехфазной цепи

На рисунке 5.5 приведена схема измерения реактивной мощности в трехфазной симметричной цепи методом одного прибора.

Реактивная мощность в однофазной цепи определяется по выражению

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Измерение реактивной мощности в однофазной цепи может быть осуществлено электродинамическим или ферродинамическим прибором, у которого вращающий момент пропорционален не косинусу угла между векторами тока и напряжения, а синусу этого угла.

Измерение реактивной мощности в симметричной трехфазной цепи можно осуществить с помощью ваттметра. **Сплошными линиями** на рисунке 5.6 изображена схема подключения ваттметров для измерения реактивной мощности, а **штриховыми линиями** схема подключения ваттметров для измерения активной мощности

Для трехфазной цепи реактивная мощность определяется суммой реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C,$$

где Q_A , Q_B и Q_C являются реактивными мощностями фаз нагрузки. Независимо от способа соединения нагрузки в звезду или в треугольник при симметричной нагрузке фаз

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}.$$

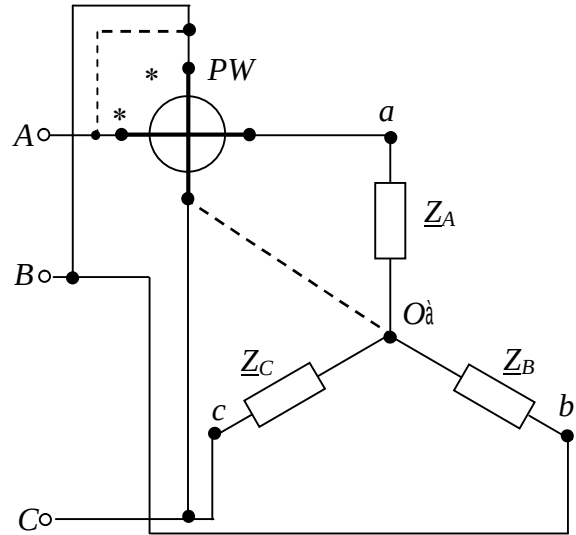


Рисунок 5.5 — Схема измерения реактивной мощности в трехфазной симметричной цепи

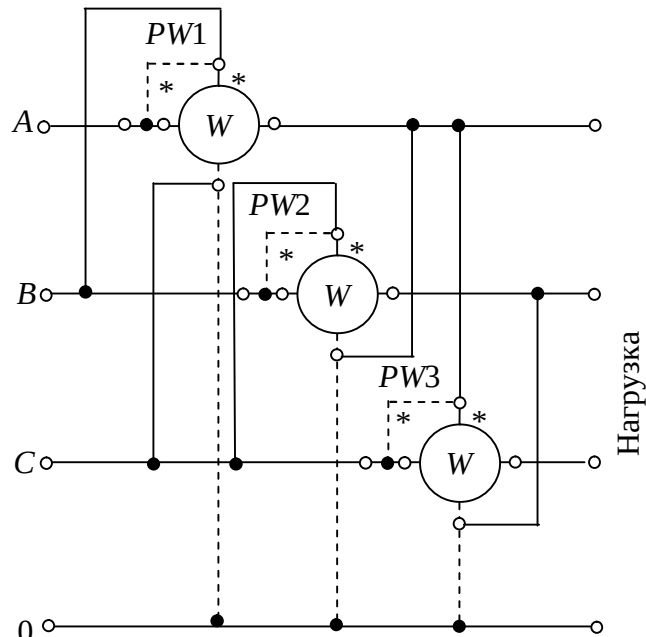


Рисунок 5.6 — Схема подключения ваттметров для измерения реактивной мощности

5.3. Измерение энергии

Измерение электрической энергии однофазного электрического тока производят с помощью электрических счетчиков с индукционными измерительными механизмами [3]:

$$W = CN,$$

где W — энергия, действительно израсходованная в сети, кВт ч; N — число оборотов диска за этот же интервал времени; C — действительная постоянная счетчика. Действительная постоянная счетчика определяется через количество энергии, которое прошло через счетчик за один оборот диска.

Энергия, учтенная счетчиком, определяется следующим образом [3]:

$$W' = C_{\text{ном}}N,$$

где $C_{\text{ном}}$ — номинальная постоянная счетчика, т. е. количество энергии, учитываемое счетным механизмом за один оборот диска.

Для определения энергии, израсходованной за какой-то промежуток времени, необходимо из показаний его в конце измерения вычесть показание, снятое в начале.

Зная постоянные C и $C_{\text{ном}}$, можно определить относительную погрешность счетчика [3]:

$$\delta = ((W' - W)/W') \cdot 100\% = ((C_{\text{ном}} - C)/C_{\text{ном}}) \cdot 100\%.$$

Поправочный коэффициент счетчика K — это отношение действительно израсходованной энергии к энергии, учтенной счетчиком [3]:

$$K = W/W' = C/C_{\text{ном}}.$$

Для измерения энергии в трехфазных трех- и четырехпроводных цепях применяют однофазные, двухэлементные и трехэлементные счетчики энергии.

5.3. Задачи

5.3.1. Аудиторные задачи

Задача № 1. Ваттметр со шкалой на 150 делений имеет токовую обмотку на 5 А. Определить цену деления и чувствительность при напряжениях цепи ваттметра 50; 100 и 200 В.

Задача № 2. В однофазной цепи переменного тока через измерительный трансформатор тока 30/5 и измерительный трансформатор напряжения 1000/100 включены амперметр, вольтметр и ваттметр. Начертить схему измерения и определить ток, напряжение и мощность потребителя, если показания приборов 2 А; 90 В и 200 Вт.

Задача № 4. Счетчик электрической энергии вращается с частотой 22 об/мин. Определить постоянную счетчика, если мощность потребителя в течение всего времени измерения была равна 2,0 кВт.

Задача № 5. Мощность электротехнического устройства составляет 1 кВт. Постоянная счетчика 1400 Вт·с/об. Определить значение энергии, зарегистрируемой счетчиком за 40 оборотов.

Задача № 6. Амперметр, вольтметр и ваттметр подключены к нагрузке через измерительные трансформаторы тока 150/5 А и напряжения 1000/100 В.

Показания приборов при этом были следующие: $I=2,0$ А, $U=80$ В и $P=170$ Вт. Определить: полную, активную и реактивную мощности нагрузки, а также коэффициент мощности.

Задача № 7. Определить количество электроэнергии, потребляемой в цепи постоянного тока за сутки, и абсолютную погрешность измерения, если: ток в цепи $I=80$ А; напряжение в цепи $U=220$ В; относительные погрешности измерения тока $\delta_I=1,2\%$, напряжения $\delta_U=1,5\%$, а время измерено с точностью до 1-й минуты.

Задача № 8. В трёхфазную сеть с действующим значением линейного напряжения 380 В подключён трёхфазный асинхронный двигатель. Определить значение потребляемой активной мощности, а также коэффициент мощности в режиме холостого хода и под нагрузкой, если показания ваттметра и амперметра, включённых в одну из фаз двигателя, для указанных режимов следующие: $P_x=25$ Вт; $I_x=0,3$ А; $P_n=150$ Вт; $I_n=1$ А.

Задача № 9. Для измерения мощности ваттметр включен через измерительные трансформаторы тока 100/5 и напряжения 6000/150. Класс точности ваттметра 0,5. Определить абсолютную погрешность измерения и мощность потребителя, если показание ваттметра равно 500 Вт.

Задача № 10. Схема включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с недоступной нулевой точкой при полной симметрии изображена на рисунке 5.7.

Активная мощность в трехфазной цепи определяется с помощью искусственной нулевой точки. Искусственная нулевая точка обычно создается с помощью двух резисторов (сопротивление каждого резистора равно сопротивлению цепи обмотки напряжения ваттметра) и сопротивления цепи обмотки напряжения.

Определить показания ваттметра при симметричной активной нагрузке, если фазные токи и напряжения равны 10 А и 220 В соответственно.

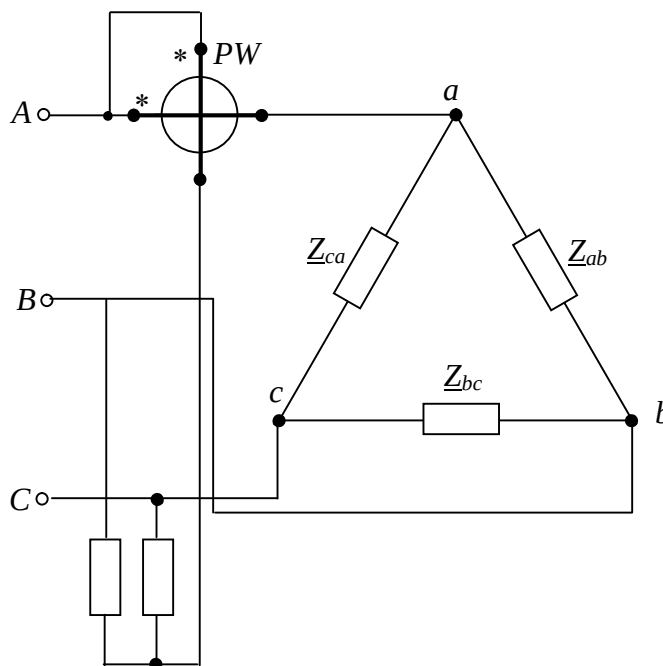


Рисунок 5.7

5.3.2. Примеры решения задач

Задача № 1. Счетчик электрической энергии имеет паспортные данные: 220 В, 10 А, 1 кВт ч — 640 оборотов диска. Прибор был поверен при нормальных значениях тока и напряжения и за 10 мин сделал 240 оборотов диска. Определить относительную погрешность счетчика и поправочный коэффициент.

Решение. Вначале определим номинальную постоянную счетчика:

$$C_{\text{ном}} = W_{\text{ном}} / N_{\text{ном}} = (1000 \cdot 3600) / 640 = 5625, \text{ Вт с/об},$$

а затем действительную постоянную счетчика

$$C = (UIt) / N_x = (220 \cdot 10 \cdot 600) / 240 = 5500, \text{ Вт с/об}.$$

Далее найдем поправочный коэффициент счетчика

$$K = C / C_{\text{ном}} = 5500 / 5625 = 0,977$$

и относительную погрешность счетчика

$$\delta = (C_{\text{ном}} - C) / C_{\text{ном}} \cdot 100\% = (5625 - 5500) / 5625 \cdot 100\% = 2,2\%.$$

Задача № 2. Мощность в трехфазной цепи определяется методом двух ваттметров, токовые обмотки которых, как изображено на рисунке 5.8 включены в фазы А и В. В трехфазную сеть с линейным напряжением 380 В включен симметричный трехфазный потребитель, имеющим в каждой фазе сопротивление $Z_{\phi} = (3 + j4) \text{ Ом}$. Определить показания ваттметров, найти сдвиг фаз между токами и напряжениями их измерительных цепей. Рассчитать активную мощность потребителя.

Решение. Так как нагрузка симметрична, то фазные напряжения

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 220 \text{ В},$$

а фазные токи потребителя равны следующим значениям:

$$\begin{aligned} I_{\phi A} &= U_{\phi A} / Z_{\phi} = 220 / 5,0 e^{j48,5^{\circ}} = 44,0 e^{-j48,5^{\circ}} \text{ А}; \\ I_{\phi B} &= U_{\phi B} / Z_{\phi} = 220 e^{-j120^{\circ}} / 5,0 e^{j48,5^{\circ}} = 44,0 e^{-j168,4^{\circ}} \text{ А}; \\ I_{\phi C} &= U_{\phi C} / Z_{\phi} = 220 e^{j120^{\circ}} / 5,0 e^{j48,5^{\circ}} = 44,0 e^{j71,5^{\circ}} \text{ А}. \end{aligned}$$

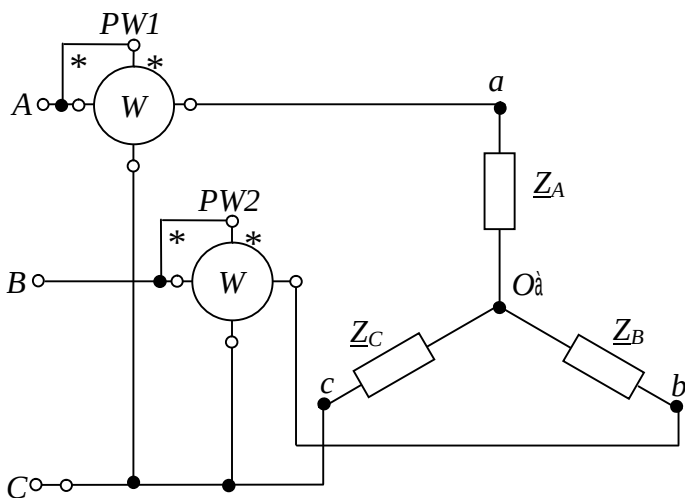


Рисунок 5.8

Сдвиг фаз φ определим по комплексу полного сопротивления фазы нагрузки $\varphi = \arctg 4/3 = 48,5^{\circ}$.

Линейные токи при соединении фаз потребителя звездой равны фазным, а линейные напряжения можно определить следующим образом:

$$U_{AC} = U_{\phi A} - U_{\phi C} = 380 e^{-j30^{\circ}} \text{ В};$$

$$U_{BC} = U_{\phi C} - U_{\phi B} = 380 e^{-j90^{\circ}} \text{ В}.$$

Показания ваттметров для данной схемы измерения определяются из соотношений:

$$P_1 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^{\circ} - \varphi) \text{ и } P_2 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos(30^{\circ} + \varphi).$$

Подставляя исходные значения параметров, получим:

$$P_1 = 380 \cdot 44 \cdot \cos 18,5^{\circ} = 15856 \text{ Вт}; P_2 = 380 \cdot 44 \cdot \cos 78,5^{\circ} = 3333 \text{ Вт}.$$

Активная мощность всей трехфазной нагрузки равна сумме показаний двух ваттметров $P = P_1 + P_2 = 19,189 \text{ кВт}$.

Для проверки правильности расчета можно воспользоваться соотношением

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 \cdot \cos 48,5^{\circ} = 19,189 \text{ кВт}.$$

Задача № 3. Потребитель, как показано на рисунке 5.9, подключен к источнику постоянного тока с номинальным напряжением 36 В.

Показание на ваттметре составляет $N_x = 25$ делений.

Ваттметр имеет параметры: $U_n=150$ В; $I_n=5$ А; максимальное число делений равно 150. Определить мощность потребителя и ток в нагрузке.

Решение. Показания ваттметра определяются по отсчету (в делениях шкалы), умноженному на цену деления ваттметра.

Определим цену деления ваттметра по выражению

$$C_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_{\max}} = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \text{ Вт/дел},$$

где U_n — номинальное значение напряжения, В; I_n — номинальное значение тока, А; $\alpha_{\max}$ — максимальное число делений ваттметра.

Далее определим мощность $P = N_x C_W = 25 \cdot 5 = 125$ Вт, а затем ток в нагрузке

$$I = P/U = 3,47 \text{ А}.$$

Задача № 4. Для измерения мощности в электрической цепи подключается ваттметр, имеющий линейную шкалу измерения. При токе в нагрузке 2 А показания ваттметра составили 100 Вт. Определить показания ваттметра при токе в нагрузке 10 А, считая, что напряжение параллельной цепи ваттметра осталось неизменным.

Решение. Вначале определим напряжение параллельной цепи ваттметра $U = P/I = 50,0$ В, а затем определим показания ваттметра $P = UI = 500,0$ Вт.

Задача № 5. Ваттметр подключены к нагрузке через измерительные трансформаторы тока 300/5 А и напряжения 600/100 В. Показания ваттметра $P=100$ Вт. Определить активную мощность, потребляемую нагрузкой.

Решение. Вначале определим коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения $K_{U_{\text{ном}}} = U_1 / U_2 = 6$, а затем номинальный коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока $K_{I_{\text{ном}}} = I_1 / I_2 = 60$. Далее найдем активную мощность, потребляемую нагрузкой

$$P = P_w K_{I_{\text{ном}}} K_{U_{\text{ном}}} = 100 \cdot 6 \cdot 60 = 36,0 \text{ кВт}.$$

5.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. С целью измерения мощности, к потребителю подключен ваттметр, как показано на рисунке 5.1. Потребитель подключен к источнику постоянного тока с номинальным напряжением 220 В. Сопротивление последовательной обмотки 0,2 Ом. Ваттметр имеет параметры: $U_n=150$ В; $I_n=5$ А. Определить номинальную мощность потребителя.

Ответ: 1090 Вт.

Задача № 2. Фазные токи и напряжение в четырехпроводной трехфазной цепи с симметричной активной нагрузкой, изображенной на рисунке 5.10 равны 5 А и 127 В соответственно. Для измерения мощности к цепи подключен ваттметр. Определить активную мощность трехфазного потребителя.

Ответ: 1,9 кВт.

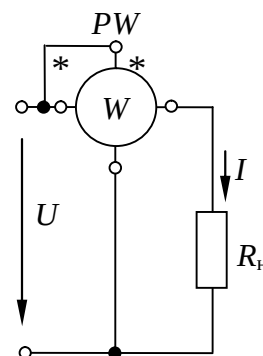


Рисунок 5.9

Задача № 3. Диск счетчика делает 188 оборотов в течение 5 мин. Нагрузкой являются три параллельно включенных лампы равной мощности. Определить мощность каждой лампы, если согласно маркировке счетчика 250 оборотов его диска соответствуют 1 кВт·ч.

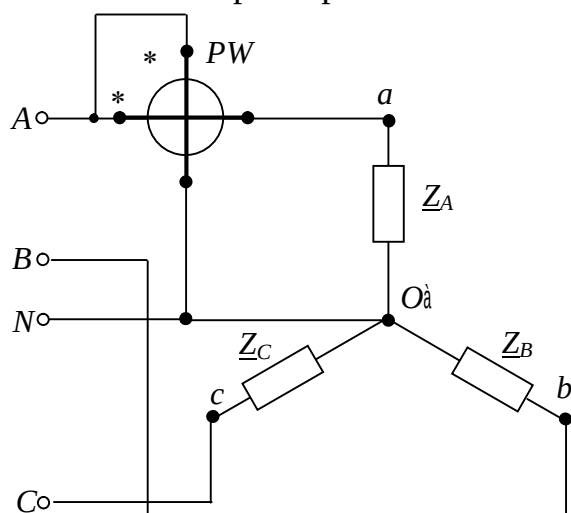


Рисунок 5.10

Ответ: 300 Вт.

Задача № 4. Расход энергии, зарегистрированный счетчиком, составил 1000 кВт·ч. Счетчик имеет относительную погрешность 2,0 % в сторону увеличения фактического расхода электроэнергии. Определить действительный расход энергии.

Ответ: 800 кВт·ч.

Задача № 5. С помощью ваттметра, как показано на рисунке 5.11 измеряется реактивная мощность в трехфазной цепи с симметричной нагрузкой фаз, включающих активное сопротивление $R=5$ Ом и реактивное сопротивление $X_L=1$ Ом.

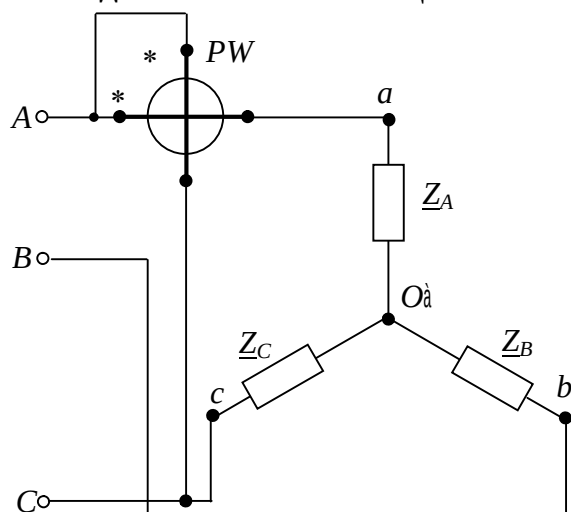


Рисунок 5.11

Определить показание ваттметра, если линейные напряжения цепи равны 127 В.

Ответ: 1,15 квар.

5.4. Контрольные вопросы

1. Каково устройство и назначение ваттметра?
2. Можно ли реактивную мощность в трехфазной симметричной цепи измерить ваттметрами активной мощности?
3. Чем отличается прямой метод измерения мощности от косвенного метода измерения?
4. Что такое активная, реактивная и полная мощность цепи?
5. Как включается ваттметр в трехфазную электрическую цепь для измерения активной мощности?
6. В каких случаях для измерения активной мощности в трехфазной цепи можно использовать один ваттметр?
7. Какие существуют методы измерения электрической энергии?
8. Как определяется постоянная ваттметра?
9. Как расширить предел измерения ваттметра на переменном токе?
10. Что такое комплексная мощность?

Практическое занятие № 6

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

6.1. Цель занятия

6.1.1. Ознакомление с методами измерений параметров напряжения и тока в электрических цепях.

6.1.2. Усвоение и закрепление теоретических вопросов, связанных с измерениями параметров напряжения и тока в электрических цепях.

6.2. Основные теоретические положения

Графические изображения для некоторых форм переменного периодического напряжения изображены на рисунках 6.1— 6.4, а основные соотношения для этих форм переменного периодического напряжения приведены в таблице 6.1.

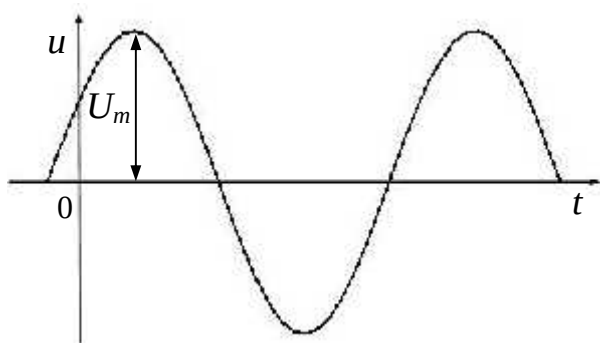


Рисунок 6.1 — Графическое изображение синусоидальной формы сигнала

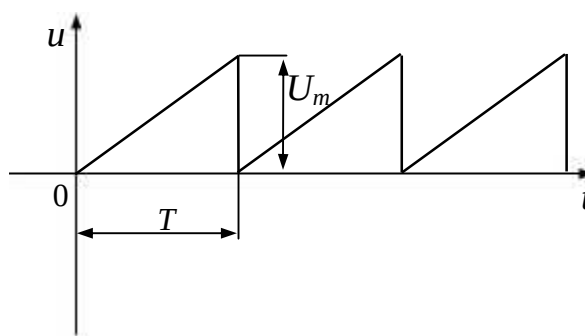


Рисунок 6.3 — Графическое изображение треугольной формы сигнала

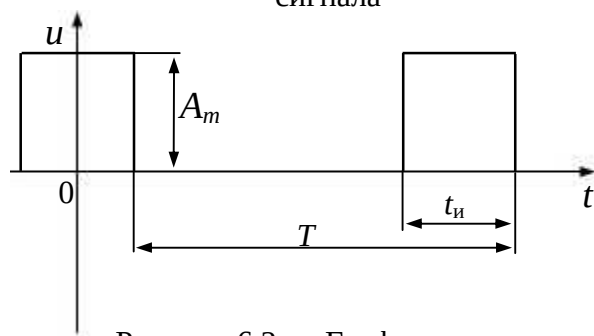


Рисунок 6.2 — Графическое изображение последовательности импульсов

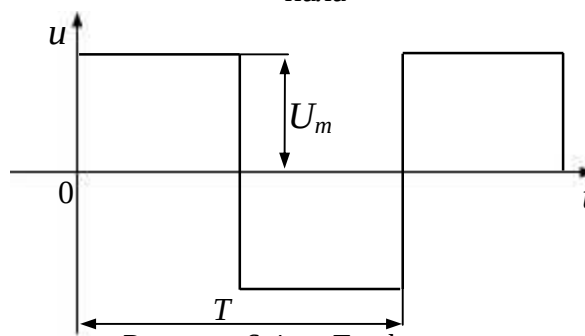


Рисунок 6.4 — Графическое изображение формы сигнала "Меандр"

Мгновенное значение сигнала (напряжения, тока) — его значение в заданный момент времени.

Период — параметр T , равный наименьшему интервалу времени, через который повторяются мгновенные значения периодического сигнала.

Частота — параметр f , обратный периоду.

Амплитуда U_m — максимальное (минимальное) значение синусоидального сигнала за период.

Если форма сигнала несинусоидальная, то максимальное (минимальное) значение называют “пиковым отклонением вверх” $U_{\text{вверх}}$ (“вниз” $U_{\text{вниз}}$).

Размах сигнала — разность между максимальным и минимальным значениями.

Максимальное значение сигнала импульсной формы обозначают A_m .

Под действующим (среднеквадратическим или эффективным) значением напряжения понимают [4]:

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

Средневыпрямленным значением напряжения является среднее значение модуля сигнала за период [4]:

$$U_{\text{ср.в}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt.$$

Среднее значение сигнала за период (постоянная составляющая) вычисляется по формуле [4]:

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

и численно равно алгебраической сумме площадей, образованных кривой сигнала за период и осью абсцисс.

Действующее значение тока измеряют приборами электродинамической, электромагнитной и тепловой систем.

Зная действующие значения синусоидально изменяющихся электрических величин можно определить их амплитудные значения.

В случае, если проводят измерения периодических **несинусоидальных** токов или напряжений, то в данные измерений необходимо ввести коэффициенты, учитывающие отличия законов изменения измеряемых величин от синусоидального закона.

Связь между амплитудным и действующим значениями измеряемой величины определяется через коэффициент амплитуды k_a по выражению [3]:

$$k_a = \frac{U_m}{U}.$$

В тоже время, связь между действующим и средним значениями напряжения периодической изменяющейся электрической величины следует определять через коэффициент формы k_ϕ [3]:

$$k_\phi = \frac{U}{U_{\text{ср}}}.$$

В случае, если необходимо по показанию прибора, измеряющего действующее значение, определить среднее или амплитудное значений напряжения (тока), имеющих периодическую, часто встречающуюся несинусоидальную форму, значения коэффициентов k_ϕ и k_a следует взять из электротехнического справочника.

Таблица 6.1 — Основные соотношения для некоторых форм переменного периодического напряжения

Форма сигнала	U	U_{cp}	$U_{\text{cp.в}}$	k_a	k_Φ
Синусоидальная	$0,707 U_m$	0	$0,637 U_m$	1,41	1,1
Пилообразная	$0,578 U_m$	$0,5 U_m$	-	1,73	1,16
Последовательность импульсов	$\sqrt{\frac{t_u}{T}} A_m$	$\frac{t_u}{T} A_m$	$\frac{t_u}{T} A_m$	$\sqrt{\frac{T}{t_u}}$	$\sqrt{\frac{T}{t_u}}$
Меандр	U_m	0	U_m	1,0	1,0

5.3. Задачи

5.3.1. Аудиторные задачи

Задача № 1. Вольтметр, имеющий: закрытый вход; преобразователь средневывпрямленных значений; шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала, показал 10,0 В. Определить средневывпрямленное значение сигнала.

Задача № 2. Вольтметр с преобразователем средневывпрямленных значений, проградуированный в среднеквадратических значениях гармонического сигнала, имеющий закрытый вход показал 8 В. Определить среднеквадратическое значение сигнала, если его коэффициенты амплитуды и формы равны 1.

Задача № 3. Вольтметр с преобразователем средневывпрямленных значений, проградуированный в среднеквадратических значениях гармонического сигнала, показал 5 В. Определить пиковое, среднеквадратическое и средневывпрямленное значения напряжения, если сигнал имеет синусоидальную форму.

Задача № 4. Вольтметр с пиковым преобразователем, проградуированный в среднеквадратических значениях гармонического сигнала, показал 4,5 В. Определить пиковое, среднеквадратическое и средневывпрямленное значения напряжения для сигнала, имеющего коэффициент амплитуды равный 2,0, а коэффициент формы — 1,57.

Задача № 5. Определить средневывпрямленное значение напряжения, если показание вольтметра с преобразователем средневывпрямленных значений равно 150 В. Вольтметр проградуирован в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала, а исследованный сигнал характеризуется коэффициентом амплитуды, равным 1,41 и коэффициентом формы, равным 1,11.

Задача № 6. Определить пиковое значение напряжения, если показание вольтметра с квадратичным преобразователем равно 2 В для сигнала, имеющего коэффициенты: амплитуды 1,73 и формы 1,16. Вольтметр проградуирован в среднеквадратических значениях гармонического сигнала.

Задача № 7. Вольтметр проградуирован в среднеквадратических значениях гармонического сигнала, а измеряемый сигнал характеризуется следующими параметрами: коэффициент амплитуды равен 1,41, коэффициент формы — 1,11.

Определить среднеквадратическое значение напряжения, если вольтметр с пиковым преобразователем показал 18 В.

Задача № 8. Определить среднеквадратическое значение напряжения, если показание вольтметра с преобразователем среднеквадратических значений равно 27 В. Вольтметр проградуирован в среднеквадратических значениях гармонического сигнала, а коэффициенты амплитуды и формы измеряемого сигнала равны 1.

Задача № 9. Вольтметр проградуирован в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала и имеет закрытый вход. Определить пиковое значение напряжения сигнала синусоидальной формы, если при его исследовании вольтметр средневыпрямленных значений показал 7,8 В.

Задача № 10. Показание пикового вольтметра, проградуированного в пиковых значениях напряжения, равно 3,6 В. Измеряемый сигнал характеризуется коэффициентами: амплитуды, равным 2 и формы, равным 1,57. Определить средневыпрямленное значение напряжения.

6.3.2. Примеры решения задач

Задача № 1. Вольтметр переменного тока с амплитудным детектором показал 20 В. Измеряемое напряжение имеет синусоидальную форму. Определить амплитудное, среднеквадратическое и средневыпрямленное значение напряжения.

Решение. Так как в напряжении нет постоянной составляющей, то показания прибора с открытым и закрытым входом одинаковые. Показание вольтметра соответствует среднеквадратическому значению $U=20$ В. Амплитудное значение равно $U_m = 20 \cdot k_a = 20 \cdot \sqrt{2} = 28,2$ В, а средневыпрямленное значение —

$$U_{\text{ср.в}} = \frac{20}{k_{\phi}} = \frac{20}{1,11} = 18,01 \text{ В.}$$

Задача № 2. Для проведения измерения напряжения прямоугольной формы, изображенной на рисунке 6.4, с максимальным значением сигнала $A_m=14$ В и скважностью импульсов $Q=2$, имеются: вольтметр переменного тока с амплитудным детектором; вольтметр с преобразователями средневыпрямленного и среднеквадратического значений. Определить показания каждого прибора.

Решение. Согласно таблице 6.1, для “меандра” $k_a=k_{\phi}=1$ или $A=A_m=A_{\text{ср.в}}$. Вольтметр с амплитудным детектором покажет значение $U_V = A_m / k_a = 14 / 1,41$ В, что не соответствует ни одному значению измеряемого напряжения.

Вольтметр с преобразователем средневыпрямленного значения покажет $U_V = A_{\text{ср.в}} \cdot k_{\phi} = 14 \cdot 1,11 = 15,54$ В, а вольтметр с преобразователем среднеквадратических значений — $U_V = A \cdot 1 = 14$ В.

Задача № 3. Определить максимальное $U_{\text{макс}}$ и среднеквадратическое U значение напряжения импульса по показанию, равного $U_V=5$ В, вольтметра, работающего в режиме измерения напряжения переменного тока, если на его вход подана последовательность прямоугольных импульсов длительностью $t_{\text{и}}=2$ мкс и периодом следования $T=10$ мкс.

Решение. Представим измеряемое напряжение $u(t)$ в виде суммы двух составляющих напряжения: постоянной U_0 и переменной $u_{\approx}(t) = u(t) - U_0$, как показано на рисунке 6.5.

Далее определим показания вольтметра $U_V = \frac{U'_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}$,

где $U'_{\text{макс}} = U_{\text{макс}} - U_0 = U_{\text{макс}} - \frac{U_{\text{макс}} t_{\text{и}}}{T} = U_{\text{макс}} - \frac{U_{\text{макс}}}{Q} = \frac{U_{\text{макс}}(Q-1)}{Q} = 5\sqrt{2} = 7,05 \text{ В}$

— максимальное значение переменной составляющей.

Затем найдем скважность импульсов

$$Q = \frac{T}{t_{\text{и}}} = \frac{10}{2} = 5.$$

Следующим шагом определим максимальное значение измеряемых импульсов

$$U_{\text{макс}} = \frac{U'_{\text{макс}} Q}{(Q-1)} = \frac{7,05 \cdot 5}{4} = 8,81 \text{ В.}$$

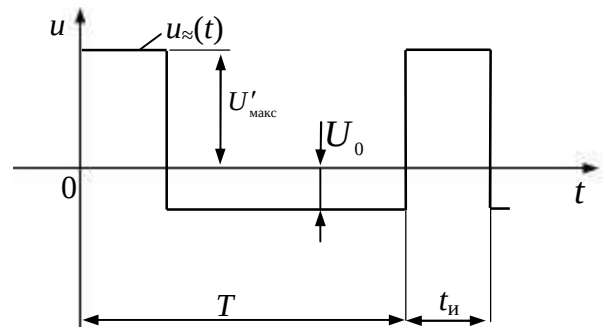


Рисунок 6.5

Далее найдем среднее значение импульса $U_0 = \frac{U_{\text{макс}} t_{\text{и}}}{T} = \frac{8,81}{4} = 2,2 \text{ В.}$

Среднеквадратическое значение импульса можно определить по выражению

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{и}}} U_{\text{макс}}^2 dt} = U_{\text{макс}} \sqrt{\frac{t_{\text{и}}}{T}} = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{Q}}.$$

Коэффициент амплитуды импульса определим по выражению $k_a = \sqrt{Q} = 2.$

$$U = \frac{U_{\text{макс}}}{k_a} = \frac{U_V \sqrt{2Q}}{Q-1} = 3,06 \text{ В.}$$

Задача № 4. Определить показания вольтметра типа ВЗ-44, если на его вход подана периодическая последовательность прямоугольных импульсов, максимальное значение которых $U_{\text{макс}} = 24 \text{ В}$, частота следования $f = 200 \text{ кГц}$, а длительность $t_{\text{и}} = 2,5 \text{ мкс}$. Вольтметр типа ВЗ-44 имеет двухполупериодный преобразователь средневыпрямленного значения, вход открытый и шкалу, проградуированную в действующих значениях синусоидального напряжения.

Решение. Двухполупериодный преобразователь средневыпрямленного значения реагирует на среднее значение напряжения

$$U_{\text{ср}} = U_0 = \frac{U_{\text{макс}}}{Q} = \frac{U_{\text{макс}} \cdot t_{\text{и}}}{T} = 12,0 \text{ В.}$$

Показания вольтметра $U_V = 1,11 \cdot U_{\text{ср}} = 1,11 \cdot 12,0 = 13,32 \text{ В.}$

Задача № 5. Определить показания U_V вольтметра, если на его вход подана периодическая последовательность прямоугольных импульсов с максимальным значением $U_{\text{макс}} = 10 \text{ В}$ с частотой следования $f = 8 \text{ кГц}$ и длительностью

$t_{\text{и}} = 0,5$ мкс. Вольтметр имеет: квадратичный преобразователь; вход закрытый; шкалу проградуированную в действующих значениях синусоидального напряжения. Определить среднеквадратическое значение последовательности импульсов, используя показания вольтметра.

Решение. Вольтметр показывает среднеквадратическое значение переменной составляющей

$$U'_{\text{макс}} = \sqrt{U^2 - U_0^2} = \frac{U_{\text{макс}} \sqrt{Q-1}}{Q}; Q = 250;$$

$$U_V = U'_{\text{макс}} = \frac{10\sqrt{249}}{250} = 0,63 \text{ В}; U_0 = \frac{U_{\text{макс}}}{Q} = 0,04 \text{ В}.$$

Далее определим среднеквадратическое значение последовательности импульсов $U = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{Q}} = U_V \cdot \sqrt{\frac{Q}{Q-1}} = 10,0 \text{ В}.$

6.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. Определить показания электромагнитного вольтметра, на вход которого подано напряжение прямоугольной формы, как изображено на рисунке 6.4, максимальное значение которого равно 141 В, а его частота равна 50 Гц.

Ответ: 141 В.

Задача № 2. К вольтметру с закрытым входом, проградуированного в среднеквадратических значениях синусоидального сигнала, подведено напряжение, изменяющееся по закону $U(t) = 10 + 3,6\sin 314 t$, В. Определить его показание.

Ответ: 2,55 В.

Задача № 3. Определить коэффициент формы измеряемого сигнала, если вольтметр средневыпрямленных значений показал 10,43 В, а вольтметр проградуированный в среднеквадратических значениях напряжения исследуемого сигнала показал 12,0 В.

Ответ: 1,15.

Задача № 4. Сигнал представляет собой последовательность прямоугольных импульсов положительной полярности с частотой равной 100 кГц, вид которой изображен на рисунке 6.4.

Определить показание вольтметра, измеряющего средневыпрямленное значение сигнала, если длительность импульсов равна 0,1 мкс, а максимальное значение — 10 В.

Ответ: 0,1 В.

Задача № 5. Сигнал представляет собой последовательность треугольных импульсов положительной полярности с частотой равной 20 кГц, вид которой изображен на рисунке 6.3. Определить показание вольтметра, измеряющего действующее значение сигнала, если длительность импульсов равна 1 мкс, а максимальное значение — 16 В.

Ответ: 92,8 В.

6.4. Контрольные вопросы

1. Как определяется средняя мощность сигнала?
2. Чем отличаются напряжения (токи) периодические от непериодических?
3. Как определяется действующее значение периодического несинусоидального напряжения?
4. Каково назначение первичных измерительных преобразователей?
5. Как определяется коэффициент амплитуды (K_a)?
6. В каких целях применяется коэффициент формы (K_f)?
7. Что понимают под средневывпрямленным значением напряжения?
8. Как правильно проводить измерения периодических несинусоидальных токов (напряжений)?
9. Какими приборами можно определить амплитудное значение напряжения?
10. Как определить среднеквадратическое значение последовательности импульсов?

Практическое занятие № 7

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ЕМКОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ

7.1. Цель занятия

7.1.1. Ознакомление с методами измерения параметров компонентов цепей.

7.1.2. Усвоение и закрепление теоретических вопросов, связанных с измерением сопротивления, индуктивности и емкости.

7.2. Основные теоретические положения

Приёмники электрической энергии: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. п. относят к пассивным элементам электрической цепи и характеризуют рядом параметров — сопротивлением, ёмкостью, индуктивностью, взаимной индуктивностью, добротностью и т.д. Параметры пассивных элементов делят на основные и производные. К основным параметрам элементов относят сопротивление резисторов, ёмкость конденсаторов, индуктивность (взаимную индуктивность) катушек. К произвольным параметрам относят добротность, постоянную времени, тангенс угла потерь и т.д.

Методы измерения параметров пассивных компонентов электрических цепей делят на прямые и косвенные. Прямые методы измерения разделяют на методы непосредственной оценки и методы сравнения. Методы непосредственной оценки реализуются в приборах прямого действия, в которых измеряемая величина оценивается непосредственно по шкале, заранее отградуированной в соответствующих единицах. К приборам непосредственной оценки относят цифровые измерители параметров элементов, в которых значения параметров отсчитывают непосредственно с цифрового отсчетного устройства.

Косвенный метод измерения параметров основан на измерении напряжения и тока в элементе и последующем расчете параметров по закону Ома.

Методы сравнения реализуются в мостах постоянного или переменного тока и в резонансных приборах при использовании метода замещения.

Рассмотрим применение косвенного метода измерения параметров цепи. На рисунке 7.1 изображена цепь с параллельным соединением пассивных элементов. Установившийся режим цепи с параллельным соединением пассивных

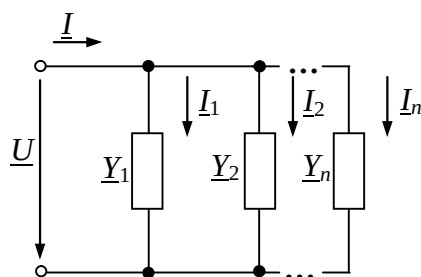


Рисунок 7.1 — Цепь с параллельным соединением пассивных элементов

элементов описывается первым законом Кирхгофа и законом Ома. Для данной цепи форма записи этих законов в символической форме примет вид [5]:

$$\underline{I} = \sum_n \underline{I}_n ; \underline{I} = \underline{Y} \underline{U} ; \underline{I}_n = \underline{Y}_n \underline{U} ,$$

где $\underline{U}$, $\underline{I}$ — напряжение и ток на входе цепи; $\underline{I}_n$ — ток n -й ветви цепи; $\underline{Y}$ — входная проводимость цепи; $\underline{Y}_n$ — проводимость n -й ветви цепи.

Выражения входной проводимости исследуемой цепи в алгебраической и показательной форме записи можно соответственно записать как

$$\underline{Y} = \sum_n \underline{Y}_n = \sum_n (g_n - jb_n) = \sum_n g_n + j \sum_n b_n; \underline{Y} = ye^{-j\varphi},$$

где y — модуль входной проводимости цепи, иначе, полная входная проводимость; φ — аргумент входной проводимости цепи, равный разности фаз входных напряжения и тока; g_n — активная проводимость n -й ветви; b_n — реактивная проводимость n -й ветви, равная разности индуктивной и емкостной проводимостей данной ветви, т.е.

$$b_n = b_{Ln} - b_{Cn} = \frac{1}{\omega L_n} - \omega C_n.$$

Связь между алгебраической и показательной формами входной проводимости цепи, определяется соотношениями:

$$\sum_n g_n = y \cos \varphi; \sum_n b_n = y \sin \varphi; y = \sqrt{\left(\sum_n g_n\right)^2 + \left(\sum_n b_n\right)^2}; \varphi = \arctg \frac{\sum_n b_n}{\sum_n g_n}.$$

Из уравнений для данной цепи следуют соотношения, устанавливающие связь между токами ветвей и напряжением на входе цепи:

$$\underline{U} = \frac{\underline{I}}{\underline{Y}} = \frac{\underline{I}_n}{\underline{Y}_n}.$$

Из полученных соотношений следует, что при заданном по величине и фазе входном напряжении цепи, величины и фазы токов ветвей определяются только параметрами пассивных элементов цепи и частотой источника. Для измерения полных сопротивлений или проводимостей, если их питание производится от источника переменного напряжения с известной частотой, следует использовать вольтметр и амперметр. Методом вольтметра и амперметра можно определить значение активного сопротивления цепи и емкости конденсатора, пренебрегая потерями в последнем. В целях определения значений индуктивности и емкости необходимо дополнительно подключить еще фазометр или ваттметр, чтобы косвенным методом определить их значения. На рисунке 7.2 изображена схема определения параметров цепи косвенным методом.

Измерительные мосты используются для измерения пассивных параметров электрических цепей и величин функционально с ними связанных, таких как частота, фазовый угол и температура. С помощью мостов проводят измерения методом сравнения неизвестного параметра с мерой, поэтому мосты обычно более точны, чем приборы для абсолютных измерений.

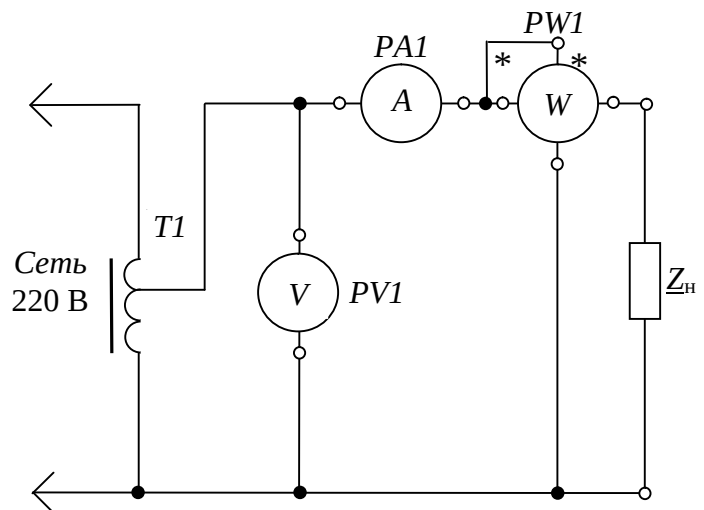


Рисунок 7.2 — Схема определения параметров цепи косвенным методом

На рисунке 7.3. изображена схема одинарного моста. Чтобы достичь требуемой точности, разрешение с которым перестраиваются элементы моста, должно быть очень высоким. Кроме того, нуль-индикатор должен быть достаточно чувствительным, чтобы быть способным обнаружить изменение в элементе моста при его перестройке на наименьший шаг. Одинарный мост имеет четыре плеча Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 источник питания U и нуль-индикатор (НИ). В диагональ AB , называемую выходной (измерительной), включается нагрузка (в частном случае нуль-индикатор) с сопротивлением Z_H .

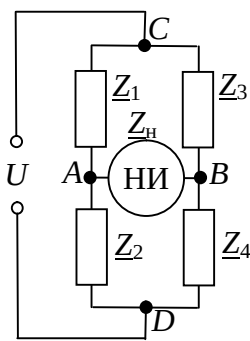


Рисунок 7. 3 — Схема одинарного моста

Зависимость тока I_H в нагрузке от параметров моста и напряжения питания U равна [4]:

$$I_H = U \frac{(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3) Z_H}{Z_H (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_2 (Z_3 + Z_4) + Z_3 Z_4 (Z_1 + Z_2)}.$$

При выполнении равенства

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

ток в нагрузке равен нулю. В этом случае говорят, что достигается равновесие моста. Если Z_4 — неизвестное сопротивление, то его значение можно определить из условия равновесия следующим образом

$$Z_4 = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3.$$

Отсюда следует, что равновесие не зависит от сопротивления нуль-индикатора, напряжения и сопротивления источника питания. Таким образом, высокостабильный источник питания не требуется. Сопротивление Z_3 называется плечом сравнения, а Z_1 и Z_2 — плечами отношения. Отношение сопротивлений Z_1 и Z_2 определяет диапазон изменения измеряемых величин. При измерении малых сопротивлений с помощью одинарных резистивных четырехплечих мостов на результат измерения существенное влияние оказывают сопротивления контактов и соединительных проводов. Для снижения погрешности при таких измерениях применяют мост Уитстона и двойной мост Томсона.

7.3. Задачи

7.3.1. Аудиторные задачи

Задача № 1. Ток диагонали уравновешенного моста равен нулю при сопротивлении его плеч соответственно $R_2=200$ Ом; $R_3=300$ Ом; $R_4=40$ Ом. Определить сопротивление резистора R_X .

Задача № 2. Для измерения сопротивления резистора косвенным методом использовались амперметр и вольтметр, причем показания их были равны 1,5 А и 45 В соответственно. Внутреннее сопротивление амперметра равно $R_A=0,5$ Ом. Определить сопротивление резистора.

Задача № 3. При измерении сопротивления якоря двигателя переменного тока методом амперметра и вольтметра показания приборов были равны 12 А и 35 В соответственно. Внутреннее сопротивление амперметра равно $R_A=0,1$ Ом, а

внутреннее сопротивление вольтметра — $R_V=5$ кОм. Определить дополнительную относительную погрешность, вносимую внутренними сопротивлениями приборов.

Задача № 4. Схема моста для измерения емкости C_x конденсатора и тангенса угла его потерь $\operatorname{tg}\delta_x$ изображена на рисунке 7.4.

Равновесие моста определяется по показанию нуль-индикатора (НИ).

После уравнивания моста на частоте $f=1000$ Гц получены следующие параметры его плеч: $R_2=1000$ Ом; $R_3=500$ Ом; $R_4=10$ Ом; $C_4=0,1$ мкФ. Измеренное значение емкости C_x конденсатора составило $0,01$ мкФ.

Определить при каком сопротивлении R_x мост будет уравновешен.

Задача № 5. Катушку индуктивности подключают сначала к источнику постоянного напряжения 20 В, а затем к источнику переменного напряжения с напряжением 20 В и частотой 50 Гц. Амперметр в первом случае показал 20 А, а во втором — 3 А. Определить активное сопротивление и индуктивность катушки.

Задача № 6. Катушка индуктивности с активным сопротивлением $1,3$ Ом подключена к источнику переменного напряжения $u=36\sin 314t$ В. Показание амперметра, включенного последовательно с катушкой, равно $2,4$ А. Определить индуктивность и добротность катушки.

Задача № 7. Сопротивления плеч мостовой схемы: $R_2=230$ Ом; $R_3=150$ Ом; $R_4=270$ Ом и $R_x=140$ Ом. Напряжение питания моста 36 В. Определить напряжение в диагонали моста при холостом ходе.

Задача № 8. Для определения значения параметров катушки индуктивности используется мост типа Е7-4. Схема моста для измерения параметров катушки индуктивности изображена на рисунке 7.5. После уравнивания моста получены следующие параметры его плеч: $R_2=100$ Ом; $R_1=30$ кОм; $R_4=850$ Ом и емкость конденсатора $C=1$ мкФ.

Определить значения параметров катушки индуктивности, при которых мост будет уравновешен: индуктивности L_x ; активного сопротивления R_x и добротности Q_x .

Задача № 9. В мостовой схеме конструктивные емкости между проводами составляют около 4 пФ.

Определить значение емкости, которое должен иметь образцовый конденсатор, чтобы погрешность от влияния конструктивных емкостей не превышала $1,5\%$.

Задача № 10. Для измерения индуктивности катушки использовались метод амперметра и вольтметра.

Показания приборов были равны $0,5$ А и 8 В соответственно. Частота напряжения сети 50 Гц. Определить индуктивность катушки.

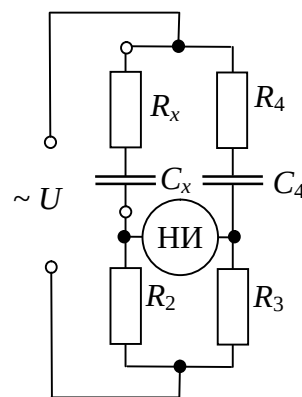


Рисунок 7. 4

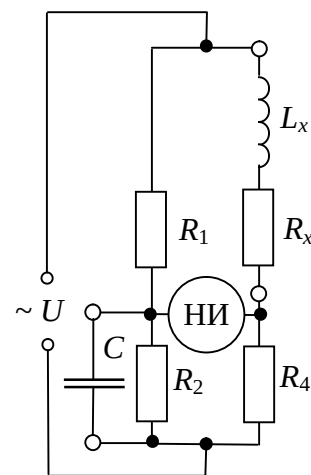


Рисунок 7. 5

7.3.2. Примеры решения задач

Задача № 1. Схема моста для измерения параметров катушки индуктивности изображена на рисунке 7.5. Равновесие моста определяется по показанию нуль-индикатора (НИ). Сопротивления плеч мостовой схемы равны: $R_2=100$ Ом; $R_3=1000$ Ом; $R_4=100$ Ом. Значение емкости конденсатора $C_3=1$ мкФ, а частота напряжения, поданного на мост равна $f=1000$ Гц.

Определить значения параметров катушки индуктивности, при которых мост будет уравновешен: индуктивности L_x ; активного сопротивления R_x и добротности Q_x .

Решение. Вначале определим значение индуктивности $L_x=R_2R_4C_3=0,01$ Гн.

Далее по уравнению равновесия моста найдем значение активного сопротивления $R_x=(R_2 \cdot R_4)/R_3=10$ Ом и затем — значение добротности по выражению $Q_x=(\omega L_x)/R_x=6,3$.

Задача № 2. Схема моста для измерения емкости C_x конденсатора и тангенса угла его потерь $\operatorname{tg} \delta_x$ изображена на рисунке 7.5.

Равновесие моста определяется по показанию нуль-индикатора (НИ).

После уравнивания моста на частоте $f=1000$ Гц получены следующие параметры его плеч: $R_2=1000$ Ом; $R_3=500$ Ом; $R_4=10$ Ом; $C_4=0,1$ мкФ.

Определить значения емкости C_x конденсатора и тангенса угла его потерь $\operatorname{tg} \delta_x$.

Решение. Первым шагом найдем значение емкости конденсатора

$$C_x=(C_4 R_3)/R_2=0,05 \text{ мкФ},$$

а затем определим значение тангенса угла потерь конденсатора

$$\operatorname{tg} \delta_x=\omega C_4 R_4=0,0058.$$

Задача № 3. Для косвенного измерения сопротивления используется миллиамперметр, имеющий предел измерения 0,15 А, класса точности 1,5 и вольтметр с классом точности 1,0 и пределом измерения 15 В. Показания вольтметра составили $U=10$ В, а амперметра — $I=0,1$ А. Определить значение сопротивления и относительную погрешность измерения.

Решение. Вначале найдем значение сопротивления по закону Ома $R = \frac{U}{I} = 100$ Ом. Далее определим относительную погрешность, воспользовавшись правилом определения погрешности косвенных измерений

$$\delta = \frac{\Delta R}{R} 100\% = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta U_V}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_A}{I}\right)^2} 100\% = 2,7\%.$$

Задача № 4. Сопротивления плеч моста, согласно рисунка 7.3, равны следующим значениям: $Z_2=4$ кОм; $Z_3=5$ кОм; $Z_4=2$ кОм. Определить значение сопротивления Z_1 и абсолютную погрешность измерения сопротивления, если относительная погрешность измерения составила $\delta=1,6\%$.

Решение. Вначале определим сопротивление моста $Z_1=(Z_2 Z_4)/Z_3=1,6$ кОм.

Следующим шагом найдем абсолютную погрешность $\Delta R = \frac{\delta \cdot Z_1}{100} = 25,6$ Ом.

Задача № 5. Для измерения сопротивления R , имеющего значение около 80 В используется мост, имеющий число делений шкалы $a_k=1000$ и 3 поддиапазона измерений моста:

- (0...100) Ом;
- (0...1000) Ом;
- (0...10000) Ом.

Предел допускаемой инструментальной составляющей относительной погрешности измерений определяется по выражению $\delta_{и.п} = [1,0 + (2,0 / R)] \%$.

Требуется выбрать поддиапазон измерений моста, чтобы погрешность измерения была наименьшая.

Решение. Погрешность прибора определяется через инструментальную погрешность $\delta_{и.п}$ и погрешность отсчета $\delta_{отс.п}$ по выражению $\delta_{п} = \delta_{и.п} + \delta_{отс.п}$.

Для всех поддиапазонов инструментальная погрешность можно определить как $\delta_{и.п} = [1,0 + (2,0/80)] \% = 1,025 \%$.

Погрешность отсчета можно определить следующим образом: $\delta_{отс.п} \cong \delta_{кв.п}$;

$$\delta_{кв.п} = 50 \% \cdot q/R,$$

где $q = R_k / (n a_k)$; $n = 1$. Погрешность отсчета для первого поддиапазона с пределом шкалы $R_k=100$ Ом составит $\delta_{отс.п1}=0,0625 \%$, для второго поддиапазона с пределом шкалы $R_k=1000$ Ом — $\delta_{отс.п2}=0,625 \%$, а для третьего поддиапазона с пределом шкалы $R_k=10000$ Ом — $\delta_{отс.п3}=6,25 \%$.

7.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. Определить значение сопротивления резистора R_x , включенного в первое плечо моста, если в уравновешенном состоянии сопротивления других плеч моста составляют: $R_2=100$ Ом; $R_3=2000$ Ом; $R_4=524$ Ом.

Ответ: $R_x=26,2$ Ом.

Задача № 2. Цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности с резистором, подключена к генератору. Значение переменного напряжения 36 В. Миллиамперметр, подключенный к цепи, на частоте $f_1=3$ кГц показал ток 100 мА, а на частоте $f_1=7$ кГц — 50 мА. Определить сопротивление резистора.

Ответ: 280 Ом.

Задача № 3. Электрическая цепь, содержащая последовательно соединенные конденсатор и резистором, была подключена к источнику переменного напряжения 36 В. Миллиамперметр, включенный в эту цепь, показал на частоте $f_1=20$ кГц значение 30 мА, а на частоте $f_2=40$ кГц — 59,5 мА. Определить сопротивление резистора и емкость конденсатора.

Ответ: $C=6$ мкФ и $R=1.33$ кОм.

Задача № 4. Методом амперметра и вольтметра были проведены измерения сопротивления резистора, причем показания приборов были равны 11 мА и 10 В соответственно, а вольтметр был подключен непосредственно двумя клеммами к сопротивлению. Внутреннее сопротивление вольтметра $R_V=100$ кОм. Определить сопротивление резистора.

Ответ: $R_x=917$ Ом.

Задача № 5. При измерении сопротивления изоляции обмотки электрической машины на корпус мегомметр показал значение 40 МОм, что составляет 0,4 длины линейной шкалы. Класс точности прибора 1. Определить наибольшую возможную абсолютную погрешность измерения сопротивления.

Ответ: 1 МОм.

7.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы и средства измерения сопротивлений на постоянном токе?
2. Каков принцип действия моста постоянного тока?
3. Можно ли уравновесить мост переменного тока при произвольном характере сопротивлений плеч?
4. В чем особенности измерения малых сопротивлений?
5. Каков принцип действия моста переменного тока?
6. Какие физические величины могут быть измерены мостом переменного тока?
7. Чем обусловлена погрешность мостов переменного тока?
8. Какими методами и средствами можно измерить параметры катушки индуктивности и конденсатора?
9. Какие преимущества имеет четырехзажимное включение измеряемого резистора в схему одинарного моста?
10. Чем обусловлена погрешность мостов постоянного тока?

Практическое занятие № 8

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫМИ ПРИБОРАМИ

8.1. Цель занятия

8.1.1. Ознакомление с методами измерения цифровыми приборами: напряжения; тока; сопротивления; частоты; фазы.

8.1.2. Усвоение и закрепление теоретических вопросов, связанных с измерением электрических параметров цифровыми приборами.

8.2. Основные теоретические положения

Рассмотрим вначале основные погрешности при цифровом измерении частоты. Относительная погрешность измерения частоты f частотомером определяется по следующему выражению [5]:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} = \pm \left(\delta_{f_0} + \frac{1}{N} \right) = \pm \left(\delta_{f_0} + \frac{1}{f \cdot \Delta t_0} \right), \quad (8.1)$$

где $N = \frac{\Delta t_0}{T} = \Delta t_0 \cdot f = \frac{K \cdot f}{2 \cdot f_0}$ — код числа, поступающего на цифровое отсчетное устройство; Δt_0 — измерительный интервал, за время которого подсчитывается число переходов от нуля к единице, формируемый путем деления частоты опорного генератора f_0 на коэффициент деления K ; $T = \frac{1}{f}$ — период измеряемой частоты; δ_{f_0} — мультипликативная погрешность, значение которой при кварцевой стабилизации частоты составляет $10^{-4} \dots 10^{-6} \%$ либо $(10^{-6} \dots 10^{-8})\%$. Вторая составляющая выражения (8.1) — $\frac{1}{N}$ представляет аддитивную погрешность, зависящую от частоты.

Для того чтобы при значении частоты $f = f_{\max}$ составляющие выражения (8.1) были одного порядка необходимо, чтобы $N_{\max} = 10^6 \dots 10^8$. Поэтому для достижения наибольшей точности частотомеры должны иметь до 10 знаков. Увеличение второй составляющей с уменьшением частоты f можно задержать, увеличивая величину измерительного интервала Δt_0 , что приводит к снижению быстродействия. Значение измерительного интервала Δt_0 , составляющее обычно $\Delta t_0 = 0,1; 1; 10$ с, осуществляется с помощью переключателя, при этом на индикаторе изменяется место запятой, а иногда и обозначение единиц измерения.

Для того чтобы счётчик не переполнялся, интервал Δt_0 следует выбирать из условия: $\Delta t_0 \cdot f \leq N_{\max}$.

Рассмотрим расчет основных погрешностей, возникающих при цифровом измерении интервала времени. Цифровые хронометры предназначены для измерения различных промежутков времени с представлением результата измерения в цифровой форме. К этим приборам относятся:

— измеритель периода периодического сигнала (T);

- измеритель длительности импульса (τ);
- измеритель интервала времени (t).

Работа всех приборов основана на времяимпульсном преобразовании.

В этой схеме те же источники погрешностей, что и для цифровых частотомеров, поэтому относительная погрешность цифровых хронометров будет равна [5]:

$$\delta = \frac{\Delta T}{T} = \pm \left(\delta_{f_0} + \frac{1}{f_0 \cdot T} \right).$$

Прибор этого типа позволяет измерять и низкую частоту, так как $f = \frac{1}{T}$, а с ростом T значение f падает.

Для цифрового измерения фазового сдвига применяются компенсационные цифровые фазометры и фазометры прямого преобразования. Выбор метода измерения угла сдвига фаз зависит от диапазона частот, амплитуды сигнала и, главным образом, от требуемой точности измерения.

В основе работы цифровых фазометров всех систем лежит принцип преобразования измеряемого угла сдвига фаз во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению измеряемой величины. Длительность временного интервала определяется методом дискретного счета непосредственно, или с промежуточным преобразованием длительности временного интервала в пропорциональное ему значение величины напряжения постоянного тока.

Фазометры с непосредственным преобразованием значения длительности временного интервала в код в свою очередь подразделяются на две группы: с измерением за один период входных напряжений и с измерением за несколько периодов входных напряжений. Фазометры первой группы называются фазометрами мгновенного значения, а второй группы — фазометрами среднего значения.

Наибольшую точность имеют фазометры с усреднением. Для фазометра этого типа значение угла сдвига фаз определяется как

$$\Delta\varphi = qN,$$

где q — значение единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства фазометра. Погрешность дискретности прибора имеет две составляющие: одна связана с ограниченным числом импульсов в каждой пачке, а другая — с ограниченным числом пачек, попадающих в измерительный интервал.

Для цифровых вольтметров и амперметров используются формы выражения пределов допускаемых погрешностей.

Предел допустимой погрешности цифрового измерительного прибора рассчитывают по паспортным данным, содержащим формулу для расчета погрешности именно данного прибора.

При отсутствии паспорта за оценку погрешности прибора принимают единицу наименьшего разряда цифрового индикатора. Так, при наблюдаемой на индикаторе частоте 231,3 кГц погрешность частотомера оценивают как 0,1 кГц.

8.3. Задачи

8.3.1. Аудиторные задачи

Задача № 1. Предельное значение основной погрешности при конечном значении измеряемой величины составляет $\delta_1 = \pm 0,01\%$, а при значении, равном половине конечного — $\delta_2 = \pm 0,012\%$. Написать обозначение класса точности c/d цифрового вольтметра.

Задача № 2. В наличии имеются два цифровых вольтметра. Первый вольтметр имеет класс точности $c_1/d_1 = 0,1/0,05$, а второй — класс точности $c_2/d_2 = 0,15/0,025$. Оба вольтметра имеют верхний предел измерения $U_B = 10$ В. Определить значение измеряемого напряжения, при котором погрешность измерения первым вольтметром будет меньше, чем вторым.

Задача № 3. В наличии имеются два вольтметра:

— электромеханический вольтметр класса точности $K_1 = 0,1$ с верхним пределом измерения $U_{B1} = 15$ В;

— цифровой вольтметр класса точности $c_2/d_2 = 0,2/0,1$ с верхним пределом измерения $U_{B2} = 10$ В.

Измеряемое напряжение равно $U = 5,2$ В. Определить применимость вольтметров для измерения напряжения с наименьшей погрешностью.

Задача № 4. Определить число импульсов, накопленных в электронном счетчике цифрового вольтметра с двукратным интегрированием, при измерении постоянного напряжения размером 2,765 В, если опорное напряжение в вольтметре равно 10 В, частота следования счетных импульсов — 0,1 МГц, время интегрирования измеряемого напряжения — 10 мс.

Задача № 5. Определить число импульсов, поступивших на вход электронного счетчика в процессе измерения периода сигнала частотой, равной 100 Гц, если коэффициент деления делителя частоты в периодомере равен 100, а частота следования импульсов опорного генератора равна 10 МГц.

Задача № 6. Частотомером ЧЗ-33 за время, равное 1 с, произведено измерение частоты равной 9,0 МГц. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения частоты, если относительная нестабильность кварцевого генератора равна $\pm 6 \cdot 10^{-7}$.

Задача № 7. Частотомер ЧЗ-34А в режиме измерения частоты показал 14,0012 кГц при времени измерения равном 10 с. Определить предел основной допускаемой относительной погрешности измерения частоты.

Задача № 8. Частотомером ЧЗ-36 необходимо измерять частоту сигнала в диапазоне 5...60 Гц. Выбрать режим измерения прибора, обеспечивающий измерение с относительной погрешностью меньше 0,003%.

Задача № 9. Показание цифрового периодомера равно 34,5123 мс, а частота следования счетных (тактовых) импульсов равна 100 кГц. Определить коэффициент деления делителя частоты исследуемого сигнала в цифровом периодомере.

Задача № 10. Измерение фазового сдвига четырехполюсника, с помощью фазометра, выполнено на частоте равной 10 кГц, частота генератора счетных импульсов равна 10 МГц, коэффициент деления этой частоты 36000, а значение

фазового сдвига составило 18 градусов. Определить время измерения фазового сдвига с помощью цифрового фазометра с времяимпульсным преобразованием с использованием принципа измерения в течение постоянного времени.

8.3.2. Примеры решения задач

Задача № 1. Предел допускаемой основной погрешности прибора выражается формулой

$$\delta_{\text{пред}} = \pm \left[0,5 + 0,1 \left(\left| \frac{U_{\kappa}}{U_x} \right| - 1 \right) \right]. \quad (8.2)$$

Предельное значение шкалы прибора равно $U_{\kappa} = 100$ В. Определить возможную погрешность цифрового вольтметра на верхнем пределе измерения и в середине диапазона измерения, если предел допускаемой основной погрешности прибора выражается формулой (8.2)

Решение. Вначале определим погрешность цифрового вольтметра на верхнем пределе измерения $\delta_{\text{пред}} = \pm \left[0,5 + 0,1 \left(\frac{100}{100} - 1 \right) \right] = 0,5 \%$. Далее найдем погрешность в середине диапазона измерения $\delta_{\text{пред}} = \pm \left[0,5 + 0,1 \left(\frac{100}{50} - 1 \right) \right] = 0,6 \%$.

Задача № 2. Для измерения периода есть цифровой частотомер, имеющий следующие параметры: мультипликативная погрешность $\delta_{f_0} = 10^{-6}$; $f_0 = 1$ МГц $N_{\text{max}} = 999999$. Значение измеренного периода — $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{30,45} = 0,0328407$ с.

Определить погрешность измерения периода.

Решение. Вначале определим число просчитанных импульсов счетчиком $N_0 = f_0 T = 10^6 \cdot 0,03284072 = 3284072$. На индикаторе будет высвечен результат измерения 32,8 мс. Далее найдем погрешность измерения

$$\delta = \pm \left(10^{-6} + \frac{1}{3284072} \right) = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ или в процентах — } 0,31 \cdot 10^{-2} \%$$

Задача № 3. В наличии есть четыре типа вольтметра:

— цифровой вольтметр класса точности $c_4/d_4 = 0,5/0,1$ с верхним пределом измерения $U_{\text{цв}} = 100$ В;

— электромеханический вольтметр класса точности $k_1 = 1,0$ с верхним пределом измерения $U_{\text{эмв1}} = 30$ В;

— электромеханический вольтметр класса точности $k_2 = 0,2$ с диапазоном измерения $U_{\text{эмв2}} = (-20 \dots +20)$ В;

— электромеханический вольтметр класса точности $k_3 = 1,5$ с диапазоном измерения $U_{\text{эмв3}} = (10 \dots 30)$ В;

Для измерения напряжения $U = 25$ В можно использовать один из четырех вольтметров:

Определить наиболее точный прибор из всех предложенных.

Решение. Из перечисленных приборов следует выбрать тот, у которого при измерении напряжения $U=25$ В будет меньшая относительная погрешность.

Вначале сделаем расчет относительной погрешности цифрового вольтметра. Для этого воспользуемся выражением (8.2)

$$\delta_1 = \pm \left[c + d \left| \frac{U_{\text{цв}}}{U} - 1 \right| \right] = \pm \left[0,5 + 0,1 \left| \frac{100}{25} - 1 \right| \right] = \pm [0,5 + 0,1 \cdot 3] = \pm 0,8\%.$$

Затем сделаем расчет относительной погрешности электромеханического вольтметра класса точности $\kappa_1=1,0$:

$$\delta_2 = \pm \gamma_2 \frac{U_{N2}}{U} = \pm \kappa_1 \frac{U_{N2}}{U},$$

где γ_2 — приведенная погрешность первого прибора; U_{N2} — его нормирующее значение, равное в этом случае верхнему пределу измерения.

Подставим значения в последнюю формулу, получим

$$\delta_2 = \pm 1,0 \frac{30}{25} = \pm 1,2\%.$$

Следующим шагом определим относительную погрешность электромеханического вольтметра класса точности $\kappa_2=0,2$. Для этого, как и в предыдущем случае, найдем нормирующее значение $U_{N2} = |-20| + |+20| = 40$ В, а потом относительную погрешность $\delta_3 = \pm \gamma_3 \frac{U_{N3}}{U} = \pm \kappa_2 \frac{U_{N3}}{U} = \pm 0,2 \frac{40}{25} = \pm 0,3\%$.

Следующим шагом найдем относительную погрешность электромеханического вольтметра класса точности $\kappa_3=1,5$. Для этого, вначале найдем нормирующее значение $U_{N4} = 30 - 20 = 10$ В, а затем — относительную погрешность

$$\delta_4 = \pm \gamma_4 \frac{U_{N4}}{U} = \pm \kappa_3 \frac{U_{N4}}{U} = \pm 1,5 \frac{20}{25} = \pm 1,2\%.$$

Окончательно сделаем сравнение предложенных приборов для более точного измерения напряжения. Расчеты показывают, что наиболее точный прибор для измерения напряжения — электромеханический вольтметр класса точности $\kappa_2=0,2$ с диапазоном измерения $U_{\text{эмв2}} = (-20 \dots +20)$ В.

Задача № 4. В наличии есть цифровой частотомер, имеющий следующие параметры: мультипликативная погрешность равна $\delta_{f_0}=10^{-6}$; $N_{\text{max}}=999999$; $f_{\text{max}}=10$ МГц. Измерительный интервал на приборе установлен равным $\Delta t_0=0,1$ с. Определить относительную погрешность измерения частоты $f=3677854$ Гц.

Решение. Первым шагом найдем $N=\Delta t_0 \cdot f=367785 < N_{\text{max}}$. Далее по выражению (8.1) найдем относительную погрешность измерения частоты

$$\delta = \pm \left(\delta_{f_0} + \frac{1}{f \cdot \Delta t_0} \right) = \pm \left(10^{-6} + \frac{1}{367785} \right) = 3,72 \cdot 10^{-6}\%.$$

Задача № 5. Для измерения частоты имеется частотомер, имеющий мультипликативную погрешность равную $\delta_{f_0}=10^{-6}$. Измерительный интервал на приборе установлен равным $\Delta t_0=0,1$ с, а измеряемая частота равна $f=80,36$ Гц. Определить эффективность использования прибора для измерения низких частот.

Решение. Сначала найдем $N = \Delta t_0 \cdot f = 8$ Гц. Отсюда определим относительную погрешность измерения частоты $\delta = \pm \left(10^{-6} + \frac{1}{8} \right) = 0,125\%$. Полученное значение погрешности показывает, что погрешность измерения на низких частотах существенно возрастает, поэтому если требуется более высокая точность измерений, следует выбрать прибор с более низкой погрешностью.

8.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. У цифрового амперметра предел измерения первого поддиапазона равен 10 мкА. Всего в приборе имеет семь поддиапазонов измерения, причем верхние пределы измерения каждого последующего поддиапазона в 10 раз больше предыдущего. Определить максимальный ток, который можно измерять с помощью этого амперметра, а также выбрать поддиапазон измерения для измерения токов 90 мА и 8 А.

Ответ: 10 А.

Задача № 2. У цифрового вольтметра В7-18 относительная погрешность нормирована формулой $\delta = \pm [0,05 + 0,02 \cdot U_{\text{в}} / U]$, где $U_{\text{в}}$ – верхний предел измерения. Определить класс точности он относится.

Ответ: $c/d = 0,1/0,02$.

Задача № 3. Показания цифрового вольтметра класса точности $c/d = 0,5/0,2$ составили $U = 24,68$ В. Определить предельные абсолютную и относительную погрешности результата измерения.

Ответ: $U = 24,7 \pm 0,4$, В; $\delta = \pm 0,7\%$.

Задача № 4. В наличии имеются два типа вольтметров:

— электромеханический вольтметр класса точности $k_1 = 0,1$ с верхним пределом измерения $U_1 = 30$ В;

— цифровой вольтметр класса точности $c_2/d_2 = 0,2/0,1$ с верхним пределом измерения $U_2 = 10$ В.

Вольтметрами было измерено напряжение, равное $U = 9$ В. Определить

Определить наиболее точный прибор из всех предложенных.

Ответ: вторым.

Задача № 5. Цифровой вольтметр с пределом измерения $U_{\text{в}} = 100$ В при измерении напряжений $U_1 = 50$ В и $U_2 = 25$ В имеет относительные погрешности $\delta_1 = \pm 0,3\%$ и $\delta_2 = \pm 0,5\%$. Определить класс точности c/d прибора.

Ответ: $c/d = 0,2/0,1$.

8.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют преимущества цифровых измерительных устройств перед аналоговыми измерительными приборами?

2. От каких факторов зависит погрешность цифровых измерительных приборов?

3. Какие меры следует предпринять для уменьшения погрешности цифровых измерительных приборов?

4. Как определить относительную погрешность измерения цифровых измерительных приборов?
5. Как расширить предел измерения переменного напряжения цифровым вольтметром?
6. В чем заключается принцип, наиболее применяемого в цифровых измерительных приборах, преобразования напряжения постоянного тока в интервал времени?
7. Как определить предел допустимой погрешности цифрового измерительного прибора?
8. В чем заключаются недостатки цифровых измерительных приборов?
9. Каков принцип работы цифрового измерителя частоты и фазы?
10. В чем заключается принцип наиболее простого типа преобразования напряжения постоянного тока в частоту?

Практическое занятие № 9

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

9.1. Цель занятия

9.1.1. Ознакомление с методами измерения магнитных и неэлектрических величин.

9.1.2. Усвоение и закрепление теоретических вопросов, связанных с измерением магнитных и неэлектрических величин.

9. 2. Основные теоретические положения

В современной измерительной технике широкое применение нашли электрические преобразователи (датчики) неэлектрических величин в электрические величины, среди которых можно выделить механические (для измерения перемещения и вращения), теплофизические (для определения: температуры; давления; влажности и т.д.). Измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины от входной измеряемой неэлектрической величины.

Важной характеристикой прибора является чувствительность, определяемая через отношение приращения показания указателя $\partial\alpha$ к приращению ∂x измеряемой величины x , как $S = \frac{\partial\alpha}{\partial x}$.

Методы измерения магнитных величин (магнитного потока, магнитной индукции и напряженности магнитного поля) основаны на их преобразовании в электрический сигнал. Наиболее распространенным является индукционный метод. Принцип действия метода основан на возникновении ЭДС индукции в проводнике, помещенном в изменяющееся магнитное поле. На этом методе основан прибор для измерения магнитного потока — веберметр, в котором отклонение указателя α пропорционально величине магнитного потока [5]:

$$\Phi = \frac{c_\phi \alpha}{\varpi_k},$$

где c_ϕ — цена деления прибора, ϖ_k — число витков измерительной катушки.

Для измерения магнитной индукции применяют тесламетры, в которых нашел применение эффект Холла в полупроводниковых пластинах, помещенных в магнитное поле. Величина, возникающей при этом ЭДС зависит от индукции поперечного магнитного поля и тока продольного электрического поля [5]:

$$E_x = s_H B_E = \frac{\kappa_H I B_E}{d},$$

где s_H — чувствительность при номинальном токе преобразователя Холла, В/Тл; κ_H — постоянная Холла, м/(А·с); d — толщина пластины, м; B_E — магнитная индукция, Тл.

Индукционные преобразователи нашли применение в приборах для измерения скорости линейных или угловых перемещений.

Принцип действия этих преобразователей основан на законе электромагнитной индукции, согласно которого, индуцированная электродвижущая сила E определяется скоростью изменения магнитного потока Φ , сцепленного с катушкой из ϖ витков [5]:

$$E = -\varpi \frac{d\Phi}{dt}.$$

Ёмкостные преобразователи используются при измерении различных неэлектрических величин, функционально связанных с любым из изменяющихся параметров конденсатора. Ёмкостные преобразователи представляют собой плоские или цилиндрические конденсаторы, ёмкость которых изменяется под воздействием неэлектрической величины. Такие преобразователи могут применяться для измерения малых перемещений и измерения уровня жидкости

Для плоского конденсатора ёмкость определяется по формуле [5]:

$$C = \frac{\varepsilon_a S}{\delta},$$

а для цилиндрического конденсатора [16]:

$$C = \frac{2\pi l \varepsilon_a S}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора; S — площадь обкладок конденсатора; δ — расстояние между обкладками; l — длина активной части электродов цилиндрического конденсатора; d_1 , d_2 — радиусы внутреннего и внешнего электродов цилиндрического конденсатора.

Для измерения температуры наибольшее применение получили терморезисторы и термоэлектрические преобразователи (термопары).

Терморезисторы — это измерительные преобразователи температуры в изменение активного сопротивления.

Сопротивление платиновых терморезисторов выражается соотношениями [16] в диапазоне температур $0 \dots +650^\circ\text{C}$ [9]:

$$R_t = R_0(1 + At^0 + B(t^0)^2),$$

где R_0 — сопротивление измерительного преобразователя при 0°C ; t^0 — измеряемая температура; A , B — коэффициенты, определяемые свойствами материала преобразователя.

Медные терморезисторы применяются в диапазоне от -60 до 180°C . При расчёте сопротивления медных терморезисторов пользуются соотношением [5]:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t^0),$$

где α — ТКС меди.

Для измерения температуры терморезистор включается в мостовую схему.

К следующей группе измерительных преобразователей температуры относятся термоэлектрические преобразователи (термопары). Измерение термоЭДС производится милливольтметром. Пьезоэлектрические преобразователи

нашли применение для измерения: силы; давления; перемещения и количества вещества. Принцип действия пьезоэлектрических измерительных преобразователей основан на пьезоэлектрическом эффекте.

9.3. Задачи

9.3.1. Аудиторные задачи

Задача № 1. В однослойной кольцевой катушке веберметра индуктивностью 30 мГн проходит номинальный ток 3 А. Площадь поперечного сечения катушки 10^{-4} м^2 ; число ее витков 700. Определить верхний предел измерения прибора по величине магнитного потока.

Задача № 2. В качестве чувствительного элемента измерителя мощности с пределом измерения 800 Вт используется датчик Холла, причем ток продольной цепи меняется от 0,5 до 6 А, а индукция поперечного магнитного поля — от 0,4 до 1,1 Тл пропорциональна напряжению потребителя при изменении его значения от 80 до 160 В. Датчик Холла имеет толщину пластины 0,5 мм, а постоянная датчика равна $k_H = 0,02 \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$. Определить изменение ЭДС и чувствительность прибора к мощности.

Задача № 3. Генераторный датчик положения имеет в своем составе резонансный контур. Индуктивность дросселя, входящего в этот контур, при приближении металлической пластины изменяется от 2 до 80 мГн. Какой конденсатор необходимо подключить параллельно дросселю, чтобы резонансная частота датчика в исходном положении была 10 кГц? Определить емкость конденсатора, который необходимо подключить параллельно дросселю, чтобы резонансная частота датчика в исходном положении была 22 кГц.

Задача № 4. Для измерения освещенности помещения используется фотоэлемент, ток которого изменяется по закону $I = kE$ в диапазоне изменения освещенности от 20 до 200 лк. При начальной освещенности $E_0 = 100$ лк ток фотоэлемента равен $I_0 = 0,1$ мА. Определить измерительный ток элемента при 40 и 140 лк.

Задача № 5. Для измерения температуры используются термопары, включенные последовательно. ЭДС каждой термопары 0,5 В, а внутреннее сопротивление равно 40 Ом. Измерительная цепь имеет сопротивление 100 Ом. Определить количество последовательно включенных термопар, чтобы ток в измерительной цепи был не менее 20 мА.

Задача № 6. Определить количество метров медной проволоки диаметром 0,33 мм, необходимой для изготовления медного термометра с номинальным сопротивлением 40 Ом при 20 °С.

Задача № 7. Термопреобразователь имеет статическую характеристику, описываемую уравнением $I = aT/(bT^2 + 1)$, где $a = 0,1 \text{ мА/К}$; $b = 10^{-5} \text{ 1/К}$. Определить значение температуры, соответствующее максимальному уровню сигнала преобразователя.

Задача № 8. В качестве датчика для измерения температуры используется термодатчик с термопарой. Для измерения значения термоЭДС с датчика используется электронный вольтметр, измеряющий с точностью до 5 мкВ значе-

ние термо-ЭДС. Определить точность измерения, если при изменении температуры на 100°C в термопаре возникает $E_T = 5\text{ мВ}$.

Задача № 9. В качестве датчика для измерения температуры используется термистор, сопротивление которого при нагревании изменяется по закону $R = Ae^{B/T}$, где A и B — постоянные коэффициенты, T — абсолютная температура, К. Тестовые измерения термистора показали, что при температуре $\Theta_1 = 20^\circ\text{C}$ сопротивление термистора составило $R_1 = 4,8\text{ кОм}$, а при температуре $\Theta_2 = 100^\circ\text{C}$ сопротивление термистора приняло значение $R_2 = 0,48\text{ кОм}$. Определить параметры термистора A и B .

Задача № 10. В качестве преобразователя угла поворота используется переменный конденсатор, состоящий из двух полуокружностей. Расстояние между пластинами $0,6\text{ мм}$, а радиус полуокружности равен 30 мм . Датчик подключен к источнику переменного напряжения 27 В частотой 1000 Гц . Определить чувствительность датчика и ток, протекающий через конденсатор при углах поворота пластин датчика 60° ; 90° и 120° .

9.3.2. Примеры решения задач

Задача № 1. Для измерения давления используется мостовая схема измерения, изображенная на рисунке 9.1. Сопротивления в плечах моста имеют следующие параметры: $R_1 = R_4 = 20\text{ кОм}$ и $R_2 = 100\text{ кОм}$. Датчиком давления выступает кремниевый тензорезистор, сопротивление которого меняется от 80 до 120 кОм при изменении давления от 20 до 60 кПа . Определить значение давления контролируемой среды, при котором наступает равновесие моста.

Решение. Вначале найдем значение сопротивления тензорезистора, при котором наступает равновесие моста

$$R_{1t} = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_3} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Далее определим значение давления контролируемой среды. Полученное значение сопротивления тензорезистора лежит посередине диапазона изменяющегося сопротивления, а этому значению соответствует значение середины диапазона изменения давления — 40 кПа .

Задача № 2. При нагревании сопротивление металлического резистора определяется соотношением $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 — сопротивление при 0°C ; θ — температура; α — температурный коэффициент сопротивления. При температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ измеренное значение сопротивления резистора составило $R_{t1} = 108,56\text{ Ом}$, а при температуре $t_2 = 100^\circ\text{C}$ — $R_{t2} = 142,8\text{ Ом}$. Определить параметры резистора R_0 и α .

Решение. Для температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ сопротивление R_0 определяется по выражению $R_0 = \frac{R_{t1}}{(1 + \alpha t_1)}$, а температуры $t_2 = 100^\circ\text{C}$ — $R_0 = \frac{R_{t2}}{(1 + \alpha t_2)}$. Прирав-

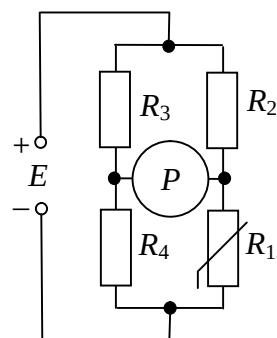


Рисунок 9.1

няв два соотношения, получим температурный коэффициент сопротивления $\alpha = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1}t_2 - R_{t_2}t_1} = 4,28 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$, а затем значение сопротивления $R_0 = 100 \text{ Ом}$ при 0°C . Из справочника, полученное значение температурного коэффициента сопротивления α соответствует материалу — медь.

Задача № 3. Для измерения температуры используется схема термопреобразователя с делителем напряжения, изображенная на рисунке 9.2. Термопреобразователь представляет собой медный термометр сопротивления с номинальным сопротивлением 20 Ом при 0°C . Определить напряжение на сопротивлении нагрузки, равном $R_H = 25 \text{ Ом}$ при температурах 20 и 40°C , если $U_{\text{пит}} = 10 \text{ В}$.

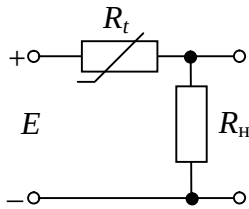


Рисунок 9.2

Решение. Сопротивление металлического резистора определяется соотношением $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где R_0 — сопротивление при 0°C ; t — температура; α — температурный коэффициент сопротивления. Температурный коэффициент сопротивления меди, взятый из справочника, равен $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$. При температуре $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ значение сопротивления резистора примет значение $R_{t_1} = 21,71 \text{ Ом}$, а при температуре $t_2 = 40^{\circ}\text{C}$ — $R_{t_2} = 23,42 \text{ Ом}$.

Далее определим значение напряжения на нагрузке при температуре $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ $U_1 = \frac{U}{R_H + R_{t_1}} R_H = 5,35 \text{ В}$, а затем найдем значение напряжения на нагрузке при $t_2 = 40^{\circ}\text{C}$ $U_2 = \frac{U}{R_H + R_{t_2}} R_H = 5,16 \text{ В}$.

Задача № 4. Для измерения угла поворота используется схема, изображенная на рисунке 9.3. В качестве датчика угла поворота используется потенциометр R_p , сопротивление которого линейно изменяется при изменении угла поворота от 0 до 180° от 47 кОм до нуля. ЭДС источника питания равна $E = 10 \text{ В}$. Определить показание цифрового вольтметра, подключенного к сопротивлению $R_1 = 10 \text{ кОм}$, при положении движка сопротивления R_p посередине.

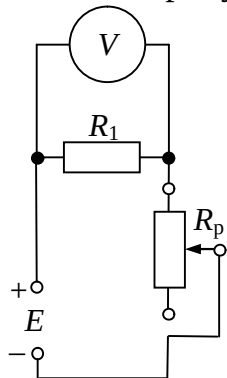


Рисунок 9.3

Решение. В ходе решения задачи вначале вычислим сопротивление всей измерительной цепи

$$R_{\Sigma} = R_1 + \frac{R_p}{2} = 10 \cdot 10^3 + 23,5 \cdot 10^3 = 33,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Далее, по закону Ома, определим значение тока, протекающего через измерительную цепь $I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{10}{33,5 \cdot 10^3} = 0,298 \cdot 10^{-3} \text{ А}$, а затем определим показание вольтметра $U_V = I \cdot R_1 = 9,98 \text{ В}$.

Задача № 5. Для измерения высоких температур используется датчик, представляющий собой вольфрамовую нить, имеющую длину $0,24 \text{ м}$ и диаметр

0,05 мм. Этот датчик включен последовательно с амперметром, имеющим внутреннее сопротивление равное 1 Ом. Вся измерительная цепь подключена к источнику ЭДС, значение которого равно 48 В. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама, взятый из справочника, равен $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$. Определить показания прибора при температуре 500 $^{\circ}\text{C}$.

Решение. Вначале необходимо определить сопротивление вольфрамовой нити по формуле

$$R_0 = \rho \frac{l}{s},$$

где l — длина; s — площадь сечения; $\rho = 0,055 \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2)/\text{м}$ — удельное сопротивление вольфрама. По данным условия задачи сопротивление нити составит

$R_0 = \rho \frac{l}{s} = \frac{0,055 \cdot 4 \cdot 0,24}{\pi d^2} = 6,7 \text{ Ом}$. Далее найдем сопротивление спирали при температуре 500 $^{\circ}\text{C}$ $R_t = R_0(1 + \alpha t) = 6,7(1 + 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 500) = 10,05 \text{ Ом}$. Следующим шагом определим значение тока, протекающего по измерительной цепи

$$I = \frac{E}{R_t + R_A} = \frac{48}{11,05 \cdot 10^3} = 4,34 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

9.3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача № 1. Индуктивность катушки датчика перемещения линейно меняется от 0,1 до 1,1 мГн при передвижении стержня в катушке от 0 до 10 мм. Активное сопротивление катушки 1 Ом, частота переменного напряжения питания датчика 50 Гц. Определить полное сопротивление индуктивного датчика перемещения.

Ответ: 2,13 Ом.

Задача № 2. Вдоль пластины из кремния толщиной 1 мм протекает ток 2 А. Постоянная Холла равна $k_H = 0,01 \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$. Определить напряжение, возникающее на поперечных краях пластины, при значениях магнитной индукции 1,2 Тл.

Ответ: 24 В.

Задача № 3. Веберметр имеет верхний предел измерения 10^{-3} Вб и шкалу на 100 делений, класс точности прибора 1,5. Число витков измерительной катушки 250, а магнитное сопротивление цепи равно $R_M = 10^{-6} \text{ 1/Гн}$. Определить наибольшую абсолютную погрешность измерения, а также номинальный ток измерительной катушки.

Ответ: $1,5 \cdot 10^{-5}$ Вб.

Задача № 4. Номинальная функция преобразования термопреобразователя сопротивления имеет вид: $R_{t_{\text{ном}}} = (1 + 0,00428 t) \cdot 100 \text{ Ом}$. Определить относительную погрешность преобразователя, если в результате эксперимента получены следующие действительные значения температуры и сопротивления: $t_d = 50,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_{t_d} = 121,0 \text{ Ом}$.

Ответ: 0,33 %.

Задача № 5. Номинальная функция преобразования термопреобразователя сопротивления имеет следующий вид: $R_{t_{\text{ном}}} = (1 + 0,00428 t) \cdot 100 \text{ Ом}$. Опре-

делить относительную погрешность преобразователя по входу, если в результате эксперимента получены следующие действительные значения температуры и сопротивления: $t_d=20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $R_{t_d}=109,0\text{ }\Omega$.

Ответ: 5,1%.

9.4. Контрольные вопросы

1. Для измерения каких неэлектрических величин используется реостатный измерительный преобразователь?
2. Что представляет собой тензорезисторный измерительный преобразователь?
3. Каков принцип действия индуктивного измерительного преобразователя?
4. Для измерения каких неэлектрических величин используется индуктивный измерительный преобразователь?
5. Что представляет собой терморезисторный измерительный преобразователь?
6. Что представляет собой емкостной измерительный преобразователь?
7. Для измерения каких неэлектрических величин используется емкостной измерительный преобразователь?
8. В чем состоит сущность эффекта Холла?
9. В каких измерительных преобразователях может использоваться эффект Холла?
10. Какие физические принципы могут использоваться для измерения силы, давления и расхода жидкости или газа измерительными преобразователями?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев, Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / Ю. В. Матвеев. — Севастополь : Издательство Севастопольского государственного университета, 2019. — 295 с. : ил. ; 20 см. — Список сокращений: с. 10-11. — Библиография: с. 274-279. — 256.33 р. — Текст : непосредственный.
2. Сергеев А. Г. Метрология. Стандартизация. Сертификация [Текст]: учебник для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Терегеря. — М.: Логос, 2011. — 820 с.
3. Мишин В.М. Метрология. Стандартизация. Сертификация: учебник учебник для вузов / под ред. В.М. Мишин. ÿ М.: Юнити-Дана, 2012. ÿ 946 с.
4. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: учебник для вузов / Г.Д. Крылова. — М.: Юнити-Дана, 2012. — 671с.
5. Угольников, А. В. Метрология. Электрические измерения : практикум / А. В. Угольников. — Саратов : Ай Пи Ар Медиа, 2019. — 140 с. — ISBN 978-5-4497-0019-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/82232.html> (дата обращения: 25.06.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. — DOI: <https://doi.org/10.23682/82232>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень единиц физических величин и приставок

Таблица А.1 — Перечень единиц физических величин и приставок

Единицы физических величин			Приставки и множители			
Наименование	Обозначение		Приставка	Множитель	Обозначение приставки	
	международное	русское			международное	русское
Ампер	A	А	экса	10^{18}	E	Э
Децибел	dB	дБ	пета	10^{15}	P	П
Герц	Hz	Гц	тера	10^{12}	T	Т
Ом	Ω	Ом	гига	10^9	G	Г
Секунда	s	с	мега	10^6	M	М
Сименс	S	См	кило	10^3	k	к
Тесла	T	Тл	гекто*	10^2	h	г
Вольт	V	В	дека*	10	da	да
Вольт-ампер	V·A	В·А	деци*	10^{-1}	d	д
Реактивная			санτι*	10^{-2}	c	с
мощность	var	вар	милли	10^{-3}	m	м
Ватт	W	Вт	микро	10^{-6}	μ	мк
Коэффициент мощности	cos Φ или		нано	10^{-9}	n	н
	cos φ	cos φ	пико	10^{-12}	p	п
			фемто	10^{-15}	f	ф
Градус						
Цельсия	°C	°C	атто	10^{-18}	a	а
Примечание — Приставки, обозначенные знаком «*», — нерекомендуемые, их применения следует избегать. Обозначение приставки следует писать рядом с обозначением единицы без интервала. Если указано значение, то за ним следует интервал перед приставкой и обозначением единицы. Например: 23 °C.						

**Матвеев Юрий Валентинович
Цалоев Владимир Муратович**

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Методические указания
к практическим занятиям*

В двух частях

Часть 2

В авторской редакции

Изд. № 209/2025. Объем 2,75 п. л. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,695.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»