

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»

Факультет: электронно-информационных систем

Кафедра: физики

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий кафедрой  
Т.Л. Кушнер  
«10» 12 Т.Л. Кушнер 2024 г.

СОГЛАСОВАНО  
Декан факультета  
А.Н. Парфиевич  
«10» 12 А.Н. Парфиевич 2024 г.

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике

- 6-05-0713-02 Электронные системы и технологии  
6-05-0611-05 Компьютерная инженерия (профилизация - программируемые  
мобильные системы)  
6-05-0611-05 Компьютерная инженерия (профилизация - вычислительные  
машины, системы и сети)

Составитель: Маркевич Константин Михайлович - старший преподаватель  
кафедры физики БрГТУ

Рассмотрено и рекомендовано к государственной  
регистрации на заседании научно-методического совета БрГТУ  
"14" 12 2024г, протокол №. 2

Прямоугольник

рег. в УАЭК 201687-36

## ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ В КОМПЛЕКСЕ

Электронный учебно-методический комплекс содержит:

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....	4
1.1 КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ».....	4
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....	48
2.1 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ».....	48
2.2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ».....	76
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ .....	156
3.1 ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЗАЧЕТУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ» ....	156
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ .....	160
4.1 УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ».....	160

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Метрология стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» создан в соответствии с требованиями Постановления Министерства образования Республики Беларусь от 26 июля 2011 г. № 167 «Об утверждении положений об учебно-методических комплексах» по уровням основного образования и предназначен для студентов специальностей, которые связаны с радиоэлектроникой.

Содержание разделов ЭУМК соответствует образовательным стандартам, структуре и тематике учебной программы по дисциплине: «Метрология стандартизация и сертификация в радиоэлектронике».

Цели ЭУМК:

- повышение эффективности образовательного процесса;
- внедрение перспективных технологий хранения и передачи информации в электронном виде;
- обеспечение открытости и доступности образовательных ресурсов путем размещения ЭУМК в локальной сети университета.

Структура ЭУМК включает:

1. Теоретический раздел, состоящий из конспекта лекций по метрологии стандартизации и сертификации в радиоэлектронике по основным темам курса.
2. Практический раздел, в котором представлены материалы для практических и лабораторных занятий студентов.
3. Контроль компетенций, представлен вопросам для подготовки к зачету.
4. Вспомогательный раздел ЭУМК, представленный в виде учебной программы по учебной дисциплине «Метрология стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» и перечень изданий, рекомендуемых для изучения.

Рекомендации по организации работы с ЭУМК:

Необходим IBM PC–совместимый ПК стандартной конфигурации.

## **1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

### **1.1 КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ»**

Тема 1. Основы метрологии, общие сведения о метрологических измерениях, основные термины и определения .....	5
Тема 2. Погрешности: систематические и случайные, обработка результатов прямых и косвенных измерений .....	8
Тема 3. Электрорадиоизмерения, измерение токов, напряжений и мощности в радиоэлектронике .....	13
Тема 4. Осциллограф, осциллографические измерения напряжений и времени .....	16
Тема 5. Измерительные генераторы .....	25
Тема 6. Измерение цепей со средоточенными и распределенными параметрами .....	30
Тема 7. Автоматизация измерений .....	36
Тема 8. Стандартизация, нормирование и сертификация в сфере радиоэлектроники .....	41

## Тема 1. Основы метрологии, общие сведения о метрологических измерениях, основные термины и определения

*Роль измерений в науке, технике, жизнедеятельности человека. Значение дисциплины в подготовке инженеров. Основные понятия дисциплины: метрология, физические величины, единицы величин, измерение, средства измерений и их общая характеристика, погрешности измерений и средств измерений. Стандартное представление результатов измерений. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая служба. Эталоны. Поверочные схемы.*

### 1.1 Основы метрологии, общие сведения о метрологических измерениях

Различают метрологию теоретическую, прикладную и законодательную. Теоретическая метрология рассматривает общие теоретические проблемы измерений. Прикладная метрология занимается вопросами практического применения методов и средств измерений, законодательная – обеспечивает единообразие средств измерений и их единство.

Основная цель метрологии: разрабатывать методы измерения требуемой точности в науке и технике.

Рассмотрим некоторые свойства процесса измерения.

По способу получения измерений, они разделяются на *прямые* и *косвенные*. *Прямым измерением* называются такие, в котором значение измеряемой величины находится непосредственно по шкале прибора. В *косвенных измерениях* значение измеряемой величины определяется на основе, например, математической формулы, когда измеряются величины нескольких прямых измерений и далее они позволяют косвенно определить еще одну величину.

По характеру проведения измерений, они могут быть *абсолютными* и *относительными*. *Абсолютные измерения* определяют абсолютную измеряемую величину. *Относительные измерения* определяются как отношение абсолютного значения к истинному значению измеряемой величины.

В зависимости от характера поведения измеряемой величины, измерение может быть *статическим* или *динамическим*. *Статические измерения* это те, которые не меняются в процессе измерения; *динамические* – это те, которые изменяют свою величину в ходе измерений.

*Методы измерений*. Метод измерений будем рассматривать как комплексное использование принципов и средств измерений. Принципы измерения - это правила (положения, требования), которые следует выполнять при проведении измерений. Они могут быть общие (свойственные любым измерениям), и частные, характерные для некоторого класса (типа, вида) измеряемых величин.

Все многообразие методов электро-, радиоизмерений условно разделяется на два типа: *метод непосредственной оценки* и *метод сравнения*. В первом - измеряемую величину определяют по отсчетному устройству измерительного

прибора. Например, измерение тока, стрелочным прибором. Этот метод называют еще методом прямого преобразования. Во втором методе измеряемую величину сравнивают с величиной, значение которой известно (эталоном). Например, измерение сопротивлений, индуктивностей или емкостей. Последний, метод сравнения, в электро-, радиоизмерениях реализуется в виде нулевого метода, дифференциального, замещения и совпадений.

Основные правила (принципы) измерений:

- кроме измеренного значения физической величины следует указывать и величину возможной ошибки (погрешность);
- всякое измерение должно проверяться многократно.

Количественно ошибки можно характеризовать заданием некоторого верхнего предела их модуля (2):

$$\Delta x \geq | \delta x | \quad (2)$$

Однако на практике определить значение  $\Delta x$  как надежный предел невозможно, поэтому величину  $\Delta x$  задают так, чтобы она выполнялась с некоторой вероятностью  $P$ . В наших лабораториях эта вероятность принята на уровне 95%.

Таким образом, задача всякого измерения состоит в том, чтобы:

- найти наиболее вероятное значение измеряемой величины;
- оценить погрешность;
- указать надежность результата.

В соответствии с постановкой задачи измерения результат записывают вместе с погрешностью и вероятностью (3):

$$x = x_{изм} \pm \Delta x; P \quad (3)$$

Последнюю запись следует понимать как неравенство (4):

$$x_{изм} - \Delta x \leq x_{ист} \leq x_{изм} + \Delta x, P \quad (4)$$

Интервал значений величины  $x_{ист}$ , заданной соотношением (3) называется доверительным интервалом, а вероятность  $P$  – доверительной вероятностью или надежностью. Величина погрешности  $\Delta x$  равна полуширине доверительного интервала. Таким образом,  $\Delta x$  как результат измерений является возможной ошибкой или погрешностью измерения. Это есть стандартное представление результатов измерений.

Итак, *погрешность измерений – возможная ошибка измерений, определенная теоретическим путем на основе экспериментальных данных*. Поскольку, измерение какой то величины предполагает многократное проведение самого измерения и получение массива значений, то его обработка предполагает использование математической статистики и теории вероятностей.

Существует государственная система обеспечения единства измерений, которая имеет иерархическую структуру. Имеются метрологические службы республиканского и областного значения. У них находятся эталонные меры физических величин высокой точности, поверочные схемы, квалифицированный персонал, который осуществляет контроль в сфере измерений.

## 1.2 Основные термины и определения дисциплины

*Основные понятия дисциплины:* физическая величина, единицы величин, измерение, средство измерения, погрешности и ошибки измерений и средств измерений.

*Физическая величина* – общее свойство многих физических объектов в качественном отношении, но индивидуальное для каждого из них в количественном.

*Единица физической величины* – физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное 1.

*Измерение* – процесс определения физической величины с помощью специальных технических средств на основе сопоставления измеряемой величины с ее эталоном.

*Средство измерения* – техническое устройство, позволяющее осуществить процесс измерения, имеющее в своей структуре эталон измеряемой величины.

*Ошибка измерения* – отклонение результата измерения от его истинного значения (1). В дальнейшем ошибку измерения будем обозначать через  $\delta x$ .

$$\delta x = x_{изм} - x_{ист} \quad (1)$$

*Погрешность измерения* – возможное отклонение результата измерения от его истинного значения. Эту величину будем обозначать через  $\Delta x$ . Разница между последними величинами в том, что погрешность имеет теоретический характер, а ошибка – практический. На основе ошибок измерения определяется его погрешность. Как это делается на практике, рассмотрим позже. Источников ошибок много, они появляются из-за несовершенства измерительных приборов, органов чувств, изменения условий опыта, методики измерения, округления при вычислении и др. причин. Для каждого типа ошибки может определяться соответствующая погрешность: средств измерений, методики измерений, округления при вычислении и т. д.

*Эталон единицы физической величины* – средство измерений (и комплекс средств измерений) обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке.

*Образцовое средство измерений* – мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, служащий для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых.

*Рабочее средство измерений* – средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

*Поверочная схема* – утвержденный в установленном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единиц от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений.

## **Тема 2. Погрешности: систематические и случайные, обработка результатов прямых и косвенных измерений**

*Основы теории погрешностей. Оценка погрешностей. Систематические и случайные погрешности. Оценка случайных погрешностей прямых равно- точных измерений. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений. Критерий грубых погрешностей. Приборные погрешности, погрешности округления. Классы точности приборов. Результирующая погрешность измерения.*

### 2.1 Погрешности: систематические и случайные

В зависимости от характера изменения погрешностей, они разделяются на *систематические* и *случайные*. При этом, результат погрешности измерения  $\Delta x$  определяется как сумма систематической  $\Delta x_{\text{сист}}$  и случайной  $\Delta x_{\text{сл}}$  погрешностей (5):

$$\Delta x = \Delta x_{\text{сист}} + \Delta x_{\text{сл}} \quad (5)$$

*Систематические погрешности* – это погрешности, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при повторных измерениях одной и той же величины при одних и тех же условиях. *Случайные погрешности* – изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины при одних и тех же условиях. В практике измерений погрешности обоих типов присутствуют одновременно и их трудно разграничить. *Систематические погрешности* могут быть *методическими, приборными (аппаратными) и субъективными*.

*Методические погрешности* обусловлены несовершенством метода измерения; неточностью формул, выведенных с некоторыми допущениями, влиянием прибора на объект измерения и пр.

*Приборные погрешности* обусловлены несовершенством средств измерений: влиянием на работу прибора температуры окружающей среды, неточностью градуировки шкалы, наличием внешних электромагнитных полей и др.



*Субъективные погрешности* связаны с несовершенством органов чувств оператора, его особенностями, квалификацией измерителя.

Систематическая погрешность может быть постоянной и переменной. *Постоянная погрешность* остается постоянной в интервале времени измерений и ее сравнительно легко обнаружить и исключить. Методы исключения постоянной систематической погрешности: *поверки, калибровки, замещения, компенсации*. Переменные систематические погрешности разделяются на прогрессирующие (непрерывно уменьшающиеся или увеличивающиеся) и периодические. Погрешности обоих типов стараются описать математически в виде графиков или таблиц. Для этого проводят эксперименты. Если удастся получить эти графики и (или) таблицы, то это позволяет исключить систематическую погрешность. В случаях, когда невозможно выявить систематичность погрешности, ее относят к случайной погрешности и называют не исключенной.

*Случайные погрешности* учитывают те случайные ошибки, которые приводят к разбросу результатов около некоторого среднего значения.

В выражении (6) не учитывают грубые ошибки измерения - промахами. Их исключают как неадекватный результат. Рассмотрим подробнее случайные погрешности. Если измерение проводить многократно при одних и тех же условиях, они изменяются случайным образом, и их предсказать невозможно, как это имеет место для систематической погрешности  $\Delta x_{\text{сист}}$ .

## 2.2 Оценка случайных погрешностей прямых равноточных измерений

Приемы оценки случайных погрешностей регламентируются ГОСТ 8.207-76. Рассмотрим, как и при каких условиях определяется величина случайной погрешности измерения  $\Delta x$ . Считаем, что измерения равноточные.

Для их надежной оценки проведем  $n$ -измерений (наблюдений):  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . В теории вероятностей наиболее вероятное значение измеряемой величины определяется на основе ее среднеарифметического (6):

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

Разность:  $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$  называется случайным отклонением результата  $i$ -го наблюдения от среднего значения. Отклонения  $\Delta x_i$  могут быть положительными и отрицательными, большими и малыми. При достаточно большом числе наблюдений положительные и отрицательные значения одинаковой величины появляются одинаково часто, большие отклонения встречаются реже, чем малые, распределение отклонений  $\Delta x_i$  около нулевого значения будет симметричным. При этом оказывается, что приблизительно в 68% случаев отклонения  $\Delta x_i$  по модулю не превышают некоторую величину  $\sigma$  – стандартное отклонение, а в 32% превышает ее. Иными словами, с вероятностью 68% отклонение  $\Delta x_i$  лежит

в интервале  $[-\sigma; +\sigma]$ . Для интервала  $[-2\sigma; +2\sigma]$  эта вероятность равна 95%, а для  $[-3\sigma; +3\sigma]$  – 99,7%. Для любого значения вероятности  $P$  доверительный интервал  $[-\lambda_P \sigma; +\lambda_P \sigma]$  определяется числовым множителем  $\lambda_P$ , зависящем от  $P$ . Стьюдент разработал коэффициенты для различного количества измерений и составил таблицу, связывающую  $\lambda_P$ ,  $P$  и число проведенных измерений  $n$ . Знание величины  $\lambda_P$  и  $\sigma$  позволяет определять полуширину доверительного интервала. Поскольку величина  $\sigma$  должна определять значение  $n$  измерений, то обозначим ее как  $\sigma_n$ , и тогда (7):

$$\Delta x = \lambda_P \sigma_n \quad (7)$$

Приведенная терминология свойственна метрологии и теории измерения. В теории вероятностей эти величины также используются, имеют сходное содержание, но другие обозначения. Например, коэффициенты Стьюдента в теории вероятностей и математической статистике имеют обозначение  $t_{n,p}$ . В пределе, при  $n \rightarrow \infty$  коэффициент  $t_{n,p}$  переходит в  $\lambda_P$ :  $t_{n,p} = t_{\infty,p} = \lambda_P$ .

Величина стандартного отклонения  $\sigma$  единичного отдельного измерения в теории вероятностей и математической статистике оценивается на основе частных отклонений  $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$ . Для единичного отдельного измерения (8):

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (8)$$

Средняя квадратичная погрешность  $n$  измерений (9):

$$\frac{\sigma}{n} = \sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (9)$$

Критерий грубых погрешностей. Оказывается, что при  $n \geq 30$  и  $P = 0,9973$  из таблицы для коэффициентов Стьюдента  $t_{n,p} = 3$ . Это значение  $t_{n,p}$  можно считать предельно возможным при определении случайных погрешностей, так как вероятность появления большего значения составляет лишь 0,0027. Поэтому в метрологической практике принят критерий «трех сигм», критерий определения грубых погрешностей (11). Если

$$|x_i - \langle x \rangle| > 3 \sigma_n, \quad (11)$$

то такое наблюдение содержит грубую погрешность и должно быть исключено при обработке результатов наблюдений. Такое наблюдение называют еще про-

махом. Последовательность операций при обработке результатов прямых измерений:

С учетом коэффициента Стьюдента, случайная погрешность результата, определяющая полуширину доверительного интервала около среднего значения измеряемой величины, определяется так (10):

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{n,P} * \sigma_n = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (10)$$

Коэффициенты  $t_{n,P}$  Стьюдента

Таблица 1

n / P	0,5	0,9	0,95	0,99
2	1,60	6,31	12,7	63,7
3	0,82	2,92	4,30	9,92
4	0,77	2,35	3,18	5,94
5	0,74	2,13	2,78	4,60
6	0,73	2,02	2,57	4,03
7	0,72	1,94	2,45	3,71
8	0,71	1,89	2,36	3,50
9	0,71	1,86	2,31	3,36
10	0,70	1,83	2,26	3,25
15	0,69	1,76	2,14	2,98
20	0,69	1,73	2,09	2,86
$\infty$	0,68	1,65	1,96	2,59

### 2.3 Оценка случайных погрешностей косвенных измерений

При косвенных измерениях интересующая нас величина задается как функция других величин. Считаем, что значения измерений  $x_1, x_2 \dots x_m$  распределены по нормальному закону, независимы друг от друга (не коррелированы); выполнены одним и тем же оператором, одним и тем же прибором в одних и тех же условиях (равноточные измерения) (12):

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_m) \quad (12)$$

Наиболее вероятное значение измерения  $y$  определяется как результат косвенного измерения при средних значениях аргументов (13):

$$y = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle \dots \langle x_m \rangle) \quad (13)$$

Очевидно, что абсолютная погрешность измеряемой величины  $\Delta y$  являются функцией погрешности прямых измерений (14):

$$\Delta y = F(\Delta x_1, \Delta x_2 \dots \Delta x_m) \quad (14)$$

Практическое определение абсолютной погрешности для косвенных, равнозначных, некоррелированных измерений осуществляется выражением (15):

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} * \Delta x_k \right)^2} \quad (15)$$

где,  $\Delta x_k$  - абсолютные погрешности величин  $x_k$ , определенные по ранее рассмотренным правилам для прямых измерений;

$\partial f / \partial t$  – частные производные функции (12) по аргументам  $x_k$ , вычисленные при средних значениях  $\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle \dots \langle x_m \rangle$ . Доверительная вероятность  $P$  для всех погрешностей задается одинаковой (например,  $P=0,95$ ). Такой же она будет и для  $\Delta y$ .

Относительная погрешность измерения (16):

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} * \frac{\Delta x_k}{y} \right)^2} \quad (16)$$

Так, как  $\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \ln y}{\partial x}$ , то последнее выражение можно представить в виде (17):

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial \ln y}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} \quad (17)$$

Критерий ничтожных погрешностей. Не все частные погрешности косвенного измерения играют одинаковую роль в формировании итоговой погрешности. Отдельные составляющие могут не оказывать существенного влияния на итоговый результат. Если  $k$ -я частная погрешность удовлетворяет условию (18), то ее можно пренебречь. А сами погрешности, отвечающие этому условию, называются ничтожными:

$$\frac{\partial f}{\partial x_k} * \Delta x_k < \frac{\Delta y}{3} \quad (18)$$

Для практической оценки погрешности измерений  $\Delta x$  используют выражение (19), учитывающее многообразие компонент, и которое реально оценить на практике.

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{погр}}^2 + \Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2 + \Delta x_{\text{окр}}^2} \quad (19)$$

*Погрешность поправки.* Вводится тогда, когда найдена величина систематической ошибки. В приложении к прибору она может быть представлена таблицей, поправочным графиком, коэффициентом и пр.

*Погрешности приборные.* Учитывают систематические ошибки прибора, связанные с его конструктивными особенностями. Определяются на основе класса точности прибора  $k$  или предельной его погрешности  $\delta$ , которая может указываться в паспорте прибора. Класс точности прибора – обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами возможной его погрешности. Для произвольной надежности  $P$  абсолютная погрешность прибора (20):

$$\Delta_{пр} = \delta \frac{t_{нр}}{3,0} = x_{max} \frac{t_{нр}}{3,0} * \frac{k}{100\%} \quad (20)$$

$x_{max}$  – максимальное значение физической величины на измеряемой шкале. 3,0 – предполагает, что измеряемая величина заключена в ширине доверительного интервала  $3\sigma$ , что соответствует вероятности 0,997.

*Погрешности округления.* Учитывают те случайные ошибки, которые вызваны несовершенством органов чувств экспериментатора и округлением результатов (21).

$$\Delta_{окр} = P * \frac{h}{2} \quad (21)$$

$h$  – величина минимального значения одного деления на измерительной шкале или последнего разряда, если прибор цифровой.

### **Тема 3. Электрорадиоизмерения, измерение токов, напряжений и мощности в радиоэлектронике**

*Измерение напряжений (токов) разных величин и разных частот. Электрические параметры токов и напряжений. Классы точности амперметров и вольтметров. Сведения о цифровых измерительных приборах, реализующих аналогово-цифровое преобразование.*

*Понятия мгновенной, средней, импульсной, полной, активной и реактивной мощности. Измерение мощности на ВЧ и СВЧ диапазонах.*

*Осциллограф. Физическая модель осциллографа. Стандартные способы представления знаний о работе сложных электронных систем. Блок-схема аналогового осциллографа.*

#### **3.1 Измерение токов и напряжений**

По степени сложности измерения напряжений и токов, условно разделим на 3 класса: а) напряжения малых величин (mV и меньше); б) напряжения средних величин (десятки и сотни mV – 1000 В); в) напряжения больших величин (более 1000 В). Затруднительны измерения малых и больших напряжений. Для малых напряжений это связано с тем, что их величины соизмеримы с уровнями шумовых напряжений и напряжений, которые называют «наводка-

ми». Трудность измерения больших напряжений обусловлена, в первую очередь, вопросами техники безопасности.

Сложность измерения напряжений определяется так же его частотой. Более разработана техника измерений напряжений постоянного тока, а также низко частотных (НЧ) и среднечастотных (СЧ) диапазонов. Затруднительными являются измерения параметров высокой частоты (ВЧ) и сверхвысокой частоты (СВЧ), что обусловлено дороговизной измерительной техники для этих диапазонов частот. Современные средства радиоэлектроники как раз работают в этих диапазонах частот. Некоторые аспекты работы средств измерений в СВЧ диапазоне будем рассматривать при рассмотрении цепей с распределенными элементами. Сейчас рассмотрим некоторые параметры переменных напряжений (сигналов), которые могут измеряться во всевозможных исследованиях радиоэлектроники.

*Мгновенные значения напряжения (тока)* – напряжение (ток) в заданный момент времени. Могут измеряться посредством осциллографа. Обычно обозначаются маленькими латинскими буквами: для напряжения  $u$ , для тока –  $i$ .

*Максимальные и минимальные значения напряжения и тока* на определенном интервале времени, в частности, на периоде времени сигнала  $T$ :  $U_{max}$ ,  $U_{min}$ ,  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ . Они же являются амплитудными значениями переменного сигнала и обозначаются большими латинскими буквами:  $U_m$ ,  $I_m$ .

*Постоянная составляющая переменного сигнала.* Если сигнал содержит постоянную составляющую, она называется средним значением сигнала и определяется как правило за период (интервал усреднения)  $T$  (22):

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (22)$$

Важными параметрами являются наибольшее и наименьшее значение переменной составляющей сигнала, называемое соответственно *пиковым отклонением «вверх»* ( $U_0$ ) и *пиковым отклонением «вниз»*  $U_n$ .

*Средневыпрямленное значение напряжения*  $U_{св}$ . Если сигнал не содержит постоянной составляющей (например, гармонический сигнал или меандр), он будет характеризоваться средневыпрямленным значением (23):

$$U_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt \quad (23)$$

и амплитудой  $U_m$ . Величина  $A$  называется размахом сигнала (24):

$$A = U_{max} - U_{min} = 2U_m \quad (24)$$

*Действующее (эффективное, среднеквадратическое) напряжение переменного тока* (25):

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (25)$$

Напомним, что амплитудное и действующее напряжения гармонического тока связаны соотношением:  $U_m = 1,41 U_{\text{ск}}$ .

*Вольтметры – приборы, измеряющие напряжения*, могут быть разного класса точности (0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0; 10; 15; 25), разной функциональности (В2 – вольтметры постоянного тока, В3 – переменного тока, В4 – импульсного тока, В5 – фазочувствительные, В6 – селективные, В7 – универсальные и др.), могут различаться по измеряемому параметру (амплитудные, среднеквадратичные, средневыпрямленного напряжения и др.).

*Амперметры – приборы, измеряющие ток*, так же могут быть разного класса точности (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 и 5,0), разной функциональности (А2 – постоянного тока, А3 – переменного тока, А7 – универсальные, А9 – преобразователи тока). На вольтметры и амперметры распространяются требования ГОСТ 8711-78. Эти приборы характеризуются внутренним сопротивлением и допустимым током (напряжением).

В последние десятилетия на смену электромеханическим приборам (магнитоэлектрическим, электродинамическим, электромагнитным, электростатическим) пришли цифровые измерители, имеющие большую точность, функциональность, универсальность, дешевизну и пр. Это микропроцессорные системы, имеющие малые массогабаритные размеры, но превосходящие по электрическим параметрам измерители предыдущего поколения.

### 3.2 Измерение мощности

Предполагает одновременное измерение тока или напряжения, а если это цепь переменного тока, то еще и сдвиг фаз между этими величинами. Особо измеряется мощность в СВЧ диапазоне. Измерение мощности регламентируется ГОСТ 8476-78. В радиоэлектронике различают разные мощности.

*Мощность постоянного тока на нагрузке сопротивлением R (26):*

$$P = U_R * I_R = I_R^2 * R = \frac{U_R^2}{R} \quad (26)$$

Мощности в линейных цепях переменного тока.

*Мгновенная мощность – результат произведения мгновенных напряжения и тока на нагрузке (27):*

$$P = u(t) * i(t) \quad (27)$$

*Активная мощность – среднее за период значение  $P(t)$ , определяется аналогично выражению (22), равна сумме мощностей постоянной составляющей и всех гармоник. Активная мощность гармонического сигнала (28):*

$$P = I_{\text{СК}} U_{\text{СК}} \cos \varphi \quad (28)$$

$I_{\text{СК}}$ ,  $U_{\text{СК}}$  – соответственно, действующие значения тока и напряжения на нагрузке,  $\varphi$  – сдвиг фазы между этими величинами. Измеряется в ваттах (Вт) приборами ваттметрами.

*Реактивная мощность гармонического сигнала (29):*

$$Q = I_{\text{СК}} U_{\text{СК}} \sin \varphi \quad (29)$$

Измеряется в варах (вар) приборами варметрами.

*Полная мощность  $S$  сигналов переменного тока (30):*

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (30)$$

Ваттметры (обозначаются буквой – М) характеризуются допустимыми токами, напряжениями и коэффициентом мощности, а также классом точности прибора (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 и 5,0).

*Импульсное значение мощности (31) прямоугольного импульса:*

$$P_{\text{и}} = P \frac{T}{\tau_{\text{и}}} \quad (31)$$

Под  $\tau_{\text{и}}$  понимается длительность практически прямоугольного импульса, следующего с периодичностью  $T$ .

*Мощность искажения* – энергетическая величина, характеризующая нелинейные цепи, где имеет место различие графиков токов и напряжений.

Измерение мощности в ВЧ и СВЧ диапазоне связано с такими понятиями как *проходящая мощность*, *поглощаемая мощность*; требует дорогого оборудования и квалифицированного персонала.

Приборы для измерения: силы тока - А; напряжения - В; мощности - М; элементов R, L, C - Е; частоты и времени - Ч; сдвига фазы – Ф; импульсных параметров – И; напряженности поля – П; ослаблений сигнала – Д;

Приборы для измерения и исследования: формы и спектра сигнала – С; характеристики радиоустройств – Х; измерительные генераторы – Г; параметров полупроводниковых изделий – Л; усилители измерительные – У; электрических и магнитных свойств материалов – Ш.

В радиоэлектронике для измерения напряжений, наблюдения графиков переменных токов, широко используется осциллограф. Это один из основных измерительных приборов в этой сфере.

#### **Тема 4. Осциллограф, осциллографические измерения напряжений и времени**



*Одноканальный аналоговый осциллограф. Системы каналов Y и X. Синхронизация и калибровка осциллографа. Блок-схема одноканального аналогового осциллографа.*

*Автоматизированный контрольно-измерительный прибор АКИП 4115/1А. Индикация цифрового осциллографа. Управление индикацией прибора. Органы управления измерениями по каналам Y и X. Система курсоров. Внешняя синхронизация измерений. Калибровка каналов Y и X.*

*Блок-схема цифрового осциллографа. Минимальный комплект электронных систем цифрового осциллографа. Основные метрологические параметры аналоговых и цифровых осциллографических систем.*

#### 4.1 Физическая модель осциллографа

*Осциллограф* – прибор, позволяющий измерять *напряжение* и *время*. Косвенно осциллографические измерения позволяют определять: ток, частоту, период, сдвиг фаз и т. д.

Приборы предыдущего поколения создавались на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Современные осциллографы это мини ЭВМ, в которой запрограммирована физическая модель осциллографа предыдущего поколения. Рассмотрим физическую модель электронно-лучевого одноканального осциллографа. Основным элементом такого осциллографа – ЭЛТ. Электрическая схема одноканальной ЭЛТ приведена на рисунке 1.

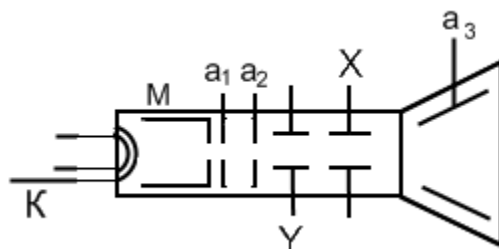


Рисунок 1. Одноканальная электронно-лучевая трубка. К – подогреваемый катод;  $a_1$ ,  $a_2$  – управляющие аноды; X, Y – пластины ЭЛТ;  $a_3$  – аквадаг

Электрическая схема ЭЛТ определяет минимальный комплект прибора, минимально необходимые электронные подсистемы (узлы). В состав любого осциллографа входят: ЭЛТ, каналы X, Y, калибратор К и блок питания.

*Канал Y*, организует работу прибора по оси Y (величине напряжения). Пластины Y любой ЭЛТ имеют предельное допустимое значение напряжения  $U_Y$ . Измеряемое напряжение  $U$  может быть как выше, так и ниже этого значения  $U_Y$ . Появляется необходимость приведения в соответствие измеряемого напряжения с величиной допустимого для пластин Y. Канал Y осциллографа обеспечивает решение этой задачи посредством барабанного переключателя V/см. Когда им выбираем предел измерений напряжения прибора, мы, либо усиливаем очень малое измеряемое напряжение до значений приемлемых для ЭЛТ, либо наоборот, большие измеряемые напряжения уменьшаем. Это зна-

чит, что в систему канала  $Y$  входят электронные усилители напряжения, резистивные делители (аттенюаторы), коммутационные средства. Для каждого состояния барабанного переключателя предусмотрена плавная регулировка напряжения по оси  $Y$ .

Канал  $X$ , организует работу осциллографа по оси  $X$  (времени). Чтобы измеряемый сигнал видеть на экране, его следует разворачивать вдоль оси  $X$ , причем время прохождения луча должно быть равным, либо близко кратным ко времени периода измеряемого сигнала. Рассогласования частоты измеряемого сигнала  $f_{и}$  с частотой развертки канала  $X$   $f_x$  приведены на рисунке 2.

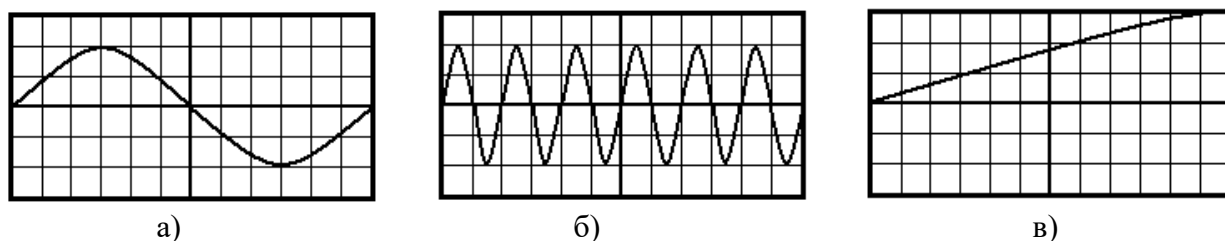


Рисунок 2. а) - совпадение частоты измеряемого сигнала с частотой развертки осциллографа ( $f_{и} = f_x$ ); б) - частота развертки осциллографа меньше частоты исследуемого сигнала ( $f_x < f_{и}$ ); в) - частота развертки осциллографа превышает частоту исследуемого сигнала ( $f_x > f_{и}$ )

Управление каналом  $X$  осциллографа осуществляется барабанным переключателем  $s/cm$ , который осуществляет коммутацию пластин  $X$  ЭЛТ с выходом генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), имеющим выходной сигнал в виде пилообразного напряжения (рисунок 3).

Переключателем  $s/cm$ , осуществляем грубую подстройку частоты ГЛИН к частоте измеряемого сигнала. Точная подстройка частоты ГЛИН осуществляется системой синхронизации. *Синхронизация* – процесс подстройки частоты развертки осциллографа к частоте исследуемого сигнала. Результат синхронизации - установившаяся осциллограмма.

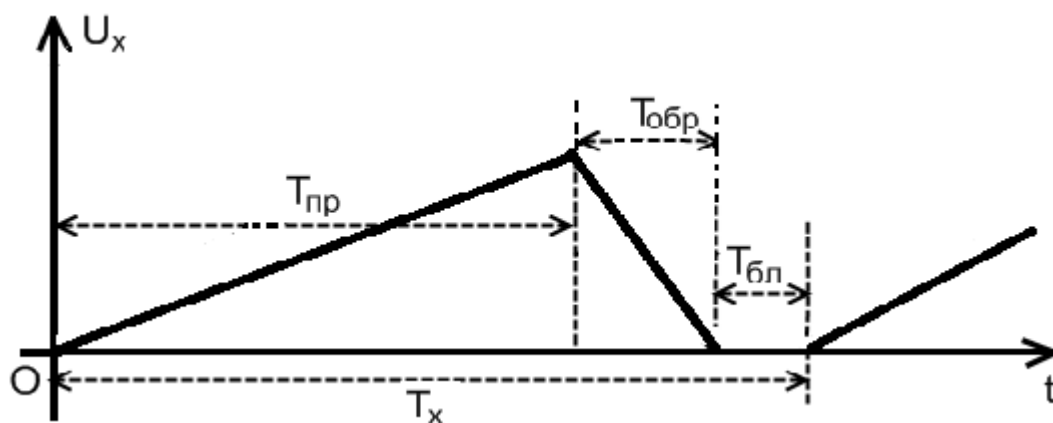


Рисунок 3. Сигнал генератора развертки осциллографа

Система калибровки осциллографа позволяет контролировать и корректировать точность измерений каналов X и Y. Для этого обычно используются сигналы частотой 1 кГц и напряжением единицы (десятые) В.

Способы представления знаний о сложных электронных системах: блок-схема, функциональная схема, принципиальная электрическая схема.

### БЛОК-СХЕМА ОДНОКАНАЛЬНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

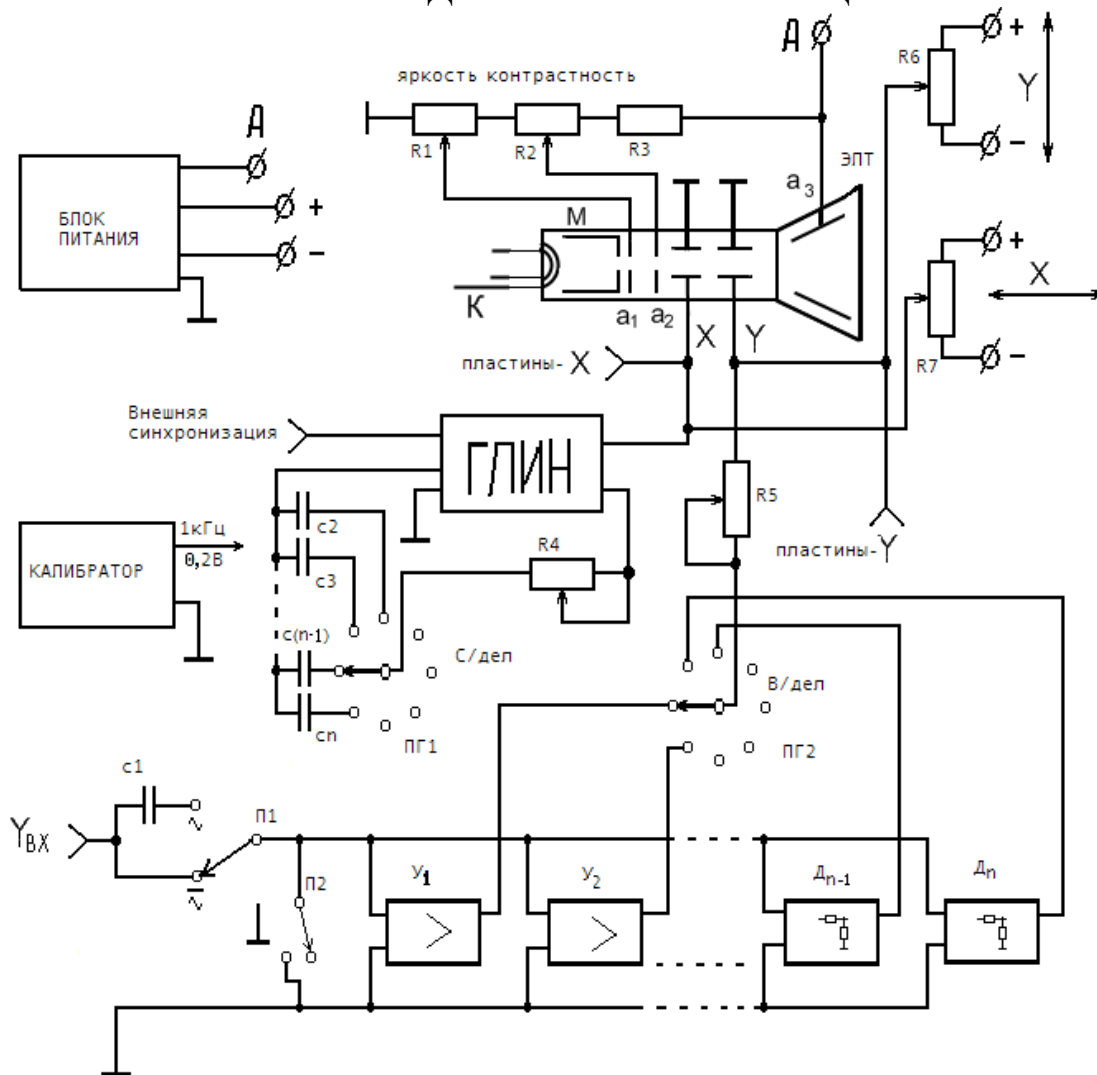


Рисунок 4. Представление знаний об осциллографе в виде блок-схемы

Блок питания осциллографа обеспечивает все узлы прибора необходимыми напряжениями.

Описание блок-схемы осциллографа (рисунок 4):

- R1 - регулятор яркости луча; R2 - регулятор контрастности луча;
- R3 – делитель напряжения для системы управления лучом ЭЛТ;
- R4 – плавная подстройка частоты ГЛИН;

- R5 – плавная подстройка масштаба напряжения канала Y.
- R6 – перемещение луча по вертикали; R7 – по горизонтали.
- C1 – разделительная емкость «закрытого» входа канала Y.
- C2 – Cn – конденсаторы для организации диапазонов ГЛИН;
- У<sub>1</sub>, У<sub>2</sub> – усилители малых напряжений канала Y;
- D<sub>n</sub>, D<sub>n-1</sub> – делители напряжений канала Y.
- ПГ1 – галетный переключатель диапазонов ГЛИН канала X;
- ПГ2 – галетный переключатель для согласования напряжения Y-пластин ЭЛТ с величинами измеряемых напряжений;
- П1 - переключатель режимов открытый/закрытый вход осциллографа;
- П2 – переключатель для определения нулевого уровня напряжения шкалы ЭЛТ.

Приведенная блок-схема в сфере физики, радиотехники или электроники является физической моделью одноканального осциллографа.

## 4.2 Цифровой осциллограф

Осциллограф – электронный прибор, позволяющий наблюдать изменение напряжения с течением времени, т.е график  $U=f(t)$ . Если осциллограф двухканальный, то можно одновременно наблюдать два электрических процесса. Например, когда объектом исследования является электрическая цепь, где имеется вход и выход, то двухканальный прибор позволяет одновременно исследовать как входной, так и выходной сигналы, производить их измерение. Как и в аналоговом осциллографе по оси Y осуществляется измерение напряжения, по оси X - времени. Рассмотрим на примере автоматизированного контрольно-измерительного прибора АК ИП 4115/1А как это осуществлять. В цифровом осциллографе большинство измерительных операций осуществляется в автоматизированном режиме. У него гораздо большие метрологические возможности сравнительно с его аналоговым прототипом.

Справа передней панели прибора (рисунок 6) органы управления, слева – экран. На экране графики двух сигналов (каналов) с отображением основных величин этих графиков. Смысл некоторых обозначений экрана (рисунок 5):

- CH1 = 2,00 V – В/дел по оси Y для канала 1;
- CH2 = 2,00 V – В/дел по оси Y для канала 2;
- M 2,5 μs - время/дел по оси X для обоих каналов;
- f = 50,0773 KHz - частота исследуемого сигнала.

Масштаб осей X и Y позволяет определять ряд параметров графиков обоих каналов. Некоторые параметры графиков указываются в правой части экрана, после нажатия кнопки «ИЗМЕР»(синяя зона экрана). Эти данные, полученные автоматически, согласуются с измерениями по клеткам.

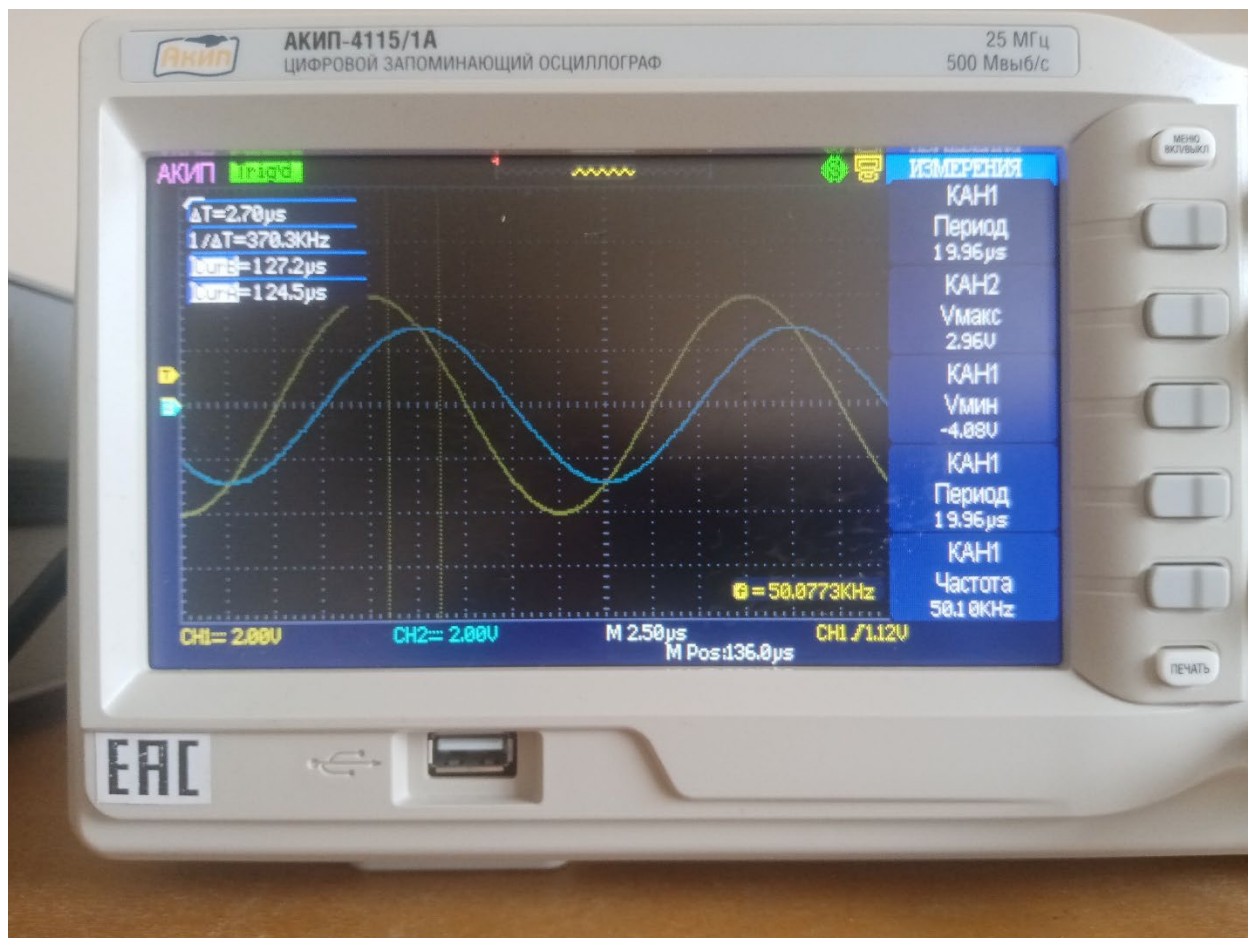


Рисунок 5. Экран осциллографа АКИП 4115/1А.

В верхней левой части экрана приведены результаты сдвига фаз между сигналами каналов 1 и 2 по времени, которые также легко проверяются данными масштаба оси X. Рассмотрим некоторые органы управления прибора.

#### *Вывод информации на экран осциллографа.*

Между кнопками «МЕНЮ» и «ПЕЧАТЬ» находятся 5 кнопок; позволяющих вывести на экран некоторые параметры графиков. Нажатие такой кнопки высвечивает подменю для каждого канала по тем физическим размерностям, которые на экране против кнопки. Оператор выбирает интересующий параметр, нажимает кнопку и получает на экране численное его значение.

Внешние подключения и сигнал калибровки (в правой нижней части передней панели управления, рисунок 6).

*Разъемы КН1 и КН2* – входы осциллографа каналов 1 и 2.

*Разъем «ВНЕШ СИНХР»* – ввод сигнала внешней синхронизации.

*Выход сигнала калибратора* (прямоугольные импульсы частотой 1 кГц) – выдает эталонный сигнал для оценки качества измерений по осям X и Y.



Рисунок 6. Органы управления осциллографом.

Для измерений надо получить осциллограмму, позволяющую снимать данные наибольшей точности, что достигается кнопками и регуляторами, расположенными справа от экрана. Эта зона управления условно разделяется на подзоны, которые в дальнейшем будем называть зонами.

Зона «ВЕРТИК» - подключение исследуемых сигналов к двухканальной измерительной системе осциллографа и, управление измеряемыми сигналами по оси  $Y$ , с целью приведение их к виду, удобному для измерений.

«КН1» - кнопка/индикатор подключения канала 1, «КН2» – канала 2; позволяют активизировать измерения по каналу 1 либо 2, либо по обоим каналам одновременно (Рисунок 6).

«Смещение» в зоне «ВЕРТИК» - кнопка/регулятор для каждого канала. Вращение регулятора производит смещение осциллограммы по вертикальной оси  $Y$ . Нажатие на регулятор – установка смещения в нулевое значение.

«В – мВ» регулятор/кнопка, осуществляет настройку осциллограммы по оси  $Y$  таким образом, чтобы на экране прибора видеть размах измеряемого сигнала (разницу между  $U_{\text{макс}}$  и  $U_{\text{мин}}$ ). Вращением регулятора устанавливаем коэффициент отклонения для измеряемого напряжения по оси  $Y$  в режиме

«грубо». Нажатие на регулятор переводит измерение в режим «плавно». Результаты измерений в режимах «грубо»/«плавно» отображаются в экранном меню. Для возврата в режим измерения «грубо» еще раз нажимаем регулятор.

«МАТЕМ» - кнопка/индикатор вкл/выкл меню, позволяющего совершать математические операции над графиками обоих каналов.

«ОПОРН» - кнопка/индикатор вкл/выкл меню записанных опорных осциллограмм. Опорные осциллограммы – это записанные в памяти прибора, которые могут быть использованы в исследованиях.

Зона «ГОРИЗОНТ» - содержит органы управления для измеряемых сигналов по оси X.

«Смещение» в зоне «ГОРИЗОНТ» - кнопка/регулятор для смещения осциллограммы по оси X и для установления ее в нулевое положение нажимаем регулятора.

«с – нс» регулятор/кнопка, которой устанавливаем на экране число периодов измеряемого сигнала, что реализуется установлением времени развертки по оси X. Вращение регулятора изменяет значение коэффициента развертки. Нажатия (может быть 3) на регулятор переводят измерения в режим «растяжки» осциллограммы, с указанием диапазона растяжки. 3-е нажатие - возврат в исходное состояние осциллограммы.

«Гориз. меню» кнопка/индикатор вкл/выкл горизонтального меню для управления растяжкой изображения осциллограммы.

Зона «СИНХР» - органы управления синхронизации (совпадения частоты измеряемого сигнала с частотой развертки экрана по оси X).

«Уровень» регулятор/кнопка; при вращении производит изменение уровня запуска синхронизации по параметру напряжения. Нажатие регулятора производит установку уровня синхронизации равным 0 мВ.

«Меню синхр.» - индикатор/кнопка. При нажатии кнопки появляется меню для возможных методов синхронизации осциллографа.

«Уст. на 50%» - индикатор/кнопка. При нажатии синхронизация устанавливается по уровню 50% от амплитуды исследуемого сигнала.

«Форс» - кнопка, нажатие которой приводит к сбросу результатов измерений, усреднений и пр. и перезапуску сбора информации.

Зона «МЕНЮ» и «УСТАНОВКА» (верхняя часть измерительной панели прибора).

«Измерение» - индикатор/кнопка вкл/выкл «Меню измерений». «Меню: вкл/выкл» - включает/выключает отображение меню на экране. На рисунке 5 (режим вкл) -это зона синего цвета, где отражены некоторые величины осциллограмм обоих каналов. Ранее указанные 5 параметров. Против каждого параметра – кнопка; ее активация выводит на экран «всплывающее меню» (подменю), из которого выбираем последовательным нажатием этой же кнопки нужную нам процедуру измерений. Альтернативный выбор этой процедуры возможен регулятором «Установка».

«Установка» - многофункциональный регулятор/кнопка; в отсутствии всплывающего меню этот регулятор осуществляет регулировку яркости линий развертки экрана. При наличии всплывающего меню этим регулятором выбираем интересующее нас и, *срочно*,\_ нажимаем кнопку «Установка»; ибо через 5-10 сек после выбора параметра осциллограф сам осуществляет *автовывбор*.

«Курсоры» - кнопка-индикатор, вкл/выкл меню управления курсорами. Их два А и В, расстояние между ними по оси Y – вольты (мВ); по оси X – секунды (мс, мкс, нс). При активации этой кнопки в меню предлагается измерение напряжения или времени. Выбираем ту величину, которую собрались мерять. Далее, передвигаем с помощью регулятора «Установка» курсоры А и В в те точки, между которыми хотим провести измерение (напряжения или времени). Включение курсора А или В осуществляется клавишами, находящимися против синей зоны экрана. Результаты измерений и сопутствующая информация, полученная на основе курсоров, появляются в специальном окне в верхней левой части экрана. На рисунке 5 курсоры (вертикальные) находятся в режиме измерения времени. Они не совпадают с измерительной сеткой экрана, но примерно отстают друг от друга на величину одной клетки (2,7  $\mu$ s), в то время как ширина клетки 2,5  $\mu$ s.

«Сбор инф.» - кнопка/индикатор вкл/выкл меню сбора информации об исследуемых сигналах. Повторное нажатие кнопки выключает меню.

«Зап. Выз» кнопка/индикатор вызова меню запись/воспроизведения профилей и осциллограмм. Повторное нажатие кнопки убирает меню.

«Дисплей» - кнопка/индикатор вкл/выкл меню управления качеством изображений экрана.

«Утилиты» - кнопка/индикатор вкл/выкл меню утилит.

Зона «Измерения однократных сигналов» (верхняя правая часть панели управления).

«Пуск/стоп» - запуск и остановка режима однократного измерения.

«Однокр» - ккнопка/индикатор, однократное нажатие на кнопку выключает сбор информации осциллографом, двукратное нажатие кнопки переводит прибор в режим ожидания однократного импульса. Запуск системы синхронизации произойдет только с приходом внешнего однократного сигнала.

## БЛОК-СХЕМА ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Компоненты процессорной системы (рисунок 7):

- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- ОЗУ – оперативное запоминающее устройство,
- ЗУПУ – запоминающее устройство программу управления;
- ЗУСИ – запоминающее устройство служебной информации;
- ЗУ – запоминающее устройство;
- ОУ – органы управления (передняя панель осциллографа);
- П - процессор;



- ДИС – дисплей; СС – сигнал синхронизации.



Рисунок 7. Осциллограф как компьютерное устройство

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОСЦИЛЛОГРАФА

- число каналов прибора;
- рабочая полоса частот пропускания прибора;
- интервалы измерения времени;
- интервалы измерения напряжений;
- чувствительность канала  $Y$ ;
- импеданс канала  $X$  и  $Y$ ;
- входное сопротивление входа синхронизации.

У цифровых приборов добавляются:

- время дискретизации (перевода аналогового сигнала в цифровой и наоборот: перевода цифрового сигнала в аналоговый);
- объем памяти.

## Тема 5. Измерительные генераторы

*Генератор и его математическая модель. Положительная обратная связь в усилителях. Условия генерации системы в радиоэлектронике.*

*Генератор с мостом Вина. Физическая модель, математические описание и условия стационарности для генератора с мостом Вина. Функциональная схема генератора с мостом Вина. Генераторы прямоугольных импульсов.*

*Классификация и основные параметры генераторов.*

### 5.1 Физическая и математическая модели генератора

Генератор – устройство, выходным сигналом которого является периодический процесс. Рассмотрим математическую модель генератора.

Пусть имеем усилитель (рисунок 8 а). Усилитель, устройство, у которого выходной сигнал связан с входным - уравнением (32), где  $k$  – коэффициент усиления усилителя:

$$u_{\text{ВЫХ}} = k u_{\text{ВХ}} \quad (32)$$

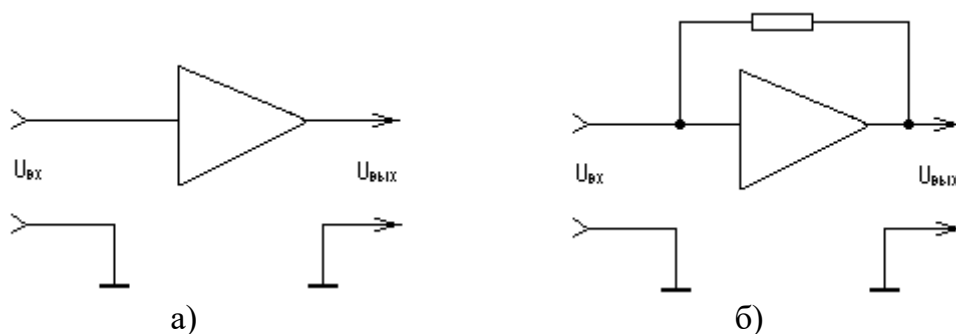


Рисунок 8. а) – усилитель напряжения без обратной связи; б) – усилитель напряжения с обратной связью

Подадим  $\beta$ -часть его выходного сигнала на вход усилителя (рисунок 8 б), т. е. организуем обратную связь (ОС). Работа такого усилителя с ОС будет описываться уравнением (33):

$$u_{\text{ВЫХ}} = k (u_{\text{ВХ}} + \beta u_{\text{ВЫХ}}) \quad (33)$$

Если из последнего уравнения выразить отношение:  $u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}}$ , то получим выражение (34):

$$\frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{k}{1 - \beta k} \quad (34)$$

В общем случае,  $\beta$  и  $k$  - комплексные числа, тогда отношение:  $u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}}$  будет так же комплексным числом и называться комплексной передаточной функцией (35):

$$\frac{\dot{u}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{u}_{\text{ВХ}}} = \frac{k}{1 - \beta k} \quad (35)$$

При этом, если  $\beta k = 1$ , то независимо от того, имеется на входе усилителя сигнал  $\dot{u}_{\text{ВХ}}$ , или нет, на выходе сигнал будет присутствовать. Такое состояние схемы является генерацией. Таким образом, генератор – это усилитель с обратной связью. Поскольку произведение комплексных коэффициентов  $\beta k = 1$ , то это значит, что мнимая часть в этом произведении равна 0, что предполагает сдвиг фазы сигнала между входом и выходом схемы равным 0 ( $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \arctg X/R$ ). В этом случае на входе схемы наблюдается сложение входного и выходного сигналов, или говорят – имеет место положительная обратная связь (ПОС). Это означает, генератор – это усилитель с ПОС. Однако для того, чтобы

в такой системе возникла генерация, необходимо выполнение некоторых условий для величин коэффициентов  $\dot{k}$  и  $\dot{\beta}$ . Нетрудно видеть, что при больших величинах модуля  $\dot{k}$ , числитель и знаменатель правой части выражения (35) может сокращаться. Это так же создает условия генерации. Таким образом, в схемах с ОС при больших значениях коэффициента усиления основного канала может возникать генерация. Вспомним «микрофонный эффект», который убирают уменьшением модуля коэффициента  $\dot{k}$ .

Итак, уравнение (35) - есть математическая модель генератора. *Генератор – это усилитель с ПОС и большим коэффициентом усиления основного канала.* Последние два условия - условия генерации любой системы.

## 5.2. Измерительный генератор с мостом Вина

Рассмотрим конкретную функциональную схему реализации генератора гармонических сигналов.

*Генератор гармонических колебаний с мостом Вина.* Это схема усилителя с обратной связью, реализованная в соответствии рисунков 9. Генератор данного типа может быть реализован на основе операционного усилителя (ОУ). ОУ – элемент электроники, отвечающий некоторым требованиям идеального усилителя. В частности, он имеет бесконечно:

- большое входное сопротивление ( $R_{вх} \approx 100 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$ );
- малое выходное сопротивление ( $R_{вых} \approx 100 \text{ Ом} - 10 \text{ кОм}$ );
- большой коэффициент усиления по напряжению ( $K_U \approx 1 - 10^6$ ).

ОУ осуществляет усиление разницы входных сигналов между его инвертирующим и не инвертирующим входами. Мост Вина организует ОС в усилителе на основе последовательного и параллельного включения R, C элементов. Элементы R, C могут быть разными или одинаковыми в последовательной и параллельной частях ОС. Рассмотрим случай с одинаковыми величинами элементов R, C в цепочках.

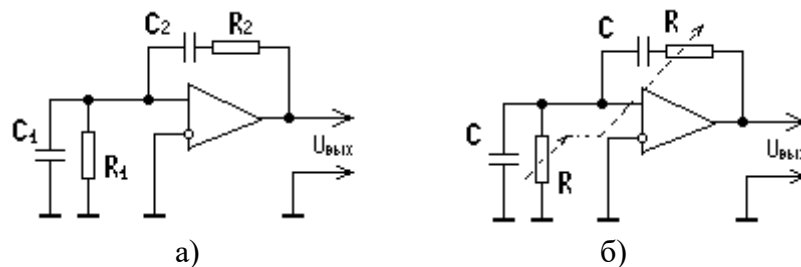


Рисунок 9. а) – схема ОУ с мостом Вина, на разных резистивных и емкостных элементах в цепи ОС; б) - на одинаковых резистивных и емкостных элементах в цепи ОС

Схема рисунка 9 б будет в режиме генерации, при условии  $\beta k = 1$ . Поскольку входное сопротивление ОУ считаем бесконечным, то отношение напряжений на входе и выходе микросхемы будем рассматривать как отноше-

ние соответствующих сопротивлений. Тогда коэффициент обратной связи  $\dot{\beta}$  (36):

$$\dot{\beta} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{\frac{j\omega C}{R + \frac{1}{j\omega C}} + R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (36)$$

Упростим последнее выражение, умножив его числитель и знаменатель на  $(R + 1/j\omega C)$ , получим (37):

$$\dot{\beta} = \frac{\frac{R}{j\omega C}}{\frac{R}{j\omega C} + (R + \frac{1}{j\omega C})^2} \quad (37)$$

Возведем в квадрат скобки, после чего умножим числитель и знаменатель на  $j\omega C$ , получим (38):

$$\dot{\beta} = \frac{R}{3R + j\omega CR^2 + \frac{1}{j\omega C}} \quad (38)$$

Чтобы в схеме произошла генерация, необходимо, чтобы комплексная часть в (38) равнялась нулю (39):

$$j\omega CR^2 + \frac{1}{j\omega C} = 0 \quad (39)$$

Откуда:  $\dot{\beta} = \frac{R}{3R} = \frac{1}{3}$  и  $k = 3$ . Это значит, для генерации гармонических сигналов, необходимо усиление основного канала равно 3. (39) позволяет определить частоту (период) колебаний генератора, на которой реализуется ПОС (40):

$$j\omega CR^2 = -\frac{1}{j\omega C}; \quad -1 = j^2; \quad \omega^2 = \frac{1}{R^2 C^2}; \quad f = \frac{1}{2\pi RC}; \quad T = 2\pi RC \quad (40)$$

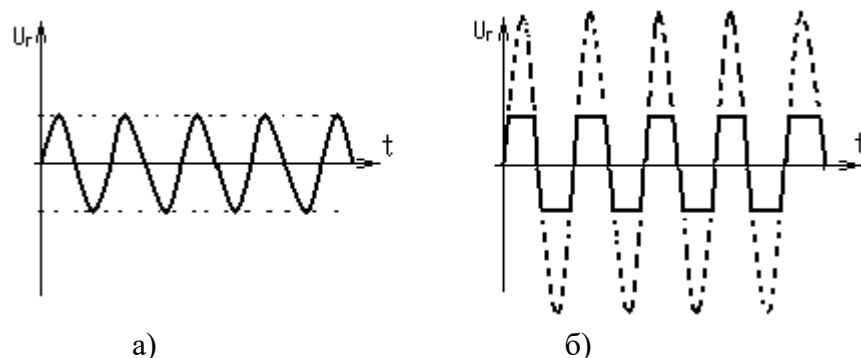


Рисунок 10. а) - работа генератора с мостом Вина при усилении основного канала  $k = 3$ ; б) – работа того же генератора в режиме насыщения при усилении  $k \gg 3$

Данный генератор гармонических сигналов может генерировать прямоугольные импульсы; для этого достаточно задать  $k \gg 3$ . Тогда усилитель входит в режим насыщения (рисунок 10 б) и чем больше будет усиление  $k$ , тем

ближе к идеальным будут прямоугольные импульсы. Функциональная схема генератора с мостом Вина приведена на рисунке 11.

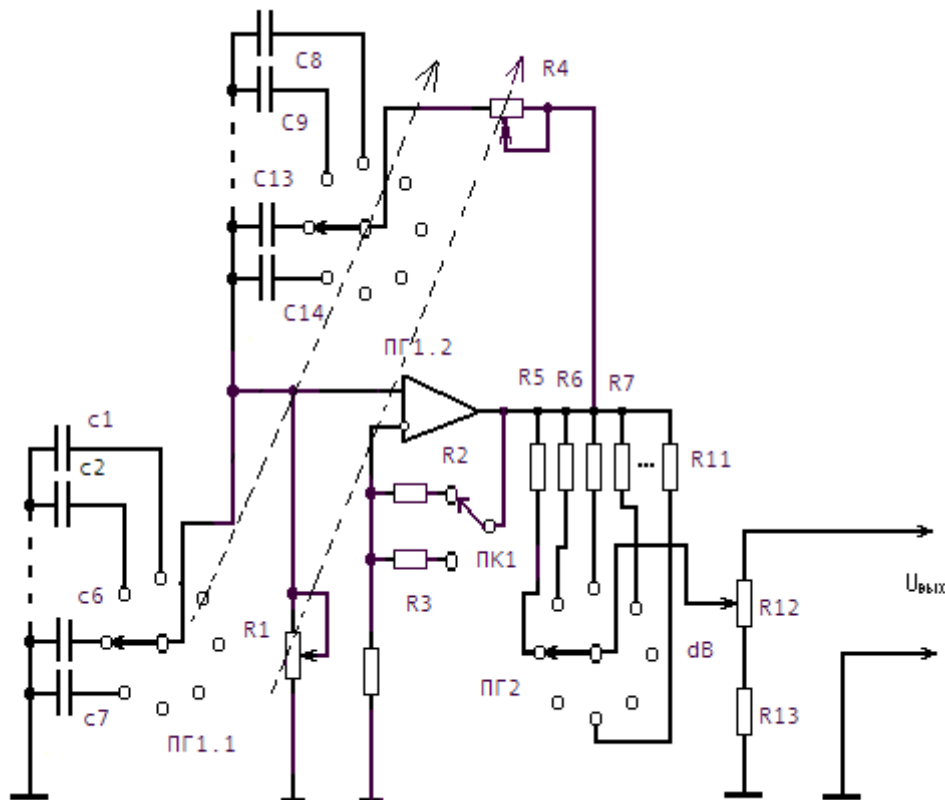


Рисунок 11. Функциональная схема генератора с мостом Вина на основе ОУ

Описание функциональной схемы генератора с мостом:

- DA 1 – усилитель, выполненный на основе ОУ;
- ПГ1.1; ПГ1.2 – барабанный переключатель грубой подстройки частоты;
- R1; R4 – плавная подстройка частоты генератора;
- C1 – C14 – конденсаторы, определяющие диапазон генерации при грубой подстройке частоты;
- ПК 1 – переключатель режимов: гармонический/импульсный сигнал;
- R2 – резистор, обеспечивающий гармонический режим работы генератора;
- R3 – резистор, обеспечивающий импульсный режим работы генератора;
- ПГ2.1 – барабанный переключатель регулировки выходного сигнала по логарифмической шкале;
- R5–R11 – резисторы делителя напряжения;
- R12 – плавная регулировка уровня выходного сигнала;
- R13 – ограничивающий резистор.

Генераторы прямоугольных импульсов строят и на основе логических элементов. Одна из схем такого генератора приведена на рисунке 12.

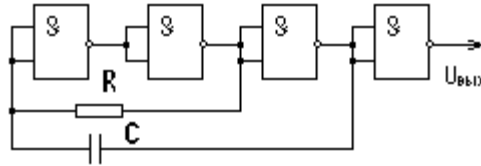


Рисунок 12. Генератор прямоугольных импульсов, построенный на основе логического элемента 2И-НЕ

Классификация генераторов осуществляется по разным признакам (виду генерируемых сигналов, диапазону генерируемых частот, выходной мощности, техническому исполнению и пр.). Тем не менее они характеризуются некоторыми основными параметрами.

Основные параметры генераторов:

- диапазон генерируемых частот;
- мощность выходного сигнала;
- выходное сопротивление прибора;
- формы генерируемых сигналов;
- девиация частоты генератора.

## Тема 6. Измерение цепей со средоточенными и распределенными параметрами

*Распределенные и сосредоточенные параметры цепей радиоэлектроники. Элементы  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами. Параллельные и последовательные схемы замещения для элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в цепях с распределенными параметрами.*

*Методы измерения сосредоточенных параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$ : мостовой, резонансный, преобразования во временной интервал или напряжение.*

*Цепи с распределенными параметрами. Стоячая волна. Токи, напряжения и сопротивление в цепях СВЧ. Измерение КСВ и мощности в цепи с распределенными параметрами.*

### 6.1 Электрические цепи со сосредоточенными параметрами

Электрические цепи условно разделяется на цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Одна и та же электрическая цепь при одних условиях проявляет себя как система с распределенными параметрами, при других - может являться системой с сосредоточенными параметрами. Доминирующим фактором, по которому определяют характер электрической цепи, является частота ее сигналов. На низких частотах электрические цепи проявляют себя как цепи с сосредоточенными параметрами; по мере повышения частоты сигналов в такой цепи начинают более существенно проявляться паразитные

емкости и индуктивности, которые могут качественно изменять работу цепи. Такая цепь становится цепью с распределенными параметрами. В ней, по токопроводящим элементам, происходит распределение емкости, индуктивности и активного сопротивления. Рассмотрим, что представляют собой элементы R, L и C в цепях обоих типов.

*Индуктивность* в электро-, радиотехнике реализуется на основе специально созданных катушек (соленоидов), которые характеризуются индуктивностью  $L$ , сопротивлением потерь  $r_L$  и собственной емкостью  $C_L$ . На величину  $L$  оказывают влияние сердечник соленоида, его экран, число обмоток;  $r_L$  катушки обусловлена омическими потерями, потерями магнитного поля в экране и сердечнике;  $C_L$  – емкостью между отдельными витками соленоида, емкостями между витками и экраном катушки и др. Любая катушка индуктивности характеризуется собственной резонансной частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad , \quad \text{и добротностью: } Q_L = \frac{\omega L}{r_L}.$$

На частотах выше резонансной схема замещения катушки индуктивности моделируется рисунком 13 а; для частот ниже резонансной - рисунка 13 б).

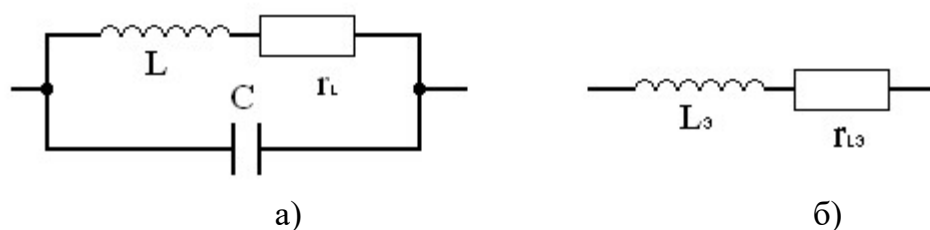


Рисунок 13. Эквивалентные схемы замещения катушки с индуктивностью  $L$ : а) для цепей с частотами  $\omega > \omega_0$ ; б) – для частот  $\omega < \omega_0$

При этом эквивалентная индуктивность  $L_3$  и эквивалентное сопротивление потерь  $r_{L3}$  определяются в соответствии выражений (41):

$$L_3 = \frac{L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad r_{L3} = \frac{r_L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (41)$$

*Емкость* в электро-, радиотехнике реализуется конденсатором, имеющим собственную емкость  $C$ , сопротивление потерь  $R_c$ , и индуктивность выводов и обкладок конденсатора  $L_c$ . Как и индуктивность, он имеет собственную резонансную частоту и добротность, которые определяются выражениями:  $\omega_0 = 1/\sqrt{CL_3}$  и  $Q_c = r_c \omega C$ . Последний параметр связан с еще одной характеристикой конденсатора – тангенсом угла потерь:  $\text{tg } \delta = 1/Q_c$ .

На частотах ниже резонансной конденсатор представляют как параллельной, так и последовательной схемами замещения (рисунок 14 б); при этом пренебрегают индуктивностью его выводов и обкладок. Для частот, превосхо-

дующих резонансную - эквивалентная схема замещения конденсатора учитывает эту индуктивность и моделируется электрической цепью рисунка 14 а, в виде параллельного включения составных элементов:  $C$ ,  $L_c$ ,  $R_c$ .

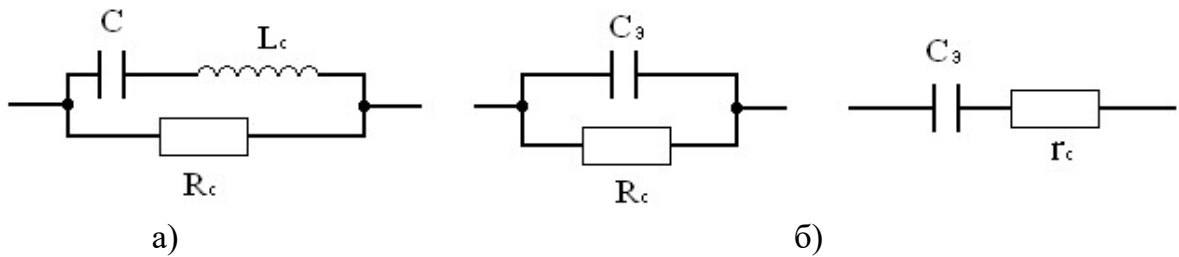


Рисунок 14. Эквивалентные схемы замещения конденсатора: а) для цепей с частотами  $\omega > \omega_0$ ; б) – для частот  $\omega < \omega_0$

Для частот  $\omega$ , ниже резонансной частоты  $\omega_0$  эквивалентная емкость и сопротивление потерь определяются выражениями (42):

$$C_э = \frac{C}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad r_c = \frac{1}{R_c(\omega C)^2} \quad (42)$$

*Резистивный* элемент цепи  $R$  реализуется резисторами. Они характеризуются индуктивностью выводов  $L_R$  и емкостью  $C_R$ , между выводами. Однако  $L_R$  и  $C_R$  на частотах, до 100 МГц, невелики и в цепях с сосредоточенными параметрами ими пренебрегают, учитывая лишь активное сопротивление  $R$ . При этом резистор имеет резонансную частоту, добротность, может иметь, в зависимости от частоты, индуктивно-активное или емкостно-активное сопротивление, моделироваться последовательными и (или) параллельными схемами замещения. Но эти его свойства учитываются в цепях с распределенными параметрами. Основное свойство резистора - препятствовать прохождению электрического тока; на нем происходит выделение тепла независимо от того, находится он в цепи сосредоточенными или распределенными параметрами. Измерение величин  $L$ ,  $R$  и  $C$  в цепях с сосредоточенными элементами реализуется, в основном, тремя методами, на основе: а) мостовой схемы; б) – резонанса; в) - преобразования во временной интервал или напряжение.

*При мостовом методе*, измеряемые сопротивления сравнивают с эталонными, отдельно регулируют действительную и мнимую составляющие сопротивления. Для сравнения используют четырехплечье, шестиплечье или трансформаторные мосты. Мостовой метод применим на низких частотах, ибо с повышением частоты начинают сказываться паразитные связи между элементами мостов. Погрешность метода не более 0,25%. Наибольшее применение имеет цепь из четырех двухполюсников Z1-Z4, соединенных по кольцевой схеме (Рисунок 15).



$Z_1$ , обычно, является объектом измерения, а  $Z_2$ - $Z_4$  – мерами. Ветвь с источником питания - генераторная диагональ, а ветвь с измерителем  $I$  – индикаторная. Если  $Z_1$  измеряемое сопротивление, то величинами  $Z_2$ - $Z_3$  добиваются баланса моста, достигая отсутствия тока в диагонали ( $I=0$ ). В общем случае  $Z_1$ - $Z_4$  комплексные числа, поэтому будет выполняться модульное и фазовое равновесие (43):

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4|; \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \quad (43)$$

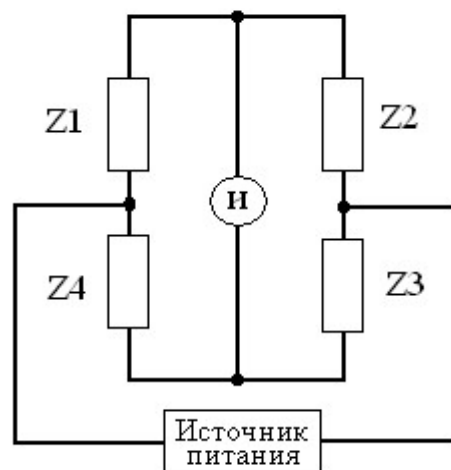


Рисунок 15. Мостовая схема, реализованная по принципу четырехплечья.

При резонансном методе измерения реактивные параметры замещают образцовым элементом, а потери определяют по изменению добротности измерительного контура. Метод был популярен в эпоху освоения радиочастотного диапазона шкалы электромагнитных колебаний.

Метод преобразования измеряемого параметра в напряжение реализуется цепью из измеряемого и эталонного резисторов, подключенных к образцовому источнику напряжения. По напряжению на резисторах определяют измеряемые величины. Точность метода повышается с использованием ОС и, если осуществляется раздельное измерение действительной и мнимой части выходного напряжения. Для измерения  $L$ ,  $C$  параметр преобразования время.

## 6.2 Электрические цепи с распределенными параметрами

Если в электрической цепи длина распространяющейся волны соизмерима с геометрическими размерами самой цепи, то ее считают электрической цепью с распределенными параметрами. Частоте 300 МГц соответствует  $\lambda = 1$  м ( $c = \lambda f$ ). Электронные системы, работа которых сопряжена с частотами близкими к 300 МГц и выше являются цепями с распределенными параметрами. Это цепи СВЧ диапазона. Нет четкой границы между цепями обоих видов. На таких частотах элементы  $L$  и  $C$  могут иметь большие величины сопротивления для индуктивности  $x_L = \omega L$  и бесконечно малые - для емкости:  $x_c = 1/\omega C$ . Если

по двум параллельным проводам передавать СВЧ сигнал, то наличие даже малой емкости между проводами приведет к короткому замыканию по переменному току и окажется невозможным передача сигнала. При этом, такая линия будет иметь большое входное сопротивление за счет индуктивности. Как следствие, передача сигналов даже радиочастотного диапазона (десятки, сотни МГц) осуществляется не обычными проводами, а посредством радиочастотного кабеля, в том числе и для передачи телевизионных сигналов. Кабель уменьшает влияние погонной индуктивности и емкости двухпроводной линии. Рассмотрим некоторые свойства электрических цепей СВЧ диапазона. Современные компьютерные системы и телефоны работает на частотах в ГГц и поэтому является цепями с распределенными параметрами.

На рисунке 16 а двухпроводная линия СВЧ диапазона (например, кабель), которая передает сигнал от генератора гармонических колебаний к нагрузке  $Z_n$ . Особенность такой цепи в том, что в ней часть сигнала поступает в нагрузку  $Z_n$ , а часть отражается, и это отражение будет тем больше, чем больше разница собственного сопротивления линии передачи и нагрузки  $Z_n$ . Это имеет место и в радиочастотном диапазоне, но там оно не велико (организуют специальные меры) и им, в большинстве случаев, пренебрегают. В линии происходит перенос колебания посредством волны. В результате в линии появляются падающая и отраженная волны, которые складываются (интерferируют) и создают установившейся волновой процесс (рисунок 16 б).

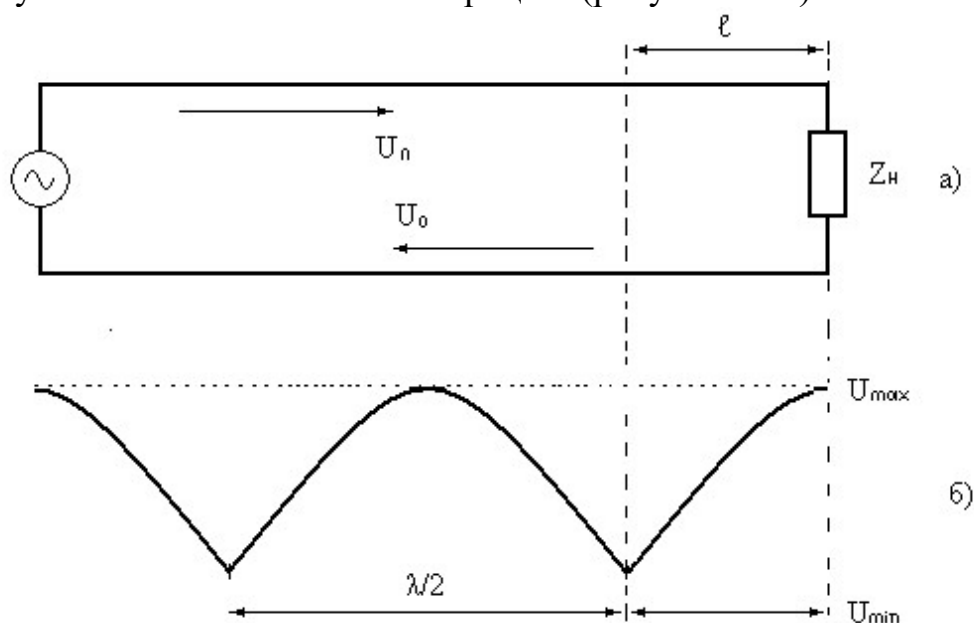


Рисунок 16. Линия передачи СВЧ диапазона.

Уравнение колебания:  $y = A \sin(\omega t + \varphi)$ , отличается от уравнения волны наличием  $kx$  в фазе колебаний:  $y = A \sin(\omega t - kx + \varphi)$ , где  $k$  – волновое число ( $k = 2\pi/\lambda$ );  $x$  – расстояние от точки генерация колебаний, до точки где рассматривается волновой процесс. Гармонические процессы гораздо проще рассматривать на основе комплексных чисел. Исходя из последнего, амплитуда сум-

марного напряжения  $U(t, \ell)$  на расстоянии  $\ell$  от нагрузки описывается уравнением (44):

$$\dot{U}(t, \ell) = \dot{U}_n e^{j\gamma \ell} + \dot{U}_o e^{-j\gamma \ell} \quad (44)$$

где:  $\dot{U}_n = U_{mn} e^{j\omega t} + U_{mn} e^{-j\omega t}; \quad \dot{U}_o = U_{mo} e^{j\omega t} + U_{mo} e^{-j\omega t};$

$U_n, U_o$  - соответственно комплексные напряжения падающей и отраженной волн напряжений;

$$\dot{U}_n = U_{mn} e^{j\omega t} + U_{mn} e^{-j\omega t};$$

$\gamma = \beta + j\alpha$  - комплексная постоянная распространения волнового процесса;  $\alpha$  - постоянная затухания;  $\beta = 2\pi/\lambda_n$  волновое число (фазовая постоянная);  $\omega$  - циклическая частота гармонического процесса;  $t$  - время.

При измерениях в СВЧ диапазоне используют измерительные линии, в которых потери практически отсутствуют ( $\alpha=0$ ), тогда уравнение (44) сведется к виду (45) и (46):

$$\dot{U}(t, \ell) = \dot{U}_n e^{j\gamma \ell} (1 + (\dot{U}_o / \dot{U}_n)) e^{-j\gamma \ell} \quad (45)$$

или,

$$\dot{U}(t, \ell) = (\dot{U}_n e^{j\gamma \ell} + |\dot{\Gamma}| e^{-j\gamma \ell}) e^{j(\varphi - 2\beta \ell)} \quad (46)$$

Поскольку,  $\dot{U}_n, \dot{U}_o$  - комплексные числа, то  $\dot{\Gamma}$  - комплексный коэффициент отражения (47):

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_n} = |\Gamma| * e^{j\varphi} \quad (47)$$

где:  $|\Gamma|$  - модуль, а  $\varphi$  - фазовый угол коэффициента отражения.

На рисунке 16 б изображено периодическое изменение суммарного напряжения падающей и отраженных волн: картина стоячих волн. Их форма отличается от синусоидальной и зависит от модуля  $|\dot{\Gamma}|$ , а величина  $\varphi$  - фазовый угол отражения определяет только их расположение относительно конца линии. В технике СВЧ обычно не занимаются измерением  $U(t, \ell)$  или  $I(t, \ell)$ , а определяют полное комплексное сопротивление  $\dot{Z}$  в данном поперечном сечении линии (48):

$$\dot{Z} = \dot{U}(t, \ell) / \dot{I}(t, \ell) = \frac{\dot{U}_n + \dot{U}_o}{\dot{I}_n + \dot{I}_o} \quad (48)$$

Отношение напряжения падающей (отраженной) волны к току падающей (отраженной) волны есть волновое сопротивление линии  $\dot{Z}_B$  (49):

$$\dot{Z}_B = \dot{U}_n / \dot{I}_n = \dot{U}_o / \dot{I}_o \quad (49)$$

С учетом последнего выражение для комплексного сопротивления линии нетрудно преобразовать к следующему виду (50):

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_B * (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma) \quad (50)$$

Величина, которая может быть измерена СВЧ волноводными линиями – это коэффициент стоячей волны (КСВ) (51):

$$\text{КСВ} = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|) \quad (51)$$

По величине КСВ определяют измеряемые величины сопротивления. Таким образом, измерения в области цепей с распределенными параметрами (СВЧ диапазоне) не связано с прямым измерением токов и напряжений, как это имеет место для цепей с сосредоточенными параметрами. В этой сфере обычно измеряют величины сопротивлений, причем косвенным методом: измеряют величину  $\dot{\Gamma}$ , определяют волновое сопротивление  $\dot{\mathbf{Z}}_B$ , которое зависит от геометрических размеров линии и типа волн, и далее комплексное сопротивление  $\dot{\mathbf{Z}}$ .

Еще одна электрическая величина, которая зачастую подвергается измерению в области СВЧ - это мощность сигнала. Однако в современной электронике актуальность этого измерения значительно уменьшилась, поскольку в практической электронике освоено генерирование сигналов мощности со значительным запасом. Тем не менее, как величина контроля электрической цепи она свою актуальность не потеряла.

## **Тема 7. Автоматизация измерений**

*Направление и принципы развития техники измерений. Автоматизация и функциональность цифровых осциллографов. Функциональность микропроцессорных систем в измерительной технике.*

*Блок-схема двухканального цифрового осциллографа. Панорамный измеритель СВЧ сигналов.*

*Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), структура, функции, классификация. Блок-схема одноуровневого ИВК.*

*Информационно измерительные системы (ИИС). Агрегатирование средств измерений.*

### **7.1 Направления и принципы автоматизации измерений**

Современное развитие техники измерений направлено на реализацию следующих основных принципов:

- исключение или (и) автоматизация регулировок, необходимых для проведения измерений;
- сведение косвенных измерений к прямым измерениям;
- создание многофункциональных приборов с панорамным отображением данных измерений;
- использование интеллектуальных систем на основе микропроцессорной техники;
- разработка измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), имеющих в своей системе процессоры с периферийным оборудованием и программным обеспечением;
- создание на базе ИВК универсального ядра информационных измерительных систем (ИИС).

Реализация указанных принципов проявляется на организации и функционировании цифровых осциллографов.

## 7.2 Возможности микропроцессоров (МП) в измерительной технике

Основные функции МП в измерительной технике:

- управление процессом измерений, отдельными узлами и прибором в целом;
- обработка измерительной информации, преобразование результатов измерений и представление их на экране дисплея в различных форматах;
- автоматическая коррекция систематических погрешностей с использованием математических моделей;
- расширение функциональных возможностей прибора (например, современные цифровые осциллографы помимо амплитудных и временных параметров позволяют измерять частотные параметры, проводить анализ спектров сигналов, статических характеристик и т. д.);
- диагностика неисправностей и самокалибровка.

## 7.3 Двухканальный осциллограф как МП-система

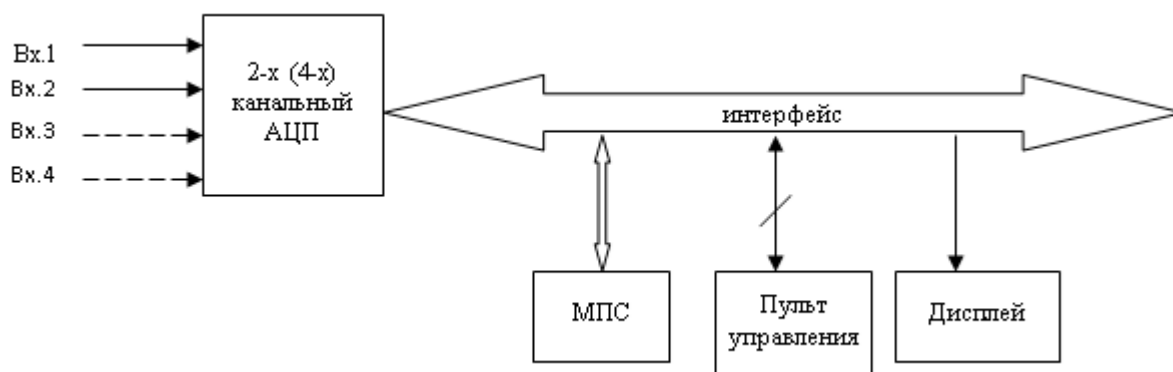


Рисунок 17. Блок-схема цифрового двухканального осциллографа

Приведем еще одну блок-схему цифрового осциллографа. В контексте управления процесса измерений на основе МП эта модель *двухканального цифрового осциллографа* рисунка 17.

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;

МПС – микропроцессорная система

#### 7.4 Измеритель СВЧ параметров

Панорамный измеритель СВЧ сигналов (рисунок 18): импеданса входных/выходных сигналов, АЧХ, ФЧХ, КСВ, КБВ и др.

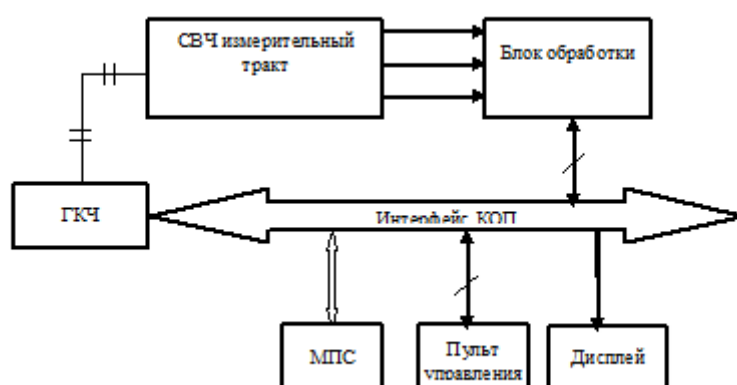


Рисунок 18. Панорамный измеритель параметров СВЧ сигналов

СВЧ - сверхвысокочастотный (измерительный тракт);

ГКЧ – генератор качающей частоты;

КОП – канал общего пользования.

МПС -микропроцессорная система

Однонаправленная, двунаправленная линии связи.

АЧХ -амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

КСВ – коэффициент стоячей волны;

КБВ – коэффициент бегущей волны.

#### 7.5 Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)

ИВК – автоматизированное средство измерений, имеющее в своей структуре:

- микропроцессоры (МП) с периферийным оборудованием;
- измерительные устройства;
- управляемые от МП и программное обеспечение.

ИВК реализуют следующие функции:

- измерение электрических величин;
- управление процессом измерений;
- управление воздействиями на объект измерений;
- предоставление оператору результатов измерений в заданной форме.

Для выполнения этих функций ИВК должен обеспечивать восприятие, преобразование и обработку сигналов от первичных измерительных преобразователей (датчиков или приборов), управление ими и другими компонентами, входящими в ИВК, а так же выработку нормализованных сигналов воздействия на объект измерения, оценку точности измерений и представление результатов измерений в стандартной форме.

По назначению, ИВК классифицируются на:

- 1) типовые – для решения широкого круга задач автоматизации измерений, испытаний и так далее;
- 2) специализированные – для решения уникальных задач автоматизации измерений;
- 3) проблемные – для решения широко распространенной, но специфической задачи автоматизации измерений.

В состав ИВК входят технические и программные средства. Программные средства включают в себя системное и общее прикладное программное обеспечение.

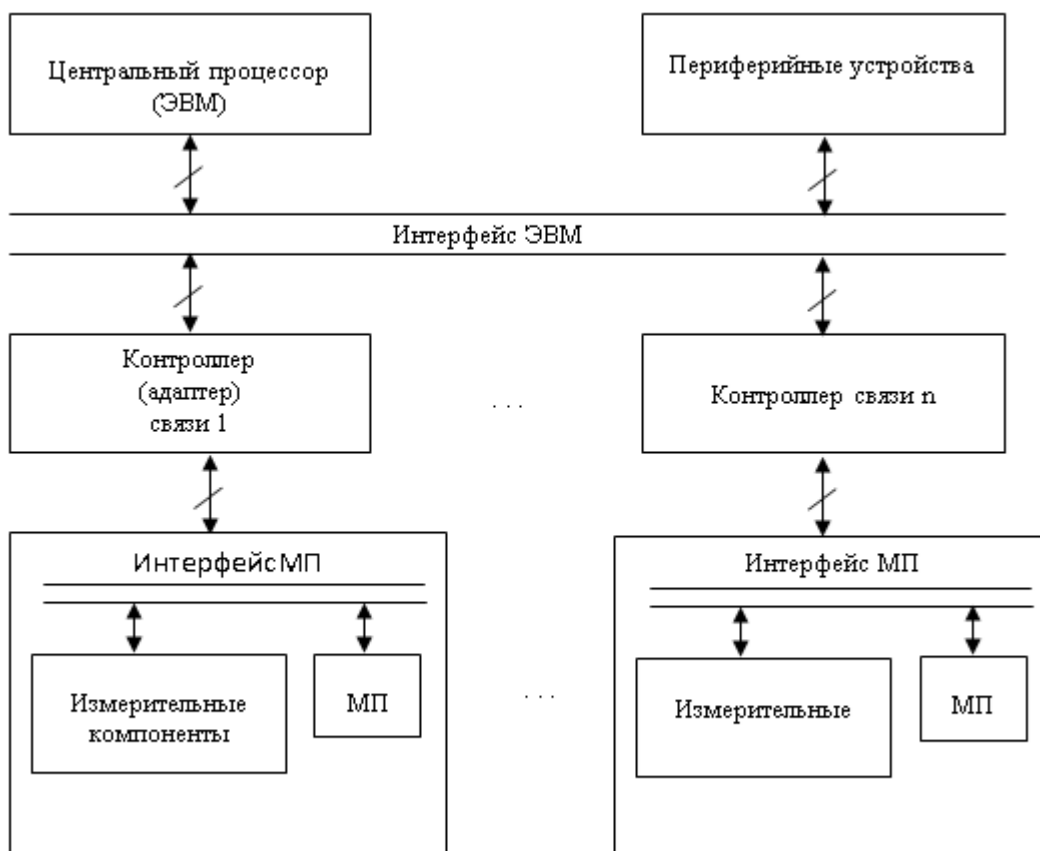


Рисунок 19. Блок-схема одноуровневого ИВК.

Существуют одноуровневые и многоуровневые ИВК.

В первых, вся измерительная периферия соединена непосредственно с интерфейсом центрального процессора.

В ИВК второго типа несколько уровней измерительной техники и вычислительная мощность центрального процессора распределена между ними (уровнями измерительной техники).

Примерная блок-схема одноуровневого ИВК приведена на Рисунке 19.

Число контроллеров связи определяется числом  $n$  – количеством контролируемых параметров измерительной системы.

## 7.6 Информационные измерительные системы (ИИС)

ИИС – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других технических средств, предназначенная для получения измерительной информации, ее преобразования и обработки с целью представления в удобном потребителю виде, либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики и идентификации.

В зависимости от назначения и выполняемых функций ИИС делятся на:

- измерительные системы;
- системы автоматического контроля;
- технической диагностики.
- распознавание образцов (идентификации).

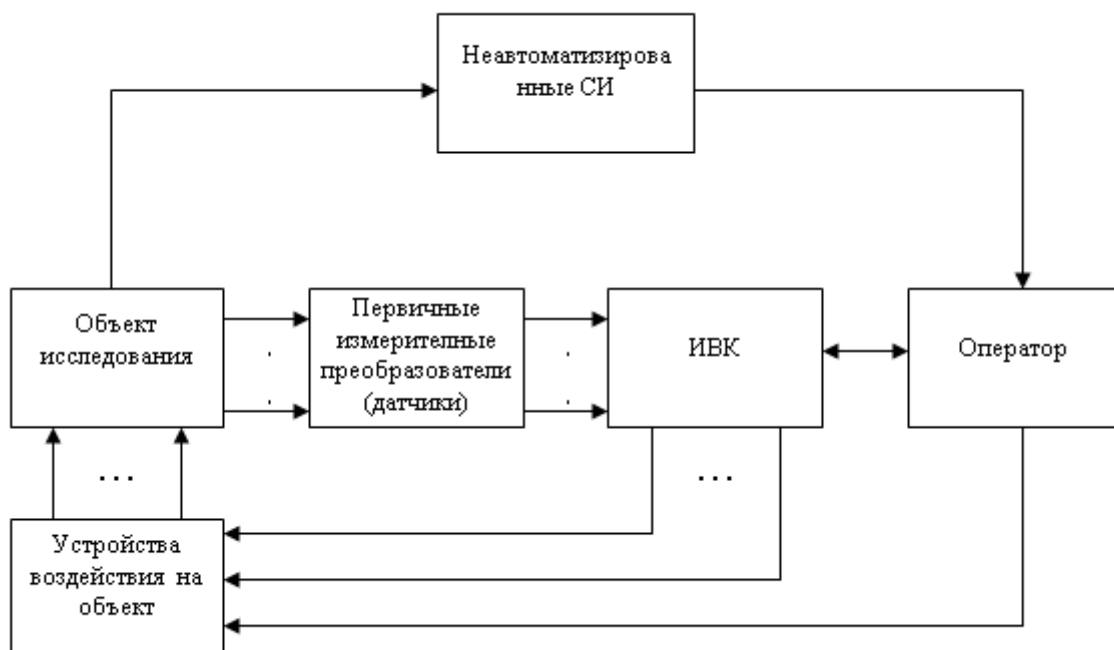


Рисунок 20. Блок-схема ИИС



Для ИИС характерна не только автоматизация таких процедур как регистрация, сбор и передача результатов измерений, но и проведение измерительного эксперимента при активном воздействии на объект исследования в соответствии с принятым планом. Оператор имеет возможность вмешиваться в ход эксперимента и корректировать его в режиме диалога.

Обобщенная структурная схема ИИС приведена на рисунке 20.

Типовые устройства ИИС определяются структурой используемого ИВК. Дополнительными являются следующие устройства:

- датчики, непосредственно воспринимающие от объекта исследования измеряемые величины и преобразующие их в изменение какого-либо параметра электрического сигнала или цепи;
- нормализующие преобразователи, необходимые для преобразования не унифицированных сигналов датчиков в унифицированные аналоговые или цифровые сигналы;
- АЦП;
- коммутаторы, осуществляющие поочередное подключение входных сигналов на общий выход.

### 7.7 Агрегатирование средств измерений.

Агрегатирование - это метод стандартизации, который позволяет создавать новые изделия путем компоновки их из ограниченного числа унифицированных функциональных частей (деталей, блоков, узлов или приборов).

Важное значение для внедрения агрегатирования имеет совместимость, которая подразделяется на информационную, энергетическую, конструктивную, метрологическую, эксплуатационную, надежность.

## **Тема 8. Стандартизация, нормирование и сертификация в сфере радиоэлектроники**

*Техническое нормирование и стандартизация (ТНиС). Основные системы стандартов в радиоэлектронике. Методы стандартизации. Метрологическое обеспечение (МО) измерений. Система предпочтительных чисел в элементной базе радиоэлектроники. Сертификация. Сертифицируемые виды деятельности. Виды сертификатов. Национальная система подтверждения соответствия РБ (НСПС РБ).*

### 8.1 Техническое нормирование и стандартизация (ТНиС)

ТНиС – единство:

- технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации;
- субъектов технического нормирования и стандартизации;

- правил и процедур функционирования системы в целом.

*К техническим нормативным правовым актам в области технического нормирования и стандартизации* относятся: регламенты, кодексы, стандарты, условия.

*Субъектами технического нормирования и стандартизации* являются: органы власти, государственного контроля, сертификации, хозяйствования, разработчики технических законов и стандартов.

*Правила и процедуры функционирования системы* предполагают ее единство, целостность и наличие обратной связи.

Центральным координатором работ в этой сфере является: Государственный Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт). В его подчинении – территориальные и ведомственные органы. Часть вопросов решает Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации (Бел ГИСС).

Цель ТНиС –инструмент обеспечения качества продукции, работ и услуг.

Задачи госстандарта:

- координация научно-технических решений;
- разработка проектов, законодательных актов, методических документов;
- разработка и утверждение национальных стандартов;
- государственный надзор за стандартами;
- участие в государственных испытаниях продукции;
- подготовка кадров;
- представление РБ в международных организациях в сфере метрологии, стандартизации и сертификации.

Важнейшей из задач является разработка документов, которые называют еще: техническими нормативными правовыми актами (ТНПА). ТНПА могут быть в виде технического: регламента, кодекса, стандарта или условия.

## 8.2 Основные системы стандартов в радиоэлектронике

Единая система конструкторской документации (ЕСКД, 1971) – комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила разработки, оформления и обращения конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой организациями и предприятиями.

ЕСКД позволяет осуществлять:

- возможность взаимообмена между различными предприятиями внутри страны и между государствами без их переоформления;
- сокращение и упрощение форм технических документов и графических изображений;
- механизацию и автоматизацию технических документов.

Несоблюдение стандартов запрещается законом. ЕСКД – язык конструктора любого вида изделий.

ЕСТД, 1978 – комплекс стандартов для разработки, оформления и обращения технологической документации (ТД). ТД – текстовые и графические данные, определяющие порядок изготовления изделия, его контроль и приемку.

СОЕИ, 1973 – система обеспечения единства измерений, учитывает и отображает научно-технические достижения в области метрологии.

ССБТ, 1974 – система стандартов безопасности труда.

ЕСПД, 1980 – единая система программной документации.

ЕССПС, (1982 – единая система стандартизации приборостроения.

ЕСКК ТЭН, 1982 – единая система классификации и кодирования технико-экономической информации.

В настоящее время на территории РБ действует порядка 50 систем стандартизации. Это обусловлено включением РБ в мировую (европейскую) систему распределения труда в различных сферах деятельности человека.

### 8.3 Методы стандартизации

Метод – целенаправленно организованная последовательность действий, приводящая к запланированному результату. Методы стандартизации взаимосвязаны и один может переходить в другой, не имея четкой границы.

Ограничение (симплификация) – деятельность, заключающаяся в определении конкретных объектов, которые признаются нецелесообразными для использования в дальнейшем производстве.

Типизация (метод базовой конструкции) – деятельность по созданию типовых объектов, конструкций, технологий, форм документации. Например, телевидение, по признаку экрана 35, 47, 59 и 61 см.

Унификация продукции. Деятельность по рациональному сокращению числа типов деталей, агрегатов одинакового функционального назначения. Например, блоки питания к телефонам.

Агрегатирование – метод создания изделий из отдельных стандартных узлов, многократно используемых при создании различных устройств на основе геометрической и фундаментальной взаимозаменяемости. Например, заменяемые блоки в частотомерах.

Существуют и др. методы стандартизации: селекция, упорядочение, систематизация, которые взаимосвязаны с приведенными и являются их следствиями или продолжениями.

### 8.4 Метрологическое обеспечение (МО) измерений

МО – это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Научной основой МО является метрология, организационной – метрологическая служба РБ.

*Техническая служба МО имеет следующие структуры-системы:*

- государственных эталонов единиц физических величин;
- передачи размеров от эталонов единиц физических величин;
- разработки, производства и выпуска систем измерения (СИ);
- обязательных государственных испытаний СИ, при серийном и массовом производстве;
- обязательной государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации СИ;
- стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- разработки, стандартизации аттестации и сертификации методик выполнения измерений;

Метрологическая служба РБ: государственная, ведомственная, зональная (областная), производственная.

Метрологический надзор – деятельность органов метрологической службы, направленный на контроль МО, с целью его эффективного использования.

Формы метрологического надзора: поверка (первичная, периодическая, внеочередная, инспекционная, ревизионная, комплексная), экспертиза, аттестация СИ и методик измерений.

*Эталоны физических величин* могут быть образцовыми или рабочими, классифицируются на первичные, вторичные, специальные.

*Основными эталонами электрических величин* являются: эталон тока, напряжения, времени и частоты, сопротивления, емкости, индуктивности.

## 8.5 Система предпочтительных чисел в элементной базе радиоэлектроники

Эта система есть последовательность чисел для унификации значений технических параметров (ГОСТ 8032–84, согласуется с ИСО).

Числа получают на основе выражения:

$$q_i = \mp 10^{\frac{i}{R}}$$

$R = 10; 20; 40; 80; 160.$

$R$  – число членов прогрессии в одном десятичном интервале;

$i$  – порядковый номер члена геометрической прогрессии.

В радиоэлектронике приняты ряды предпочтительных чисел с буквой E и используют не только числовой ряд значений R.

Ряд E48 – 2%; E96 – 1%; E192 – 0,5;

Имеются ряды для разброса в 0,25; 0,1 % и выше.

Для ряда E 96 следующие 96 величин:

1,00 1,02 1,05 1,07 1,10 1,13 1,15 1,18 1,21 1,24 1,27 1,30 1,33 1,37 1,40 1,43 1,47  
1,50 1,54 1,58 1,62 1,65 1,69 1,74 1,78 1,82 1,87 1,91 1,96 2,00 2,05 2,10 2,15 2,21

2,26 2,32 2,37 2,43 2,49 2,55 2,61 2,67 2,74 2,80 2,87 2,94 3,01 3,09 3,16 3,24 3,32  
 3,40 3,48 3,57 3,65 3,74 3,83 3,92 4,02 4,12 4,22 4,32 4,42 4,53 4,64 4,75 4,87 4,99  
 5,11 5,23 5,36 5,49 5,62 5,76 5,90 6,04 6,19 6,34 6,49 6,65 6,81 6,98 7,15 7,32 7,50  
 7,68 7,87 8,06 8,25 8,45 8,66 8,87 9,09 9,31 9,53 9,76

Существуют ряды и для более точных значений номиналов резисторов и конденсаторов: E96, E192 и более. Резисторы и конденсаторы таких рядов являются прецизионными элементами радиоэлектроники.

Система предпочтительных чисел для резисторов и конденсаторов

E24	E12	E6	E3
Допуск $\pm 5\%$	Допуск $\pm 10\%$	Допуск $\pm 20\%$	Допуск $\pm 30\%$
1,0	1,0	1,0	1,0
1,1			
1,2	1,2		
1,3			
1,5	1,5	1,5	
1,6			
1,8	1,8		
2,0			
2,2	2,2	2,2	2,2
2,4			
2,7	2,7		
3,0			
3,3	3,3	3,3	
3,6			
3,9	3,9		
4,3			
4,7	4,7	4,7	4,7
5,1			
5,6	5,6		
6,2			
6,8	6,8	6,8	
7,5			
8,2	8,2		
9,1			

## 8.6 Сертификация

*Сертификация* - форма подтверждения соответствия, осуществляемого аккредитованным органом по сертификации.

Система сертификация – система, располагающая собственными правилами процедурами и управления для проведения сертификации продукции.

Целями Системы сертификации являются:

- удостоверение соответствия объектов оценки соответствия требованиям типовым правовым актам (ТИПА);
- содействие потребителям в компетентном выборе продукции (услуг);
- защита отечественного рынка от недоброкачественной и небезопасной продукции;
- снижение технических барьеров в торговле;
- содействие повышению качества и конкурентоспособности отечественной продукции.

### 8.7 Сертифицируемые виды деятельности

- сертификация продукции;
- декларирование соответствия продукции;
- сертификация услуг;
- сертификация систем управления качеством (систем менеджмента качества, систем качества на основе принципов анализа рисков и критических контрольных точек (НАССР), принципов надлежащей производственной практики (GMP), систем управления окружающей средой (систем экологического менеджмента) и др.
- сертификация профессиональной компетентности персонала;
- инспекционный контроль за сертифицированной продукцией, услугами, системами управления и персоналом;
- подготовка и сертификация экспертов-аудиторов по качеству;
- организационно-методическая помощь в области подтверждения соответствия;
- ведение реестра Национальной системы подтверждения соответствия Республики;
- ведение Государственного кадастра служебного и гражданского оружия и боеприпасов.

### 8.8 Виды сертификатов

*Сертификат компетентности* - документ, удостоверяющий профессиональную компетентность физического лица в выполнении определенных работ, услуг.

*Сертификат соответствия* - документ, удостоверяющий соответствие объекта оценки соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации.

*Сертификация эксперта-аудитора по качеству* - оценка Национальным органом по оценке соответствия Республики Беларусь квалификации эксперта-аудитора по качеству с целью определения его соответствия установленным требованиям.

## 8.9 Национальная система подтверждения соответствия РБ (НСПС РБ)

*НСПС РБ* - установленная совокупность субъектов оценки соответствия, нормативных правовых актов и технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации, определяющих правила и процедуры подтверждения соответствия и функционирования системы.

В техническом кодексе сертификации применяют следующие термины и определения.

*Аккредитованный орган по сертификации* - юридическое лицо, аккредитованное для выполнения работ по подтверждению соответствия в определенной области аккредитации.

*Апелляция* - официальное обращение в более высокую инстанцию по принятому аккредитованным органом по сертификации решению.

*Декларация о соответствии* - документ, в котором изготовитель (продавец) удостоверяет соответствие производимой и (или) реализуемой им продукции требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации.

*Заявитель на подтверждение соответствия* - юридическое лицо, в том числе иностранное, индивидуальный предприниматель или персонал, обратившиеся с заявкой на сертификацию, либо юридическое лицо, в том числе иностранное, или индивидуальный предприниматель, обратившиеся с заявкой о регистрации принятой ими декларации о соответствии.

*Знаки соответствия Национальной системы подтверждения соответствия Республики Беларусь* - знаки, защищенные в установленном законодательством порядке, свидетельствующие о проведении всех необходимых процедур подтверждения соответствия и о соответствии маркированных ими объектов оценки соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации.

*Область аккредитации* - сфера деятельности, в которой аккредитованному органу по сертификации или аккредитованной испытательной лаборатории (центру) предоставлено право на выполнение работ по подтверждению соответствия или проведение испытаний продукции.

*Эксперт-аудитор по качеству* - специалист в определенной области, имеющий квалификацию для проведения работ по подтверждению соответствия, сертифицированный в установленном порядке.

## **2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

### **2.1 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ»**

Практическое занятие №1. Основные параметры теории погрешностей. Классы точности измерительных приборов .....	49
Практическое занятие №2. Обработка результатов многократных наблюдений при прямых равноточных измерениях .....	50
Практическое занятие №3. Составные критерии для оценки распределения измерений на принадлежность его к нормальному .....	54
Практическое занятие №4. Оценка погрешностей однократных измерений ...	57
Практическое занятие №5. Определение математических ожиданий среднеквадратичных отклонений в электрических схемах .....	62
Практическое занятие №6. Математическая обработка косвенных измерений .....	63
Практическое занятие №7. Разработка математических моделей на основе измерений методом наименьших квадратов .....	69
Практическое занятие №8. Контрольная работа .....	74



## Практическое занятие 1

### Основные параметры теории погрешностей. Классы точности измерительных приборов

Теоретические сведения.

*Класс точности прибора k.* Выражается в процентах, параметр, который присваивается измерительному прибору заводом изготовителем.

*Относительная погрешность измерений  $\varepsilon$ ,* величина, показывающая долю погрешности от истинного значения:

$$\varepsilon = \Delta x / \langle x \rangle$$

$\Delta x$  – абсолютная погрешность измерения,  
 $\langle x \rangle$  - истинное значение измерений, определяемое как среднее арифметическая величина. Может выражаться в процентах.

*Абсолютная погрешность измерительного прибора  $\Delta x_{np}$ .*

$$\Delta x_{np} = k * x_{max} / 100\%$$

$x_{max}$  – максимальное значение шкалы прибора;

$k$  – класс точности прибора.

*Суммарная абсолютная погрешность прибора  $\Delta$ .*

$$\Delta = a + bx$$

$a$  – аддитивная составляющая суммарной погрешности,

$b$  – мультипликативная компонента суммарной погрешности.

*Аддитивная погрешность  $a$*  не зависит от чувствительности прибора и является постоянной для всех значений входной величины в пределах диапазона измерений.

*Мультипликативная погрешность  $b x$*  прибора зависит от чувствительности прибора и изменяется пропорционально текущему значению входной величины.

*Амперметры при измерениях включаются последовательно с токопроводящим проводом в электрической цепи; вольтметры – параллельно нагрузке.*

**Пример.** Определить показания двух последовательно включенных миллиамперметров с конечным значением шкалы  $I_k = 100$  мА (число делений шкалы 100) и классов точности 1,0 и 0,5. Действительное значение тока 50 мА. Определить наибольшую разницу в показаниях двух миллиамперметров.

Решение:

Погрешность прибора класса точности  $k$ :

$$\Delta x_{np} = k * x_{max} / 100\%$$

Абсолютная погрешность для приборов классов точности  $k_1$  и  $k_2$ , соответственно:

$$\Delta I_1 = k_1 * x_{max} = 0,01 * 100 = 1,0 \text{ (мА)};$$

$$\Delta I_2 = k_2 * x_{max} = 0,005 * 100 = 0,5 \text{ (мА)}$$

$I_1 = 50 \pm 1 \text{ мА}$ ; пределы измерений:  $49 - 51 \text{ мА}$ ;

$I_2 = 50 \pm 0,5 \text{ мА}$ ; пределы измерений:  $49,5 - 50,5 \text{ мА}$ ;

Максимальная разница показаний двух приборов:

$$\Delta I_{max} = 51 - 49,5 = 1,5 \text{ (мА)}$$

1. Определить класс точности миллиамперметра с конечным значением шкалы  $I_k = 0,5 \text{ мА}$  для измерения тока  $I = 0,1 \dots 0,5 \text{ мА}$  так, чтобы относительная погрешность  $\delta_I$  измерения тока не превышала  $1 \%$ . Ответ:  $0,2$

2. К одному и тому же резистору поочередно подключают разные цифровые вольтметры классами точности  $k_1 = 0,002 \%$  и  $k_2 = 0,001 \%$ , которые показали: один -  $10 \text{ В}$ ; другой -  $9,98 \text{ В}$  на пределе  $10 \text{ В}$ . Оценить качество измерений приборов, гарантированное заводом изготовителем.

3. Определить погрешность, с которой выполнено измерение индуктивности катушки  $L = 85 \text{ мГн}$  и сопротивление резистора  $R = 2,83 \text{ Ом}$ . Основная погрешность моста задана в виде двух составляющих: аддитивной и мультипликативной  $\pm(1+6/L) \%$ ,  $\pm(1+6/R) \%$ , где  $L$  - индуктивность,  $\text{мкГн}$ ;  $R$  - сопротивление,  $\text{Ом}$ . Ответ:  $\pm 1,0 \%$ ;  $\pm 3,1 \%$

4. Определить класс точности магнитоэлектрического миллиамперметра с конечным значением диапазона измерения тока  $I_k = 0,5 \text{ мА}$ , если предельное значение абсолютной погрешности измерений постоянно и равно  $\pm 0,0015 \text{ мА}$ . Ответ:  $0,5$ .

5. Амперметр со сопротивлением  $R_A = 0,1 \text{ Ом}$  по ошибке зашунтировали сопротивлением  $R_{ш} = 5 \text{ Ом}$ . Во сколько раз возросла цена деления прибора? Ответ:  $1,02$  раза.

## Практическое занятие 2

### Обработка результатов многократных наблюдений при прямых равноточных измерениях

Теоретические сведения.

В ходе измерений проведено  $n$  наблюдений физической величины. Результаты наблюдений  $x_i (i=1, 2 \dots n)$  лежат в диапазоне, указанном для Вашего варианта и составляют выборочный размах:  $x_{\max} - x_{\min}$ . Считая измерения равноточными (проведенными одним оператором, одним и тем же прибором, при одних и тех же условиях), определить результат измерений по форме:  $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$ ;  $\epsilon$ ;  $P$  физической величины Вашего варианта в соответствии следующей последовательности действий.

1. Согласно числу измерений  $n$  Вашего варианта, составьте ряд значений измеренной величины из указанного диапазона, таким образом, чтобы они группировались около некоторого среднего значения  $\langle x \rangle$ . Причем, больших отклонений от среднего значения должно быть гораздо меньше, чем малых; и их основное количество должно группироваться вокруг среднего значения.

2. Найдите истинное значение проведенных измерений  $\langle x \rangle$ , на основе среднеарифметического значения:

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$x_i$  –  $i$ -е измерения из числа Вами выбранных.

3. Определите случайные отклонения  $\Delta x_i$  измерений:

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$$

4. Проверить равенство нулю суммы всех значений  $\Delta x_i$ . Если это условие не выполняется, скорректируйте п. 1 задания, так чтобы сумма положительных и отрицательных отклонений приблизительно равнялась 0.

5. Рассчитайте случайную погрешность  $\Delta x_{\text{сл}} = t_{nP} \cdot \sigma_n$  для доверительной вероятности  $P$ . Для этого:

а) определите СКО (среднеквадратичное отклонение)  $\sigma$  измеряемой величины:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}$$

б) ее среднее значение  $\sigma_n$ :

$$\frac{\sigma}{n} = \sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}$$

в) по таблице коэффициентов Стьюдента найдите  $t_{nP}$  в соответствии данных Вашего варианта.

6. Определите приборную погрешность измерений:

$$\Delta x_{\text{ср}} = \delta \frac{t_{\text{нр}}}{3,0} = x_{\text{max}} \frac{t_{\text{нр}}}{3,0} * \frac{k}{100\%}$$

7. По половине деления шкалы  $h$  найти погрешность округления, если она имеет значение  $x_{\text{max}}$  и содержит 100 делений равной величины:

$$\Delta x_{\text{окр}} = P * \frac{h}{2}$$

8. Определить полную погрешность измерения:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2 + \Delta x_{\text{окр}}^2}$$

### Коэффициенты Стьюдента

Таблица 2

n	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,98	P = 0,99	P = 0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,3	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

9. Вычислить относительную погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} * 100\%$$

10. Считая, что систематическая погрешность составляет 0,00001% от истинного значения, определить ее поправку. Если она на порядок меньше полной погрешности, то ею пренебрегают.

11. Запишите окончательный результат, обозначенный в тексте задания.

12. Составьте таблицу результатов, с указанием:

- истинного значения измеряемой величины;
- погрешности измерения;
- доверительной вероятности;
- относительной ошибки измерения;
- среднеквадратичного отклонения;
- среднего значения среднеквадратичного отклонения.

### Контрольная работа 1.

Задание.

Вариант студента определяется его порядковым номером с списке журнала старосты учебной группы.

Согласно своего варианта, выполнить задание в соответствии методических указаний практического занятия.

Таблица 1 Данные задания для вариантов.

В-т	Число измерений n	Диапазон измерений	Величина	Доверительная вероятность P	$x_{max}$	Класс точности прибора k
1	13	99,92...100,10	мВ	0,9	120	0,02
2	14	7,633...7,959	В	0,95	10	0,05
3	15	0,124... 0,156	А	0,9	0,3	0,1
4	14	10,021...10,038	мА	0,9	15	0,2
5	15	12,101...12,118	С	0,96	15	0,5
6	13	8,020...8,038	Ом	0,97	10	1,0
7	14	100,292 ... 100,324	кОм	0,98	150	2,5
8	15	10,492 ... 10,524	МОм	0,9	15	4,0
9	14	9,92...10,2	А	0,94	15	0,02
10	13	41,111...42,321	мС	0,93	50	0,05
11	15	110,01...110,12	мкФ	0,92	140	0,1
12	13	482,364...482,381	Гц	0,91	500	0,2
13	14	8,911...8,927	В	0,95	10	0,5
14	15	76,138...76,391	М	0,96	100	1,0

15	14	3,63...3,95	см	0,979	5	2,5
16	14	346,227...346,257	кГц	0,98	500	4,0
17	13	1,92...2,10	Н	0,95	3	0,02
18	14	5,688...5,712	мС	0,94	10	0,05
19	15	89,134...89,210	мм	0,93	100	0,1
20	14	625,12...625,31	кН	0,92	1000	0,2
21	13	21,97...22,19	Гн	0,91	50	0,5
22	13	76,331...79,591	Дж	0,9	100	1,0
23	14	46,127...46,257	А	0,95	100	2,5
24	15	9,58...9,99	см	0,92	10	4,0
25	14	952,1...953,4	Ом	0,95	1000	0,02
26	14	47,20...48,42	мкС	0,98	50	0,05

### Практическое занятие 3

#### Составные критерии для оценки распределения измерений на принадлежность его к нормальному

Теоретические сведения.

При количестве измерений  $12 < n < 50$  при проверке распределения на предмет нормального пользуются двумя составными критериями.

Критерий 1. Результат наблюдения можно считать распределенным нормально, если:

$$d_{1-q/2} < d < d_{q/2},$$

где:  $d_{1-q/2}$ ;  $d_{q/2}$  - квантили распределения статистики  $d$  ;  
 $q$  – заранее выбранный уровень значимости.

Таблица 3. Статистика  $d$

n	(q/2)*100%		(1 - q/2)*100%	
	1%	5%	95%	99%
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,7360	0,7040
31	0,8826	0,8625	0,7404	0,7110
36	0,8769	0,8578	0,7440	0,7167
41	0,8722	0,8540	0,7470	0,7216
46	0,8682	0,8508	0,7496	0,7256
51	0,8648	0,8481	0,7518	0,7291

Уровень значимости – процентное значение того, что измерение не попадет в доверительный интервал. Например, при доверительной вероятности измерения 95% уровень значимости  $q = 5\%$ .

Квантили распределения – величины, связывающие количество измерений с допустимым уровнем значимости как по верхней, так и нижней критическим областям.

$$d = \sum_{i=1}^n |X_i - \langle X \rangle| / nS^*$$

$S^*$  - смещенная оценка СКО:

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2}$$

Критерий 2. Результаты наблюдений (измерений) принадлежат нормальному распределению, если не более  $m = 2$  разностей  $|X_i - \langle X \rangle|$  превышает значение  $Z_{P/2} * S$ .  $S$  – среднеквадратичное отклонение проведенных измерений. Напомним:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2}$$

$Z_{P/2}$  – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающий вероятности  $P/2$ .

Пример.

Определить по составному критерию, отвечает ли закон распределения результатов 13 равнозначных измерений напряжения нормальному закону:

100,08 мВ; 100,09 мВ; 100,07 мВ; 100,10 мВ; 100,05 мВ; 100,06 мВ;

100,04 мВ; 100,06 мВ; 99,95 мВ; 99,92 мВ; 100,02 мВ; 99,98 мВ; 99,97 мВ.

Рассчитать среднеарифметическое значение напряжения  $\langle U \rangle$ ; среднеквадратическое отклонение среднего арифметического; доверительный интервал (при заданной доверительной вероятности  $P=0,98$ ). Написать правильно результат измерения.

Оценка по Критерию 1.

1. Найдем математическое ожидание (среднеарифметическое) напряжения  $\langle U \rangle$ :

$$\langle U \rangle = \langle U_{cp} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{13} U_i = 100,03 \text{ мВ};$$

2. Находим случайные погрешности  $n = 13$  измерений.

100,08 мВ – 100,03 мВ = 0,05 мВ;

100,09 мВ – 100,03 мВ = 0,06 мВ;

$$\begin{aligned}
100,07 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,04 \text{ мВ}; \\
100,10 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,07 \text{ мВ}; \\
100,05 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,02 \text{ мВ}; \\
100,06 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,03 \text{ мВ}; \\
100,04 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,01 \text{ мВ}; \\
100,06 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= 0,03 \text{ мВ}; \\
99,95 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= - 0,08 \text{ мВ}; \\
99,92 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= - 0,11 \text{ мВ}; \\
100,02 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= - 0,01 \text{ мВ}; \\
99,98 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= - 0,05 \text{ мВ}; \\
99,97 \text{ мВ} - 100,03 \text{ мВ} &= - 0,06 \text{ мВ}
\end{aligned}$$

3. Вычисляем СКО (оно же  $\sigma$ ).

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{13} \Delta x_i^2} = 0,0574 \text{ мВ}.$$

4. Смещенная оценка  $S^*$  СКО:

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{13} (X_i - \langle X \rangle)^2} = 0,0551 \text{ мВ}$$

Вычисляем коэффициент  $d$ :

$$d = \sum_{i=1}^{13} |x_i - \langle x \rangle| / nS^* = 0,86555$$

По таблице 3 определяем квантили распределения с выбранным уровнем значимости  $q = 0,05$ . Используем экстраполяцию для определения квантилей, поскольку таблицы для  $q = 0,02$  не приведено.  $3\% = 98\% - 95\%$ .

$$d\left(\frac{q}{2}\right) = d(0,01) = 0,9137 + 3 \frac{0,9137 - 0,9001}{21 - 16} = 0,9219;$$

$$d\left(\frac{1-q}{2}\right) = 0,7236 + 3 \frac{0,7236 - 0,7304}{21 - 16} = 0,7195$$

Проверяем условие:  $0,7195 < 0,86555 < 0,9219$ .

Условие нормального распределения выполняется.

Проверяем нормальность распределения по критерию 2.



По таблице Лапласа определяем квантили распределения для  $P = 0,98$  (Таблица 4), учитывая, что  $P = 2\Phi(z)$ .  $z \approx 2,3286$

СКО определено ранее:  $S = 0,05744$  мВ.

Число, которое допускает количество отклонений  $(X_i - \langle X \rangle)$  не более двух:

$$Z*S = 2,3286 * 0,05744 = 0,133 \text{ мВ}$$

Не одна разность не превышает величину  $0,133$  мВ. Это значит, что рассмотренный набор измерений отвечает условию нормального распределения по критерию 2, и в целом (с учетом критерия 1) является нормальным.

Значения нормированной функции Лапласа:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^z e^{-\frac{y^2}{2}} dy; P = 2\Phi(z)$$

Таблица 4

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0,0	0,00000	0,9	0,31594	1,8	0,46407	2,7	0,49653	3,6	0,49984
0,1	0,03983	1,0	0,34134	1,9	0,47128	2,8	0,49744	3,7	0,49989
0,2	0,07926	1,1	0,36433	2,0	0,47725	2,9	0,49813	3,8	0,49993
0,3	0,11791	1,2	0,38493	2,1	0,48214	3,0	0,49865	3,9	0,49995
0,4	0,15542	1,3	0,40320	2,2	0,48610	3,1	0,49903	4,0	0,49997
0,5	0,19146	1,4	0,41924	2,3	0,48928	3,2	0,49931	4,5	0,49999
0,6	0,22575	1,5	0,43319	2,4	0,49180	3,3	0,49952		
0,7	0,25804	1,6	0,44520	2,5	0,49379	3,4	0,49966		
0,8	0,28814	1,7	0,45543	2,6	0,49534	3,5	0,49977		

Задание.

Используя выше описанные составные критерии 1 и 2; проверьте, отвечает ли статусу нормального распределения сгенерированная Вами серия измерений задания 2. Доверительную вероятность использовать ту же, что была в Вашем варианте в предыдущем задании.

## Практическое занятие 4

### Оценка погрешностей однократных измерений

Теоретические сведения.

При многократных измерениях осуществляют статистическую обработку результатов измерений. В случае однократных измерений она не нужна, но при этом делают априорную оценку ожидаемой погрешности.

Для этого:

1. Проводят анализ компонент результирующей погрешности: методической, инструментальной, внешней и субъективной.

*Методические погрешности* оцениваются на основании изучения теоретических зависимостей, описывающих исследуемый объект и метод измерений, либо экспериментальным путем при измерении одной и той же величины разными методами.

*Инструментальные погрешности* оцениваются по данным основных и дополнительных погрешностей средства измерения.

*Основные* – обусловлены не идеальностью средств измерений.

*Дополнительные* - погрешности внешнего воздействия, влияющие на работу измерительного прибора воздействием температуры, давления, электрического и магнитного полей и пр.

*Субъективные погрешности* обусловлены деятельностью оператора измерений, определяются, как правило, экспериментальным путем.

Оценка систематических погрешностей дается их границами (пределами), а случайных – значениями СКО.

2. Делаем исключение систематических погрешностей одним из способов:

- замещения (измеряемый объект заменяется образцовой мерой;
- компенсации по знаку (когда известна природа погрешности, вводят погрешность противоположного знака);
- симметричных наблюдений (измерения проводят через одинаковые интервалы аргумента, а погрешность находят как среднее любой пары симметричных измерений);
- рандомизации, т.е. перевода погрешности в случайные.

Не исключенные систематические погрешности (НСП) суммируются для определения  $\Delta_c$  с помощью следующих формул:

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{c_i}^2}$$

$$\Delta_{cx_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta_{c_i}$$

$k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью. При  $P = 0,95$   $k = 1,1$ ; а при  $P = 0,99$   $k = 1,4$ ;

$\Delta_{c_i}$  – предел (граница) не исключенной систематической погрешности;

$m$  – число суммируемых погрешностей;

При прямых измерениях и равномерном распределении не исключенных систематических погрешностей оценка  $\Delta_c$  производится по первой формуле.

Вторая формула определяет не исключенные систематические погрешности косвенных измерений.  $x_i$  -  $i$ -ый компонент-параметр косвенного измерения.

3. Задаемся или используем экспериментальные данные для оценки СКО однократного результата измерения в предположении, что все выявленные случайные погрешности независимы. Если зависимы, то следует учитывать еще коэффициенты корреляции.

4. С помощью коэффициента Стьюдента находятся доверительные границы случайной погрешности  $\Delta_{сл}$ . Для однократных измерений приняты следующие значения  $t$ : при  $P = 0,95$   $t = 2$ ; при  $P = 0,99$   $t = 2,6$ .

5. Производится оценка доверительных границ ожидаемой погрешности измерения. Доверительные границы погрешности результата измерения определяются компонентами случайной и систематической погрешностей. При этом, если число не исключенных систематических погрешностей  $m < 4$ , то коэффициент  $k$  для НСП может выбираться по графику рисунка 1.

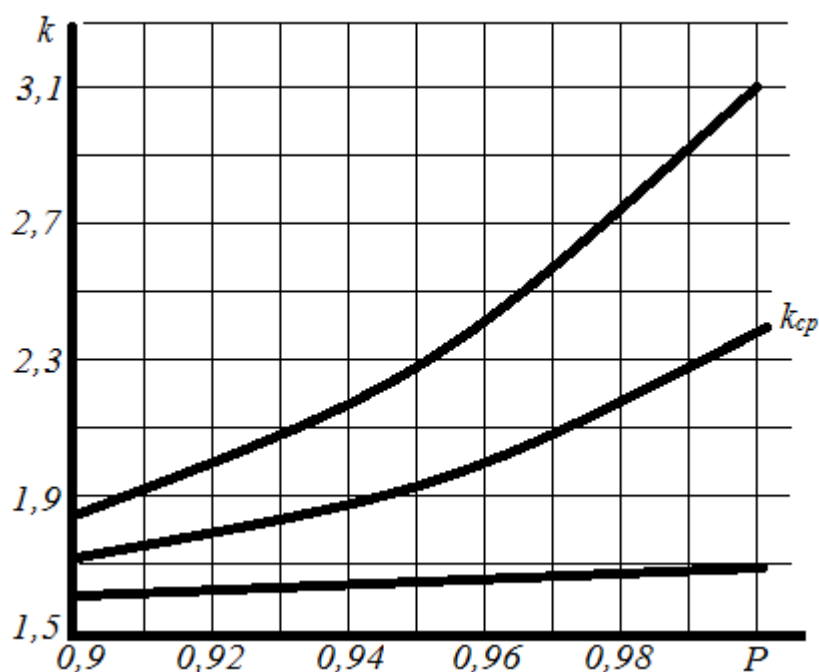


Рисунок 1. Зависимость коэффициента  $k$  НСП от вероятности  $P$

При этом возможно исключить из рассмотрения одну из компонент. Если:  $\Delta_{сист.неиск}/\sigma < 0,8$  то пренебрегают систематическими не исключенными погрешностями и общая погрешность измерения определяется погрешностью  $\Delta_{сл}$ .  $\sigma$  – принятое (определенное) СКО.

В случае, когда:  $\Delta_{сист.неиск}/\sigma > 8$  то пренебрегают случайной погрешностью  $\Delta_{сл}$  и общая погрешность определяется составляющей  $\Delta_{сист}$ . При выполнении указанных неравенств, погрешность, возникающая из-за пренебрежения одной из составляющих результата измерения, не превышает 15%.

Пример.

Оценить погрешность прямого однократного измерения напряжения  $U = 0,9 \text{ В}$  на сопротивлении  $R = 4 \text{ Ом}$ , выполненного вольтметром класса точности  $k = 0,5$  с верхним пределом измерения  $U_n = 1,5 \text{ В}$  и имеющим сопротивление  $R_V = 1000 \text{ Ом}$ . Известно, что дополнительные погрешности показаний средств измерений из-за влияния магнитного поля и температуры не превышают соответственно  $\delta_m = \pm 0,75 \%$  и  $\delta_T = 0,3 \%$  допускаемой предельной погрешности.

1. Найдем максимально возможную относительную погрешность прибора.

$$\varepsilon = \Delta U / U = k * U_n / U = 0,5 * 1,5 / 0,9 = 0,83 \%$$

2. Подключение вольтметра изменит исходное напряжение на резисторе, поскольку вольтметр имеет внутреннее сопротивление  $R_V$ . Пусть исходное напряжение на резисторе -  $U_x$ . Определим напряжение на резисторе  $U_V$  после подключения вольтметра. Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = I_R + I_V; \text{ откуда:}$$

$$\varepsilon = 1,1 \sqrt{0,83^2 + 0,75^2 + 0,3^2} = \pm 1,3\%; \quad U_V = \frac{R_V}{R + R_V} U_x;$$

3. Знание  $U_V$  и  $U_x$  позволяет определить относительную методическую погрешность:

$$\varepsilon_m = \frac{U_V - U_x}{U_x} = \frac{-R}{R + R_V} * 100\% = -\frac{4 * 100\%}{1004} = -0,4\%$$

Если проценты перевести в вольты, получим величину методической погрешности:

$$\Delta_m = \frac{-0,4 * 0,9}{100} = -0,004(\text{В})$$

Знак ( - ) означает, что подключение вольтметра уменьшает напряжение на резисторе. Поэтому результат измерения:  $U_x = 0,900 + 0,004 = 0,904 \text{ (В)}$ . Так как основная и дополнительная погрешности заданы своими граничными значениями, они могут рассматриваться как не исключенные систематические погрешности. При оценке НСП их рассматривают как случайные величины, распределенные по равномерному закону, где коэффициент  $k$  выбирается из следующего ряда:

$P$	0,9	0,95	0,98	0,99
$k$	0,95	1,1	1,3	1,4

Поскольку основная и дополнительная погрешности заданы своими граничными значениями, то они могут рассматриваться как не исключенные погрешности и соответственно суммироваться. Определим результат для  $P = 0,95$ .

$$\varepsilon = 1,1\sqrt{0,83^2 + 0,75^2 + 0,3^2} = \pm 1,3\%$$

Если перевести в абсолютные значения:  $\Delta U = \varepsilon * U = 0,013 * 0,9 = \pm 0,012 \text{ В}$ .

$$U = 0,9 \pm 0,01 \text{ В}; P = 0,95.$$

Задание.

Таблица вариантов задания

	$k$	$R_A, \text{ Ом}$	$R_{Ш}, \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$	$I_n, \text{ мА}$	$\delta_m, \%$	$\delta_T, \%$
1	0,02	0,01	10	50,0	100	1,00	0,11
2	0,05	0,02	11	60,0	100	0,90	0,21
3	0,10	0,03	12	70,0	100	0,80	0,32
4	0,20	0,04	13	80,0	100	0,70	0,42
5	0,50	0,05	14	90,0	100	0,60	0,52
6	1,00	0,06	15	100	100	0,50	0,62
7	2,00	0,07	16	110	150	0,40	0,58
8	4,00	0,08	17	120	150	0,95	0,44
9	0,02	0,09	18	130	150	0,85	0,35
10	0,05	0,10	19	140	150	0,75	0,28
11	0,10	0,11	18	150	150	0,65	0,83
12	0,20	0,12	17	160	200	0,55	0,67
13	0,50	0,13	16	170	200	0,45	0,62
14	1,00	0,14	15	180	200	0,50	0,73
15	2,00	0,15	14	190	200	0,40	0,20
16	4,00	0,16	13	200	200	0,95	0,31
17	0,02	0,17	12	40,0	50	0,85	0,45
18	0,05	0,18	10	30,0	50	0,75	0,64
19	0,10	0,19	11	20,0	50	0,65	0,39
20	0,20	0,20	12	10,0	50	0,55	0,27
21	0,50	0,21	13	50,0	50	0,45	0,40
22	1,00	0,22	14	60,0	100	0,35	0,22
23	2,00	0,23	15	70,0	100	0,30	0,16
24	4,00	0,24	16	80,0	100	0,75	0,22

Определить абсолютную и относительную погрешности амперметра класса точности  $k$ , с внутренним сопротивлением -  $R_A$ . С целью расширения пределов измерений прибор шунтирован прецизионным резистором  $R_{Ш}$ . Показания амперметра  $I$ ; максимальный верхний предел измерений амперметра  $I_n$ . Дополнительные погрешности показаний средств измерений из-за влияния магнитного поля и температуры не превышают, соответственно величин  $\delta_m$  и  $\delta_T$ . Доверительную вероятность показаний оценить на уровне  $P = 0,95$ .

## Практическое занятие 5

### Определение математических ожиданий, среднеквадратичных отклонений и погрешностей в электрических схемах

Пример 1. Сопротивление  $R$  составлено из параллельно включенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , математические ожидания и среднеквадратичные отклонения которых известны:  $m_1 = 12 \text{ Ом}$ ;  $m_2 = 15 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_1 = 1 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_2 = 0,5 \text{ Ом}$ . Найдите математическое ожидание  $m_R$  и среднеквадратичную погрешность  $\sigma_R$  сопротивления  $R$ .

Решение:

Математическое ожидание  $m_y$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_y$  величины  $Y$  определяются по формулам:

$$m_y = F(m_{y1}, m_{y2}, \dots, m_{yn})$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial y_i}\right)_m^2 \sigma_{yi}^2}$$

где,  $\left(\frac{\partial F}{\partial y_i}\right)_m$  - частная производная функции  $F(y_1, y_2, \dots, y_n)$  по  $y_i$ , взятая в точке  $(m_{y1}, m_{y2}, \dots, m_{yn})$ .  $i = 1, 2, \dots, n$ .

При параллельном соединении:

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

тогда:

$$m_R = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{12 * 15}{12 + 15} = 6,67 \text{ Ом}$$

Для нахождения  $\sigma_R$  вычислим частные производные:

$$\left(\frac{\partial R}{\partial R_1}\right)_m = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)_m^2 = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2}\right)^2 = 0,31$$

$$\left(\frac{\partial R}{\partial R_2}\right)_m = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)_m^2 = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2}\right)^2 = 0,20$$

Далее получим:

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial R_1}\right)_m^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial R_2}\right)_m^2 \sigma_2^2} = 0,33 \text{ Ом}$$

Математическое ожидание  $m_R = 6,67 \text{ Ом}$ ;

Среднеквадратичная погрешность сопротивления  $\sigma_R = 0,33 \text{ Ом}$ .

Пример 2. Оцените то, что в предыдущем примере 1, вероятность того, что сопротивление  $R$  отличается от своего математического ожидания не более, чем на 1 Ом.

Можно по доверительной вероятности  $P$  определять погрешность измерений, прибора, эксперимента и т.д. Но есть и обратная задача, когда по результатам погрешности оценивают ее вероятность. Если не известен закон распределения погрешностей, то для этого используют неравенство Чебышева. Для случая, когда интервалы погрешности симметричны относительно измеренной величины:

$$P_{\text{дог}} \geq 1 - \sigma^2 / \Delta_1^2 = 1 - \frac{0,33^2}{1^2} = 0,89$$

где:  $\sigma$  – СКО;  $\Delta$  - заданная погрешность.

Задания:

1. Сопротивление  $R$  составлено из параллельно включенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , математические ожидания и СКО которых известны:  $m_1 = 24 \text{ Ом}$ ;  $m_2 = 30 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_1 = 1 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_2 = 0,5 \text{ Ом}$ . Определить математическое ожидание  $m_R$  и среднюю погрешность  $\sigma_R$  сопротивления  $R$ . Оцените доверительную вероятность исследования. Ответ:  $6,67 \text{ Ом}$ ;  $0,33 \text{ Ом}$ .

2. Решите предыдущую задачу, при условии, что  $R$  составлено из последовательно включенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Оцените доверительную вероятность исследования. Ответ:  $27 \text{ Ом}$ ;  $1,12 \text{ Ом}$ .

3. В результате измерений сопротивлений получены следующие значения:  $R_0 = 200 \text{ Ом}$ ;  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 600 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 500 \text{ Ом}$ . Среднее квадратическое отклонение, которых  $\sigma_1 = 0,3 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_2 = 0,2 \text{ Ом}$ .  $\sigma_3 = 0,6 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_4 = 0,3 \text{ Ом}$ . Определить среднеквадратическое отклонение сопротивления  $R_x$ , если  $R_x = R_0 + R_1 * R_2 / R_3$ . Ответ:  $0,41 \text{ Ом}$ .

4\*. Определить оценки емкостей  $\check{C}_1$  и  $\check{C}_2$  и их дисперсии, если по результатам совокупных измерений получены следующие данные: емкости каждого из них по отдельности, а также при параллельном и последовательном соединении.  $C_1 = 0,2071 \text{ мкФ}$ ;  $C_2 = 0,2056 \text{ мкФ}$ ;  $C_1 * C_2 / (C_1 + C_2) = 0,1035 \text{ мкФ}$ ;  $C_1 + C_2 = 0,4111 \text{ мкФ}$ . Ответ:  $0,20661 \text{ мкФ}$ ;  $0,20512 \text{ мкФ}$ ;  $6,3 * 10^{-4} \text{ мкФ}$ .

## Практическое занятие 6.

### Обработка результатов косвенных измерений

Теоретические сведения.

Косвенные измерения – это измерения, когда искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например, определение значения сопротивления  $R = U/I$  по измеренным значениям напряжения  $U$  и тока  $I$ .

При косвенных измерениях интересующая величина задается как функция других величин:

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_m)$$

Считаем, что значения измерений  $x_1, x_2 \dots x_m$  распределены по нормальному закону, независимы друг от друга (не коррелированы) и являются равноточными.

Наиболее вероятное значение измерения  $y$  определяется как результат косвенного измерения при средних значениях аргументов, которое представляется формулой:

$$y = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle \dots \langle x_m \rangle)$$

Абсолютная погрешность измеряемой величины  $\Delta y$  являются функцией погрешностей прямых измерений, и имеет общий вид:

$$\Delta y = F(\Delta x_1, \Delta x_2 \dots \Delta x_m)$$

Определение абсолютной погрешности косвенных, равноточных, некоррелированных измерений осуществляется выражением:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} * \Delta x_k \right)^2}$$

где,  $\Delta x_k$  - абсолютные погрешности величин  $x_k$ , определенные по ранее рассмотренным правилам для прямых измерений;

$\partial f / \partial x_k$  – частные производные функции по аргументам  $x_k$ , вычисленные при средних значениях  $\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle \dots \langle x_m \rangle$ . Доверительная вероятность  $P$  для всех погрешностей задается одинаковой (например,  $P=0,95$ ). Такой же она будет и для  $\Delta y$ . Относительная погрешность измерения будет иметь вид, который определяется выражением:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_k} * \frac{\Delta x_k}{y} \right)^2}$$

Рассмотрим пример, как оценить погрешность косвенного измерения.

Пример.

Проведено исследование изменения активной мощности в цепи гармонического тока на основе измерений параметров напряжения, тока и угла сдвига



фазы между этими величинами:  $P = UI \cos \varphi$ ; где  $U$  и  $I$  соответственно, действующие напряжение и ток,  $\varphi$  – угол сдвига фазы между ними. В ходе 12 измерений получены данные, которые приведены ниже. Оценить абсолютную и относительную погрешности проведенного измерения для доверительной вероятности  $P_n = 0,95$ . Класс точности всех приборов, использованных в исследовании – 2,5 %. Измерение напряжения проводилось на шкале с максимальным значением 30 В, и «плавающим» оказался третий числовой разряд цифрового прибора после запятой. Шкала тока имела максимальный предел 3 А; «плавающим» для тока так же оказался третий разряд числа шкалы прибора после запятой. Измерение сдвига угла фазы проводилось стрелочным прибором, шкала которого имела 100 делений и максимальное значение 90°. Не исключенная систематическая погрешность измерения устранена аппаратным методом, т. е. ее следует исключить из рассмотрения. Оценить относительную и абсолютную погрешности на основе приведенных данных. Считаем, что полученный массив данных измерений является нормальным распределением.

Результаты измерений параметров для определения мощности

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U, В	10,00	9,83	9,89	9,70	10,23	10,11	10,05	9,81	9,76	10,10	9,85	9,92	10,20
I, А	1,00	1,12	0,97	0,98	0,99	1,10	1,02	1,03	1,25	1,15	1,09	1,10	1,05
$\varphi$ , град	45,0	46,0	44,8	44,9	44,4	44,9	44,8	45,1	45,0	46,0	45,5	45,8	45,0

Решение:

Воспользуемся уравнением для относительной погрешности измерений. Поскольку аргументы функции входят в ее выражение в виде сомножителей, то удобно сначала рассчитать относительную погрешность мощности  $\varepsilon_P = \Delta P/P$ , а затем на ее основе и абсолютную погрешность мощности  $\Delta P$ . Уравнение для относительной погрешности мощности  $P$  будет иметь вид:

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \Delta \varphi\right)^2}$$

Найдем частные производные по величинам  $U$ ,  $I$  и  $\varphi$ . Для того, чтобы пренебречь погрешностью от величины  $\operatorname{tg} \varphi$  ( $\sin \varphi$ ;  $\cos \varphi$ ), ее следует использовать с четырьмя значащими цифрами. Тогда величина этой погрешности будет небольшой в сравнении с другими и ею можно пренебречь.

$$\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial U} = \frac{1}{U}, \quad \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial I} = \frac{1}{I}, \quad \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial \varphi} = -\operatorname{tg} \varphi$$

После подстановки последних выражений в предыдущее уравнение, получим:

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + (\Delta \cos \varphi * (-\operatorname{tg} \varphi))^2}$$

Итак,  $\varepsilon_P$  имеет компоненты погрешностей напряжения  $\varepsilon_U$ , тока  $\varepsilon_I$  и коэффициента угла  $\varepsilon_\varphi$ :

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P} = \sqrt{(\varepsilon_U)^2 + (\varepsilon_I)^2 + (\varepsilon_\varphi)^2}$$

Таким образом, следует определить величины  $U$  и  $\Delta U$ ;  $I$  и  $\Delta I$ ;  $\varphi$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \cos \varphi$  и  $\operatorname{tg} \varphi$ . Средние значения действующих напряжения  $U$ , тока  $I$  и величины  $\cos \varphi$ :

$$U = \langle U \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{12} U_i = 9,96833 \text{ В};$$

$$I = \langle I \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{12} I_i = 1,06083 \text{ А};$$

$$\cos \varphi = \langle \cos \varphi \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{12} \cos \varphi_i = 0,70646;$$

Найденные средние значения позволяют определить истинное значение мощности  $P$ :

$$P = \langle U \rangle \langle I \rangle \langle \cos \varphi \rangle = 7,47066 \text{ Вт}$$

Для  $\operatorname{tg} \varphi$ , значение, соответствующее среднему значению, которое будем учитывать в  $\varepsilon_\varphi$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \langle \operatorname{tg} \varphi \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{12} \operatorname{tg} \varphi_i = 1,00189;$$

Чтобы в расчетах минимизировать ошибку тригонометрических функций, учитываем величины с точностью, более четырех знаков после запятой.

Величины  $\Delta U$ ,  $\Delta I$  и  $\Delta \varphi$  определяем по методике прямых измерений. По условию задачи абсолютные погрешности параметров будут содержать погрешности: случайную, приборную и округления. Погрешность действующего напряжения:

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_{\text{сл}}^2 + \Delta U_{\text{пр}}^2 + \Delta U_{\text{окр}}^2};$$

Составляющие погрешности действующего напряжения:  $\Delta U_{\text{сл}}$ ,  $\Delta U_{\text{пр}}$  и  $\Delta U_{\text{окр}}$ :

$$\Delta U_{\text{сл}} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta U_i^2} = 0,10902 \text{ В};$$

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{t_{n,P}}{3,0} \delta = \frac{t_{n,P}}{3,0} \frac{kU_{\text{max}}}{100\%} = 0,54500 \text{ В};$$

$$\Delta U_{\text{окр}} = P_{\text{н}} * \frac{h_1}{2} = 0,14250 \text{ В}; \quad \Delta U = 0,57377 \text{ В}$$

Погрешность действующего тока:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{\text{сл}}^2 + \Delta I_{\text{пр}}^2 + \Delta I_{\text{окр}}^2};$$

Его составляющие:

$$\Delta I_{\text{сл}} = t_{n,P} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta I_i^2} = 0,05159 \text{ А};$$

$$\Delta I_{\text{пр}} = \frac{t_{n,P}}{3,0} \delta = \frac{t_{n,P}}{3,0} \frac{kI_{\text{max}}}{100\%} = 0,05450 \text{ А};$$

$$\Delta I_{\text{окр}} = P_{\text{н}} * \frac{h_2}{2} = 0,01425 \text{ А}; \quad \Delta I = 0,07638 \text{ А}$$

Погрешность, обусловленная коэффициентом угла:

$$\Delta \cos \varphi = \sqrt{(\Delta \cos \varphi)_{\text{сл}}^2 + (\Delta \cos \varphi)_{\text{пр}}^2 + (\Delta \cos \varphi)_{\text{окр}}^2}$$

$$\Delta \cos \varphi_{\text{сл}} = t_{n,p} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{12} (\langle \cos \varphi \rangle - \cos \varphi_i)_{\text{сл}}^2} = 0,03872;$$

$$\Delta \cos \varphi_{\text{пр}} = \frac{t_{n,P}}{3,0} \delta = \frac{t_{n,P}}{3,0} \frac{k \cos \varphi_{\text{max}}}{100\%} = 0,02852;$$

$$\Delta \varphi_{\text{окр}} = P_{\text{н}} * \frac{h_3}{2} = 0,00746;$$

$$\Delta \cos \varphi = 0,049$$

Находим относительную погрешность мощности  $\varepsilon_P$ :

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta P}{P} = \sqrt{(\varepsilon_U)^2 + (\varepsilon_I)^2 + (\varepsilon_\varphi)^2} = 0,10413;$$

Абсолютная погрешность мощности  $\Delta P$  определяется на основе относительной  $\varepsilon_P$  :

$$\Delta P = \varepsilon_P < P > = 0,10413 \text{ Вт}$$

Результаты измерения для надежности 95% записываем в следующем виде:

$$P = 7,464 \pm 0,104 \text{ Вт}; P_{\text{н}} = 0.95$$

## Контрольная работа 2.

Задание.

В соответствии данных своего варианта, определите истинное значение косвенного измерения, а также его абсолютную и относительную погрешности для рекомендованной надежности  $P_{\text{н}}$ . При этом,  $\delta$  - предельная абсолютная погрешность, указанная в паспортных данных прибора, одна и та же для всех компонент косвенного измерения. Число измерений каждой из компонент так же одинаковое –  $n$ , не менее 15. Согласно  $n$  и пределам изменения компонент косвенного измерения, создайте таблицу численных значений для каждой из них. Старайтесь, чтобы предложенные Вами численные значения компонент, по форме, отвечали требованию нормального распределения вероятностей, т.е. было мало величин с большими отклонениями, и основное большинство – с малыми. При этом сумма отрицательных и положительных отклонений  $\Delta x_i$  должна быть примерно равна нулю.

Величины тригонометрических функций и точность физических и математических постоянных в формулах использовать с разрядностью, позволяющей пренебречь их погрешностями. Например, если в вычислениях используем тригонометрическую функцию, то ее величину учитываем с точностью до четвертого знака после запятой; или число  $\pi$  - учитываем с такой же разрядностью. Помните, что при указании ответа число цифр после запятой, в истинном значении измеренной величины и ее погрешности, должно быть одинаковым.

Таблица данные вариантов для выполнения задания

В-т	Косвенное измерение величины	Физические величины, позволяющие определить результат косвенного измерения			$R_H$	$\delta$	n
1	$U=U_m \sin(\omega t + \varphi)$	9...10В	49,5...50,5 Гц	$\pi/4... \pi/6$ Рад	0,9	0,2	11
2	$U=U_m \cos(\omega t + \varphi)$	7...7,9 В	439...441 Гц	$\pi/5... \pi/6$ Рад	0,95	0,5	12
3	$I=I_m \sin(\omega t + \varphi)$	1... 1,2 А	49...51 Гц	$\pi/6... \pi/7$ Рад	0,99	0,1	13
4	$I=I_m \cos(\omega t + \varphi)$	10...10,5А	399...401 Гц	$\pi/7... \pi/8$ Рад	0,9	0,2	14
5	$T=(C_1+C_2)R$	2...2,2 мкФ	7...7,3 мкФ	1,1...1,2 кОм	0,95	0,5	15
6	$R=\rho l/S$	0,016...0,017 *10 <sup>-6</sup> Ом м	12...13 М	1,1...1,2 мм <sup>2</sup>	0,99	1,0	15
7	$l=RS/\rho$	0,44...0,46 *10 <sup>-6</sup> Ом м	122...123 Ом	1,3...1,4 мм <sup>2</sup>	0,9	2,5	14
8	$\rho = RS/l$	12...13	14...15 М	1,5...1,6 мм <sup>2</sup>	0,95	4,0	13
9	$I=U/(R_1 + R_2)$	9...10 В	20...21 Ом	82...83 Ом	0,99	0,02	12
10	$T=(R_1 + R_2)C$	41...42 мкФ	77...78 кОм	97...98 кОм	0,95	0,05	11
11	$C=\epsilon\epsilon_0 S/d$	1,1...1,3	0,1...0,2 мм	1,1...1,3 см <sup>2</sup>	0,9	0,1	11
12	$f=1/2\pi \sqrt{L(c_1 + c_2)}$	22..23 мкГн	6,7...6,9 нФ	2,2...2,4 нФ	0,95	0,2	12
13	$U=(I_1 + I_2)R$	8,5...9 А	20...21 А	12...13 Ом	0,99	0,5	13
14	$l=RS/\rho$	0,4...0,5*10 <sup>-6</sup> Ом м	22...23 Ом	1,6...1,7 мм <sup>2</sup>	0,9	1,0	14
15	$f=1/2\pi(C_1+C_2)R$	230...280 пФ	530...580 пФ	45...48 Ом	0,95	2,5	15
16	$f=1/2\pi(R_1+R_2)C$	330...380 пФ	10...11 Ом	85...88 Ом	0,99	4,0	16
17	$F=kIR$	1,9...2,0 нВ	10...12 мА	75...79 кОм	0,9	0,02	17
18	$T=L/(R_1+R_2)$	5,6...5,7 Гн	1...1,1 кОм	3...3,3 кОм	0,95	0,05	16
19	$P = U^2/ (R_1+R_2)$	89...90 В	2...2,3 кОм	8...9 кОм	0,99	0,1	15
20	$P=I^2 (R_1+R_2)$	6...6,5 А	3...3,5 кОм	63...65 кОм	0,9	0,2	14
21	$L=\mu\mu_0 l/S$	1000...1100	99...100 м	1...1,3 см <sup>2</sup>	0,95	0,5	12
22	$P=I^2 R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$	76...79 мА	4...4,2 кОм	7...8 кОм	0,99	1,0	11
23	$I=(U_1+U_2)/R$	22...23 В	44...46 В	120...121 Ом	0,9	2,5	12
24	$Z = \omega L - 1/\omega C$	313...314 Рад/С	22...24 мГн	67...68 нФ	0,95	0,2	13
25	$T = R (C_1 + C_2)$	47...48 кОм	1...1,3 мкФ	5,5...6 мкФ	0,99	0,05	14

Расчет допустимо выполнить в среде EXCEL. Для этого задание можно условно разделить на 3 части (3 книги) и проводить расчет для каждого параметра вашей формулы отдельно по алгоритму прямых равноточных измерений. Затем, на последней части Вашего расчета, свести воедино результаты предыдущих частей.

### Практическое занятие 7.

**Разработка математических моделей по результатам измерений на основе метода наименьших квадратов**

Теоретические сведения.

Если в результате измерений получили функциональную зависимость в виде геометрического места точек, связывающих какие-то параметры, то посредством математической обработки результатов измерений можно получить функцию, наиболее точно отражающую распределение результатов измерений. Один из таких методов – метод наименьших квадратов (МНК). Он существует как для линейных, так и не линейных функций и требует не менее 6 измерений. Рассмотрим этот метод для линейных функций. В математике это функция вида:

$$y = ax + b$$

Решение задачи - перевод координат точек в функцию  $y$  связано с определением линейных коэффициентов  $a$  и  $b$ , которые определяется так (1):

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Для проведения исследования удобно составить таблицу

i	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$	$y$	$\Delta$	$\varepsilon$
1							
2							
...							
n							

Для аппроксимации нелинейных функций используют нелинейные уравнения. Одним из таких уравнений является полином второго порядка:  $y = ax^2 + bx + c$ . Рассмотрим, как вычислить коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$ ; если имеем  $n$  измерений  $x$  и  $y$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n$ ).

Пусть сумма квадратов разностей  $i$ -ой функции и реального измерения  $y_i$  есть  $S$  (2):

$$S = \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i + c - y_i)^2$$

Для определения минимумов функций возьмем частные производные по параметрам  $a$ ,  $b$  и  $c$  (3).

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) x_i^2 = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) x_i = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bx_i + c - y_i) = 0$$

После подстановки величин  $x_i$  и  $y_i$  получим три уравнения с тремя неизвестными величинами. Их решение позволит определить  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

*Пример.*

Осциллографическое измерение электрического процесса в течении полупериода позволило получить массив точечных данных напряжения во времени в соответствии таблицы.

Данные осциллограммы точечных измерений с интервалом времени 1 мС.

t, мС	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
U, мВ	20	69	109	104	163	177	180	177	163	138	107	67	17

Получить математическую модель электрического сигнала на основе полинома второго порядка.

Решением задачи будет выражение вида:  $y=at^2+bt+c$ , поскольку аргументом функции в задании является время  $t$ . Найдем величины коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Для этого запишем выражение (2) для решаемой задачи и возьмем от него частные производные по параметрам  $a$ ,  $b$  и  $c$ , подставив данные таблицы.

$$S = \sum_{i=1}^n (at_i^2 + bt_i + c - y_i)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (at_i^2 + bt_i + c - y_i)t_i^2 = 2(6,071a + 6,084b + 6,5c - 668,16) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (at_i^2 + bt_i + c - y_i)t_i = 2(6,084a + 6,5b + 7,8c - 912) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (at_i^2 + bt_i + c - y_i) = 2(6,5a + 7,8b + 13c - 1527) = 0$$

Получили три уравнения с тремя неизвестными:

$$6,071a + 6,084b + 6,5c = 668,16$$

$$6,084a + 6,5b + 7,8c = 912$$

$$6,5a + 7,8b + 13c - 1527 = 0$$

Решив систему, получим:  $a = -451,049$  мВ/с<sup>2</sup>;  $b = 538,951$  мВ/с;

$c = 19,615$  мВ.

Уравнение осциллограммы:  $u = -451,05t^2 + 538,95t + 19,62$  мВ.

Можно найти абсолютные  $\Delta$  и относительные  $\varepsilon$  погрешности аппроксимации. Для этого получим массив значений  $u_i$  для моментов времени таблицы. Разница между экспериментальным значением и теоретическим - даст величину  $\Delta$ ; ее соотношение с  $U_i$  – величину относительной погрешности  $\varepsilon$ . По худшему результату будем считать погрешность аппроксимации.

### Задание

В соответствии своего варианта, найдите математическую модель (модели) ВАХ. Для этого:

- оцените ВАХ Вашего варианта на наличие линейных и нелинейных участков и постройте характеристику отдельно;
- для каждого из участков составьте таблицу зависимости  $I = f(U)$ . Укажите не менее 6 точек для каждого участка графика;
- если у Вас только линейные участки ВАХ, то используете обработку результатов измерений для линейных функций. Если ВАХ содержит линейные и нелинейные участки – используете обе методики. Если же график ВАХ нелинейная функция, пользуемся только обработкой для нелинейных функций.
- результаты аппроксимации исследования записываем в виде функциональной зависимости для каждого из участков характеристики;
- определяем абсолютную  $\Delta$  и относительную  $\varepsilon$  погрешности аппроксимации. По худшему варианту погрешности определяем погрешность моделирования.

### *ВАХ диодов и выходные характеристики транзисторов*

$I_{пр}$  – прямой ток диода;  $U_{пр}$  – прямое напряжение диода;

$I_{обр}$  – обратный ток диода;  $U_{обр}$  – обратное напряжение диода.

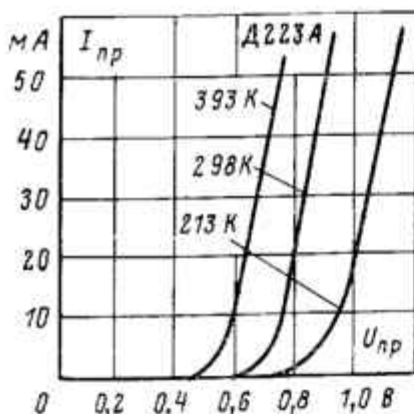


Рис. 1.0

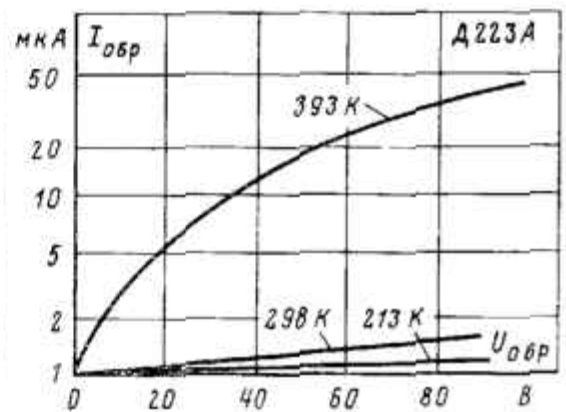


Рис. 1.1



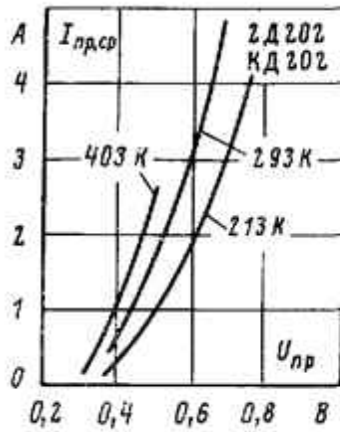


Рис. 2.0

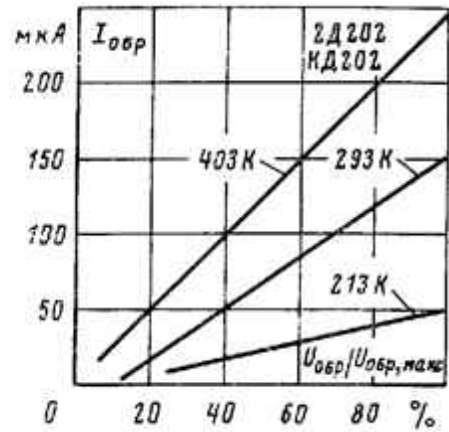


Рис. 2.1

$I_C$  – коллекторный ток транзистора;  $U_{CE}$  – напряжение эмиттер-коллектор транзистора;  $I_B$  – ток базы транзистора

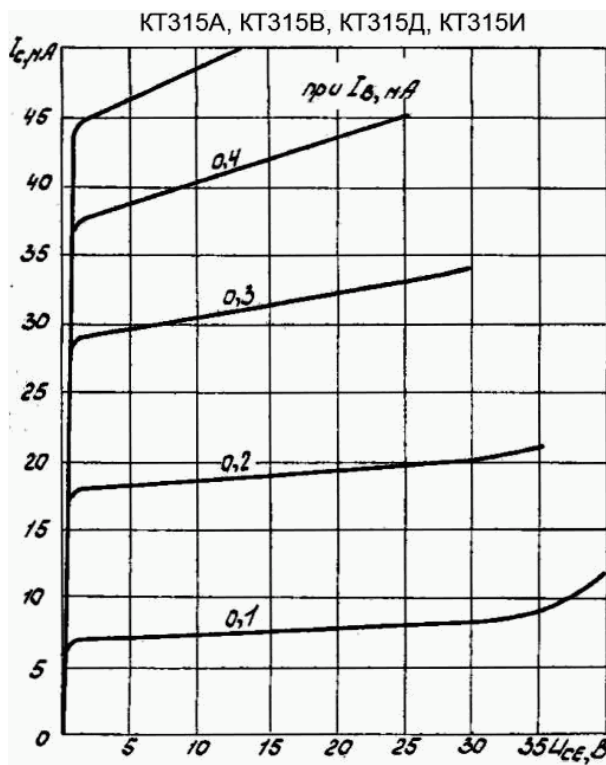


Рис. 3.0

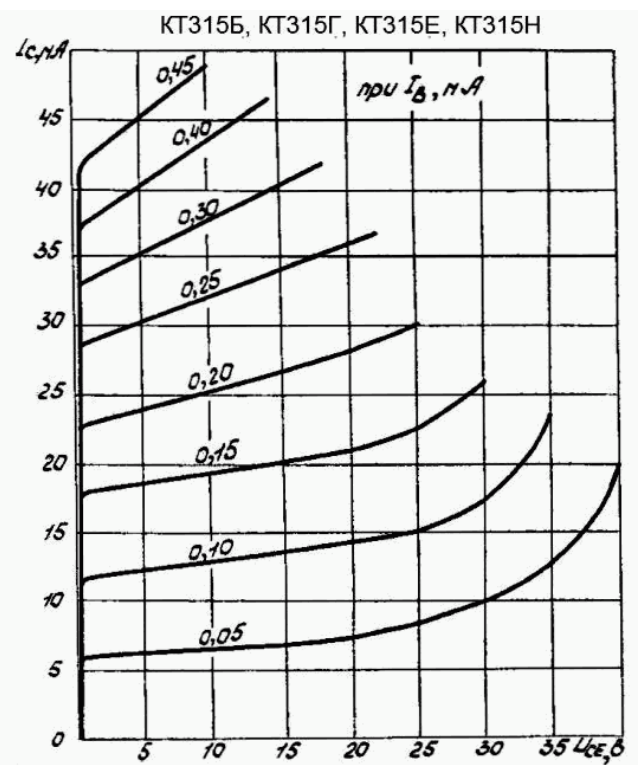


Рис. 3.1

Варианты заданий.

1. Рис. 1.0; 393 К.
2. Рис. 1.1; 393 К.
3. Рис. 3.0;  $I_B = 0,1$  мА.
4. Рис. 3.0;  $I_B = 0,2$  мА.
5. Рис. 3.0;  $I_B = 0,3$  мА.

6. Рис. 3.0;  $I_B = 0,4$  мА.  
 7. Рис. 2.0; 293 К.  
 8. Рис. 2.0; 213 К.  
 9. Рис. 2.1; 403 К;  $U_{обр.маx} = 400$  В.  
 10. Рис. 1.0; 298 К.  
 11. Рис. 2.1; 293 К;  $U_{обр.маx} = 400$  В.  
 12. Рис. 3.1;  $I_B = 0,05$  мА.  
 13. Рис. 3.1;  $I_B = 0,1$  мА.  
 14. Рис. 3.1;  $I_B = 0,15$  мА.  
 15. Рис. 3.1;  $I_B = 0,2$  мА.  
 16. Рис. 3.1;  $I_B = 0,25$  мА.  
 17. Рис. 3.1;  $I_B = 0,30$  мА.  
 18. Рис. 3.1;  $I_B = 0,40$  мА.  
 19. Рис. 3.1;  $I_B = 0,45$  мА.  
 20. Рис. 1.0; 213 К.  
 21. Рис. 2.1; 213 К;  $U_{обр.маx} = 400$  В.  
 22. Рис. 2.0; 403 К; 23. Рис. 3.0;  $I_B = 0,3$  мА. 24. Рис. 3.1;  $I_B = 0,1$  мА.

## Практическое занятие 8

### Контрольная работа 3

#### Задание

1. Измерение сопротивлений показало следующие результаты:  $R_0 = 300$  Ом;  $R_1 = 200$  Ом;  $R_2 = 650$  Ом;  $R_3 = 700$  Ом. Среднее квадратическое отклонение, которых  $\sigma_1 = 0,3$  Ом;  $\sigma_2 = 0,2$  Ом.  $\sigma_3 = 0,6$  Ом;  $\sigma_4 = 0,3$  Ом. Определить среднеквадратическое отклонение сопротивления  $R_x$ , если:

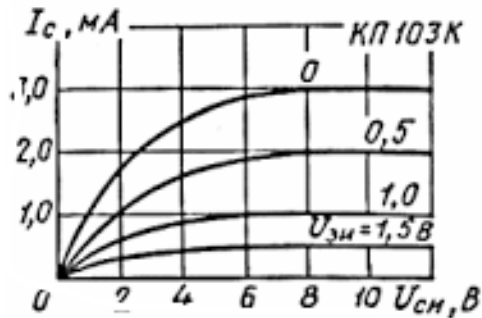
$$R_x = R_0 + R_3 + R_1 * R_2 / R_3.$$

	$R_0,$	$\sigma_0$	$R_1$	$\sigma_1$	$R_2$	$\sigma_2$	$R_3$	$\sigma_3$	$R_4,$	$\sigma_4$	$R_x$
В-Г	Ом										Уравнение схемы
1	100	0,1	500	0,1	600	0,3	300	0,2	500	0,1	$R_x = R_0 + R_3 + R_1 / R_2 R_3$
2	200	0,1	600	0,1	700	0,3	400	0,2	400	0,1	$R_x = R_1 + R_3 + R_0 / R_2 R_3$
3	300	0,2	500	0,1	800	0,4	500	0,2	300	0,2	$R_x = R_2 + R_3 + R_1 / R_0 R_3$
4	400	0,2	400	0,1	900	0,4	600	0,3	200	0,2	$R_x = R_0 * R_3 + R_1 / R_2 R_3$
5	500	0,3	300	0,2	500	0,5	500	0,3	100	0,3	$R_x = R_0 * R_1 + R_1 / R_2 R_3$
6	600	0,3	200	0,2	700	0,5	600	0,3	90	0,1	$R_x = R_0 * R_3 + R_1 / R_2 R_3$
7	500	0,4	100	0,2	500	0,6	700	0,4	80	0,1	$R_x = R_0 * R_3 + R_0 / R_2 R_3$
8	400	0,4	200	0,3	400	0,6	800	0,4	70	0,2	$R_x = R_0 * R_3 + R_1 R_2 / R_3$
9	300	0,5	300	0,3	100	0,1	900	0,5	400	0,2	$R_x = R_0 + R_3 + R_1 / (R_2 + R_3)$
10	200	0,5	400	0,3	200	0,1	500	0,5	600	0,3	$R_x = R_0 + R_3 + (R_1 + R_2) / R_3$

2. Получить математическое выражение одной из выходных характеристик полевого транзистора. Для исследования выбрать не менее 6 точек графика Вашего варианта. Определить абсолютную и относительную погрешности аппроксимации для всех выбранных точек графика. По худшему результату оцените точность исследования в целом.

$I_c$  – ток стока;  $U_{си}$  – напряжение между истоком и стоком;  $U_{зи}$  – напряжение, прикладываемое между истоком и затвором.

Если в Вашем варианте (3; 5; 8) не приведен график ВАХ, на основе известных кривых самостоятельно аппроксимируйте возможный график.



В-г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{зи}, В$	1,5	1,0	0,75	0,5	0,25	0	1,0	0,25	0,5	1,0

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### 2.2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКЕ»

Лабораторная работа 1. Прямые и косвенные измерения в цепях постоянного тока (2 часа) .....	77
Лабораторная работа 2. Измерение токов и напряжений в R, L, C цепях. (2 часа) .....	81
Лабораторная работа 3. Автоматизация измерений характеристик и параметров диодов, резисторов, электрона на основе компьютерной техники (2 часа) .....	91
Лабораторная работа 4. Измерение индуктивности L соленоида на основе резонансного метода (2 часа) .....	94
Лабораторная работа 5. Измерение емкости конденсатора C на основе переходных процессов в электрической цепи (4 часа) .....	101
Лабораторная работа 6. Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов (4 часа) .....	110
Лабораторная работа 7. Обработка результатов прямых равнооточных измерений с многократными наблюдениями посредством EXCEL (2 часа) .....	120
Лабораторная работа 8. Оценка распределения измерений на принадлежность к нормальному распределению величин посредством EXCEL (4 часа) .....	130
Лабораторная работа 9. Исследование параметров и характеристик четырехполюсника посредством измерителя АК ИП 4115/1А (4 часа) .....	143
Лабораторная работа 10. Метод сравнения с эталоном в измерении электроемкости конденсатора (2 часа) .....	148

## Лабораторная работа 1

### Прямые и косвенные измерения в цепях постоянного тока

*Цель работы:* проведение прямых и косвенных измерений в цепях постоянного тока.

*Приборы и оборудование:* источник напряжений, измеритель сопротивлений, напряжений и токов; резисторы разного номинала сопротивлений  $R$ .

### Теоретические сведения

По способу получения измерений, они разделяются на *прямые* и *косвенные*. *Прямым измерением* называется такое, в котором значение измеряемой величины находится непосредственно по шкале прибора. В *косвенных измерениях* значение измеряемой величины определяется на основе, например, математической формулы, когда измеряются величины нескольких прямых измерений и далее они позволяют косвенно определить еще одну величину. Проведем некоторые из таких измерений в цепях постоянного тока.

Цепь постоянного тока – это соединения из электро-, радио- элементов по законам электричества, когда в схеме токи и напряжения неизменны с течением времени. Сопротивление  $R$  – величина, характеризующая свойства проводника (полупроводника, жидкости, газа ...) препятствовать прохождению электрического тока. Если основная функция конденсатора с емкостью  $C$  – накапливать энергию электрического поля, а для соленоида с индуктивностью  $L$  – энергию магнитного поля, то при прохождении тока по элементу с сопротивлением  $R$  в нем выделяется тепло и при этом изменяется величина проходящего по нему тока. Элементы, регулирующие токи и напряжения в цепи - резисторы. Их основной параметр – сопротивление  $R$ . Способы их соединения - рисунок 1.

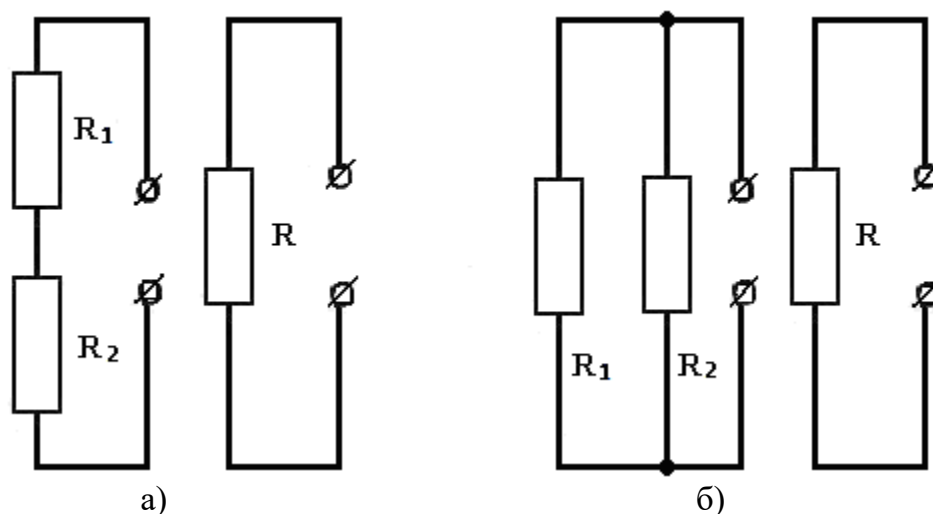


Рисунок 1. а) – последовательное; б) - параллельное включение резисторов и их эквивалентные сопротивления  $R$

Напомним, расчет эквивалентных сопротивлений  $R$  при последовательном (Рисунок 1 а) и параллельном (Рисунок 1 б) включении резисторов, соответственно, выражения (1) и (2):

$$R = R_1 + R_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

Сопротивление проводника, в виде металлического провода (3):

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad (3)$$

$R$  характеризует материал провода препятствовать прохождению электрического тока ( $\rho$ ) и его геометрические размеры ( $\ell$  - длина провода;  $S$  - площадь поперечного сечения). Кроме того,  $R$  не зависит от тока, проходящего по проводу, ни от прикладываемого к нему напряжения. Однако, косвенно, ток влияет на величину провода  $R$  - через температуру. Сопротивление резисторов  $R$  так же независимо от  $I_R$  и  $U_R$ , но может определяться на основе закона Ома.

Источник питания (выделен пунктиром на рисунке 2 а, б) имеются в телефоне, калькуляторе, фонарике и т.д. Последние, как потребители энергии, моделируются резистором. Не вникая в физику получения напряжения на основе химической реакции в батарейке (аккумуляторе), будем считать, что имеется источник ЭДС с напряжением  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , который подключаем к нагрузке сопротивлением  $R$  (Рисунок 2 а, б).

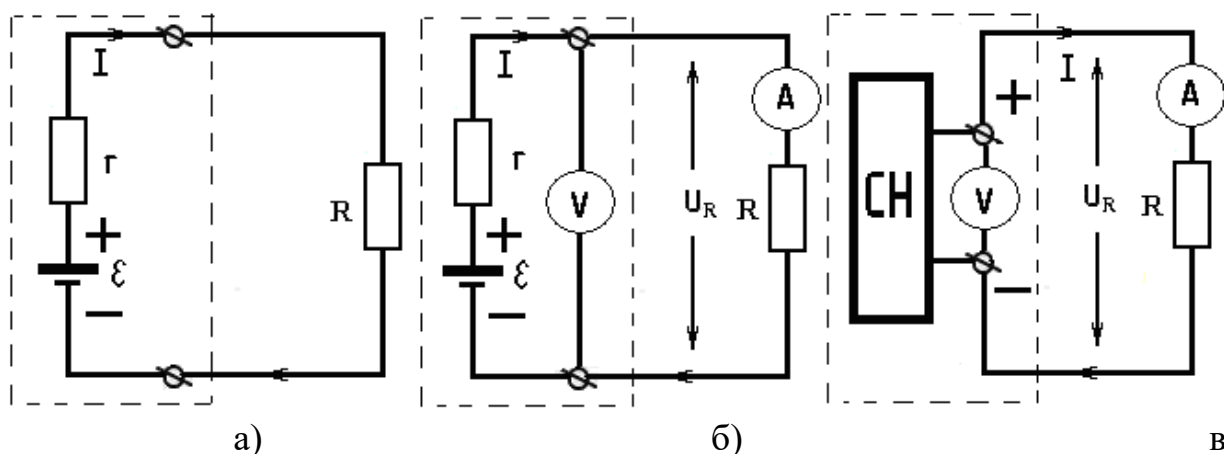


Рис. 2. а) - подключение нагрузки к источнику ЭДС; б) – схема для исследования нагрузки и источника ЭДС; в) – использование стабилизатора напряжения (СН) для питания нагрузки сопротивлением  $R$

Для любой электрической цепи выполняется баланс токов, напряжений и мощностей. Цепь рисунка 2 а – неразветвленная; рисунок 2 б, в – условно неразветвленные, так как у идеального вольтметра  $R_v \approx \infty$ , и считаем, что ток че-

рез вольтметр не идет. Для всех схем рисунка 2:  $I=I_r=I_R$  В них не приходится наблюдать баланса токов за счет отсутствия разветвления цепи, но баланс напряжений и мощностей - выполним и отражен в (4),(6),(7),(9).

В соответствии закона Ома, баланс напряжений для рисунка 2 а (4):

$$\varepsilon = U_r + U_R = Ir + IR \quad (4)$$

$$\text{где, } U_r = Ir; \quad U_R = IR; \quad (5)$$

Умножим (4) на  $I$ , получим уравнения баланса мощностей (6):

$$\varepsilon I = I^2 r + I^2 R \quad (6)$$

$\varepsilon I = P_\varepsilon$  мощность, отдаваемая источником ЭДС, с напряжением  $\varepsilon$ ;

$I^2 r = P_r$  - выделяющаяся, на его внутреннем сопротивлении  $r$ ;

$I^2 R = P_R$  - на нагрузке с сопротивлением  $R$ .

Итак, баланс мощностей (7):

$$P_\varepsilon = P_r + P_R \quad (7)$$

Мощность на нагрузке  $R$  может выражаться и через  $U_R$ , и произведение тока на напряжение (8):

$$P_R = I_R U_R = \frac{U_R^2}{R} = I_R^2 R \quad (8)$$

С учетом последнего, и того, что:  $I = I_r = I_R$ , уравнение (7) может иметь вид (9).

$$\varepsilon I = \frac{U_r^2}{r} + \frac{U_R^2}{R} = I_r U_r + I_R U_R = P_r + P_R \quad (9)$$

Источниками постоянного напряжения являются батарейки и аккумуляторы. Их основные параметры  $\varepsilon$  (В) и  $r$  (Ом). Чем меньше внутреннее сопротивление  $r$  источника ЭДС, тем больший КПД он имеет. У автомобильных и гаджетовых аккумуляторах  $r$  может составлять доли Ом; у батареек - от долей Ом до единиц кОм (у высоковольтных источников напряжений). Постоянные напряжения реализуют зарядные устройства - стабилизаторы напряжения (СН) (рисунок 2 в). В разном схемном исполнении они используются в схемах компьютеров, калькуляторов, плееров и т.д. Зарядные устройства преобразуют напряжение сети ( $\approx 220$  В, 50 Гц) в постоянные напряжения. Схема питания нагрузки  $R$  от СН приведена на рисунке 2 в. Она может заменяться на рисунке 2 а. Это имеет место в ноутбуке: после отключения от сети, ноутбук переходит в автономный режим питания.

## Порядок выполнения работы

*Задание 1. Измерение сопротивлений простейших электрических цепей.*

1.1 С помощью В7-35 (или другого прибора), с максимальной точностью, измерьте сопротивления  $R_1-R_8$ . Прибор установите в режим измерения сопротивлений и к его клеммам последовательно подключайте с помощью проводов резисторы  $R_1-R_8$ . Данные измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1. Измерение значений сопротивлений резисторов  $R_1-R_8$

$R_N$	$R_{B7-35}$ , кОм	$U_R$ , В	$I_N$ , мА	$R_{OM}$ , кОм	$\Delta R$ , кОм	$\delta_R$ , %	$\langle \delta_R \rangle$ , %
$R_1$		по заданию преподавателя					
$R_2$							
$R_3$							
$R_4$							
$R_5$							
$R_6$							
$R_7$							
$R_8$							

1.2 Измерим сопротивления  $R_1-R_8$ , на основе закона Ома. Резисторы  $R_1-R_8$  подключаем по схеме рисунка 2 в с помощью соединительных проводов к клеммам «+» и «-» Б 5-43А. Данные исследований заносим в таблицу 1.

$U_R$  – напряжение на клеммах прибора и резистора (резисторов) нагрузки, которое задает преподаватель ( $1-10 В$ ) для каждой подгруппы студентов.

Правый вращающейся регулятор выведите в крайнее (по часовой стрелке) положение.

Он задает максимальный ток защиты прибора от перегрузок. Если этот регулятор оставить в промежуточном состоянии, то в ходе исследований возможно отключение выходного напряжения прибора (зажгется правая контрольная лампа Б5-43А). Чтобы защита прибора не мешала исследованиям, установим максимальный ток, который допустим для прибора и при котором возможна его нормальная работоспособность.

Левый регулятор устанавливает  $U_R$  (см. табл. 1). Шкала Б5-43А может показывать ток и напряжение нагрузки. Переключатель шкалы в верхнем положении показывает напряжение В; в нижнем – ток мА. Если точность измерения тока Б5-43А недостаточна для исследований, то его измерение проводим (по указанию преподавателя) другим прибором.

Абсолютная погрешность измерений:  $\Delta R = |R_{B7-35} - R_{OM}|$ .

Относительная погрешность  $\delta_R$ , это отношение  $\Delta R$  к истинному значению  $R$ . Поскольку  $R_{OM}$  можем определить более точно, чем  $R_{B7-35}$  (количество знаков после запятой), то эту величину будем считать истинной.  $\delta_R = \Delta R / R_{OM}$ .

$\langle \delta_R \rangle$  - среднее значение относительной погрешности серии измерений.



*Задание 2. Оценка законов параллельного и последовательного включения резисторов.*

В соответствии таблицы 2, прибором В7-35 проведите измерение последовательного и параллельного включения резисторов. Для определения  $R_{расч}$  используйте данные  $R_{В7-35}$  (таблицы 1), и (1) и (2).

Таблица 2. Последовательное и параллельное включение резисторов.

$R_N + R_{N+1}$ ,	$R_{В-454}$ , Ом	$R_{расч}$ , Ом	$\Delta R$ , Ом	$\delta R$ , %	$R_N \parallel R_{N+1}$	$R_{В-454}$ , Ом	$R_{расч}$ , Ом	$\Delta R_{\parallel}$ , Ом	$\delta R_{\parallel}$ , %
$R_1 + R_2$					$R_1 \parallel R_2$				
$R_2 + R_3$					$R_2 \parallel R_3$				
$R_3 + R_4$					$R_3 \parallel R_4$				
$R_4 + R_5$					$R_4 \parallel R_5$				
$R_5 + R_6$					$R_5 \parallel R_6$				
$R_6 + R_7$					$R_6 \parallel R_7$				
$R_7 + R_8$					$R_7 \parallel R_8$				

Оцените абсолютную и относительную погрешности номиналов резисторов для параллельного и последовательного включений, учитывая, что показания вольтметра являются более точными, чем расчетные.

*Задание 3.* Используя данные Таблицы 1, предложите методику косвенного измерения величины ЭДС источника тока  $\mathcal{E}$  и его внутреннего сопротивления  $r$ .

### Контрольные вопросы

1. Основные параметры и типы современных источников ЭДС.
2. Какие классы точности существуют для измерителей тока, напряжения и мощности.
3. Какие классы точности номиналов резисторов существуют в промышленном производстве?
4. Чем обусловлены различные показания номиналов резисторов при измерении различными методами и приборами?
5. Какой смысл имеет понятие стабилизатор напряжения? В чем сущность стабилизации напряжения? Какими метрологическими параметрами характеризуется этот прибор?

### Лабораторная работа 2

#### Измерение гармонических токов и напряжений в R, L, C цепях

*Цель работы:* теоретически и экспериментально изучить основные свойства электрических цепей, в которых действуют гармонические токи.

*Приборы и оборудование:* генератор гармонических сигналов, осциллограф, набор конденсаторов, катушек индуктивностей и резисторов.

## Теоретические сведения

Для понимания работы гармонических (синусоидальных, косинусоидальных) цепей, надо знать особенности работы R, L, C элементов. Вспомним некоторые сведения о гармонических токах и напряжениях. Их уравнения для мгновенных значений одной частоты, это (1) и (2). Мгновенные значения величин, обозначают маленькими буквами, а амплитудные – большими, с индексом  $m$  (max). Напряжение (ток) может быть функцией времени или угла (рисунок 1). В рассматриваемых цепях токи и напряжения одной частоты (линейные цепи).

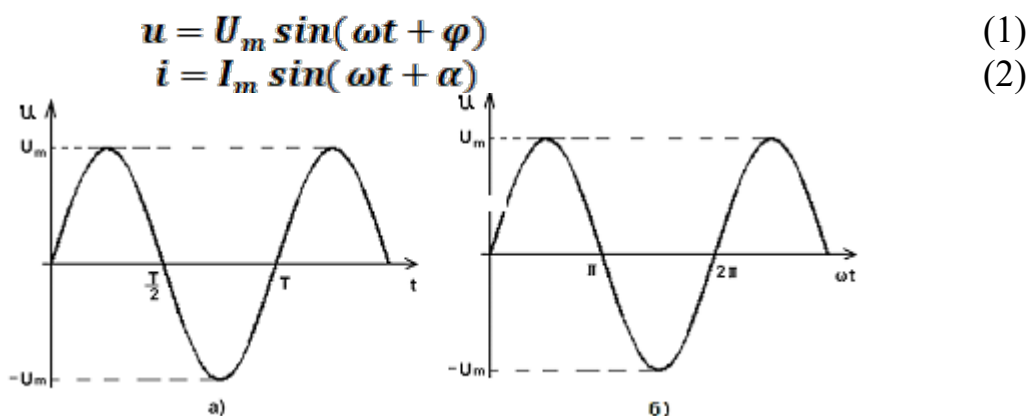


Рисунок 1. а) - напряжение как функция времени; б) – как функция угла.

$U_m, I_m$  – соответственно, амплитудные значения напряжения (1) и тока (2); максимальное отклонение этих величин от нулевого значения;

$(\omega t + \varphi), (\omega t + \alpha)$  – фазы, соответственно, напряжения и тока в момент времени  $t$ ;  $\omega$  – циклическая частота напряжения (1) и тока (2):  $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ ;

$\varphi, \alpha$  – соответственно, начальная фаза колебания напряжения (1) и тока (2); угол, с которого начинается колебательный процесс. На Рис. 1  $\varphi = 0$ .

## Векторная диаграмма

Пусть математический маятник при  $t=0$  отклонен на угол  $\varphi_0$ . Этот процесс можно рассматривать через косинус. Но приходится рассматривать колебания, где начало колебаний совпадает с началом отсчета времени. Здесь удобно пользоваться синусом. Колебания можно рассматривать как через синус, так и через косинус, поскольку (3):

$$\sin(90^\circ - \alpha) = +\cos \alpha \quad (3)$$

$$\text{Гармоническое колебание имеет вид (4):} \quad x = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (4)$$

Величину  $x$  определяют:  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi_0$  и  $t$ . Вспомним, что вращение описывается таким же уравнением. Это сходство позволило любой гармонический процесс представлять в виде аналога, вращающегося вектора, у которого во вращении те же параметры:  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi_0$ ,  $t$ . Подмена колебания вращающимся вектором – моделирование. Если возьмем ось  $x$ , выберем на ней точку  $O$  и вокруг нее начнем вращать вектор с амплитудой величины  $A$ , то этот процесс также будет гармоническим колебанием, что иллюстрируется рисунком 2. Это описывается тем же уравнением (4), где:

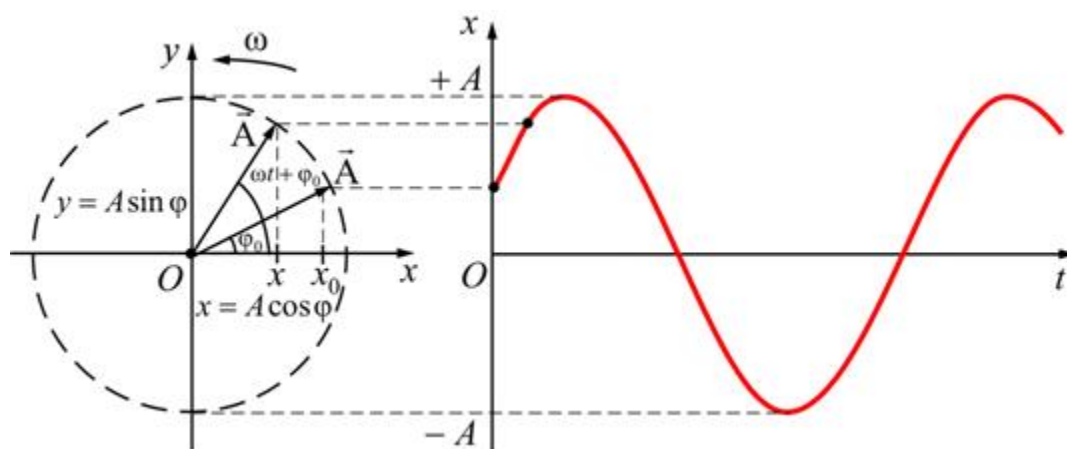


Рисунок 2. Моделирование процесса колебания на основе вращающегося вектора.

$A$  – амплитуда колебания, она же величина вращающегося вектора;

$\omega$  – угловая скорость вращения вектора, она же угловая частота моделируемого колебания;

$\varphi_0$  – начальная фаза колебания, она же положение моделирующего вектора при  $t=0$ .

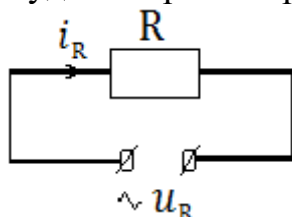
Проекция  $A$  на ось  $x$  будет изменяться от  $-A$  до  $+A$ . Такое моделирование – суть векторной диаграммы, где вектор амплитуды  $A$  вращается с угловой частотой  $\omega$  из состояния фазы  $\varphi_0$ . Метод векторных диаграмм позволяет перейти от операций с тригонометрическими функциями к алгебраическим с векторами, что упрощает расчеты гармонических процессов.

## Гармонические токи и напряжения на $R$ , $L$ и $C$ элементах

### Резистивная цепь

Резистивная цепь - совокупность резисторов, подключенных между собой по законам параллельного и (или) последовательного включения, по которым протекает электрический ток. Резистор перераспределяет токи и напряжения в цепи. В нем электрическая энергия переходит в тепло. Это одно из свойств резистора. Рассмотрим зависимости между током и напряжением на резистивном элементе  $R$  в цепи с гармоническим током.

В резистивной цепи нет сдвига фазы между током и напряжением. Если на резистор  $R$  (рисунок 3) подать напряжение  $u_R$  (5), то в нем появится ток (6), амплитуда которого определяется выражением (7).



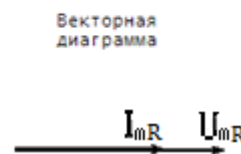
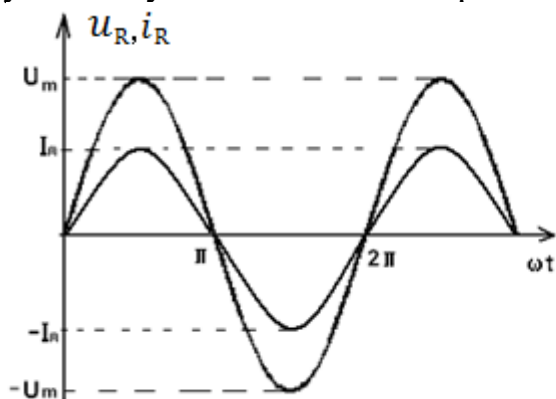
$$u_R = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$i_R = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Рисунок 3. Резистивный элемент с сопротивлением  $R$ .

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad (7)$$

Синфазность тока и напряжения на резисторе  $R$  отображена на рисунке 4. Векторные диаграммы описывают зависимости между амплитудами тока и напряжения. Для векторной диаграммы синфазность означает угол равный нулю между амплитудами тока  $I_m$  и напряжения  $U_m$ .



а)

б)

Рисунок 4. а) – напряжение и ток на резисторе  $R$  в графическом представлении; б) – в виде векторной диаграммы.

### Цепь с индуктивным элементом

Зависимость тока и напряжения на индуктивном элементе определяется (9). Пусть на элемент  $L$  (рисунок 5) подано гармоническое напряжение  $u_L$ . В индуктивном элементе  $L$  с некоторым запаздыванием, появится ток  $i_L$  (10), поскольку на создание магнитного поля уйдет время.

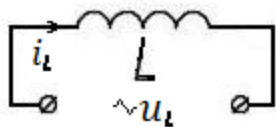


Рисунок 5. Соленоид с индуктивностью  $L$ .

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (9)$$

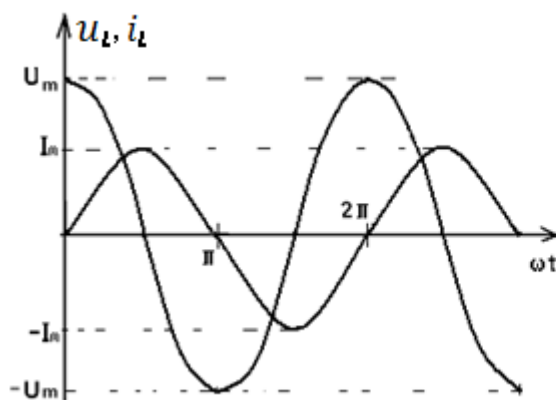
$$i_L = I_m \sin(\omega t + 0) = I_m \sin \omega t \quad (10)$$

$$u_L = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = L \omega I_m \cos \omega t \quad (11)$$

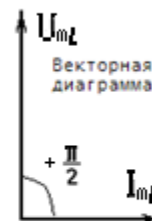
Используя (3), получим (12):

$$u_L = I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2) = I_m X_L \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \quad (12)$$

$X_L = \omega L$  – сопротивление элемента  $L$ . Между током (10) и напряжением (12) сдвиг фазы  $90^\circ$ , причем *напряжение опережает ток*. Графики  $u_L$  (13) и  $i_L$  (14) и векторная диаграмма для их амплитуд приведены на рисунке 6. Итак:



а)



б)

Рисунок 6. а) – графическое представление напряжения и тока на элементе  $L$ ; б) – векторная диаграмма сдвига фазы между амплитудами тока и напряжения.

$$u_L = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \quad (13)$$

$$i_L = I_m \sin \omega t \quad (14)$$

$U_m$  – амплитуда напряжения (15):

$$U_m = I_m \omega L = I_m X_L \quad (15)$$

$X_L$  – индуктивное сопротивление (Ом) (16):

$$X_L = \omega L$$

### Цепь с емкостным элементом

Емкость  $C$  – основной параметр конденсатора, зависит от его геометрических размеров и диэлектрика. Конденсатор накапливает, отдает или хранит энергию электрического поля. На накопление и отдачу энергии необходимо время. Это обуславливает сдвиг фазы между его напряжением и током; зави-

симости между которыми, описываются уравнениями (17). Одно из них - дифференциальное, другое – интегральное.

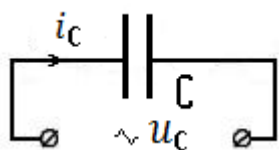


Рисунок 7. Конденсатор.

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}; u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt \quad (17)$$

Подадим на конденсатор напряжение (1) с начальной фазой  $\varphi=0$ . На нем появится ток, который определим на основе (17), получим (18):

$$i_C = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = C \omega U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t = \frac{U_m}{X_C} \cos \omega t = I_m \cos \omega t \quad (18)$$

Воспользуемся (3), получим (19):  $i_C = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$  (19)

В конденсаторе с емкостью  $C$  сдвиг фазы между током и напряжением так же  $\pi/2$ , но в данном случае *ток опережает напряжение*. Если для тока начальная фаза  $\varphi=0$ , то  $u_C$  будет иметь вид (20), что на графиках и векторной диаграмме отражено на рисунке 8. Итак, основные зависимости для конденсатора при работе в гармонических цепях:

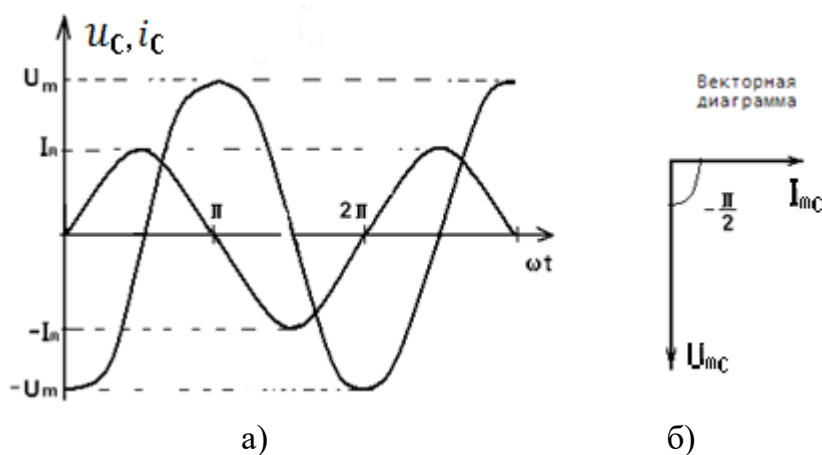


Рисунок 8. а) - графическое отображение опережения тока на емкостном элементе  $C$  на  $90^\circ$  относительно его напряжения; б) – векторная диаграмма сдвига фазы между амплитудами тока и напряжения на  $-\pi/2$ .

$$u_C = I_m \frac{1}{\omega C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = U_m \sin(\omega t - \pi/2) \quad (20)$$

$U_m$  – амплитуда напряжения (21):  $U_m = I_m \frac{1}{\omega C} = I_m \cdot X_C$  (21)

$X_C$  – сопротивление емкостного элемента цепи (Ом) (22):  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  (22)

## Последовательная R, L, C цепь

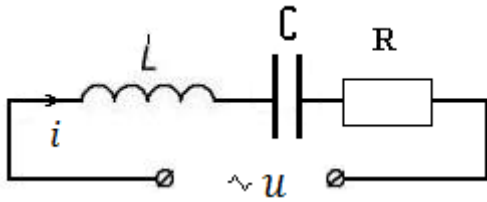


Рисунок 9. Последовательный колебательный контур.

Пусть имеется схема, где присутствуют элементы: R, L и C, которые включены последовательно (рисунок 9). Такой компонентный состав есть последовательный колебательный контур. К цепи приложено напряжение  $u$ , которое вызывает в ней ток  $i$ . На индуктивном элементе  $L$  напряжение  $u_L$ , сдвинуто на угол  $+\pi/2$  относительно тока  $i_L$ . Этот процесс отражен

на векторной диаграмме амплитудных токов и напряжений (рисунок 10 а). На конденсаторе емкостью C, ток и напряжение сдвинуты на  $-\pi/2$ , т.е ток опережает напряжение. Пусть  $u_L > u_C$ , тогда векторная диаграмма приобретает вид рисунка 10 б или в). На резистивном элементе R сдвиг фазы между током и напряжением равен 0 (рисунок 10 г).  $U_m$  - результат сложения амплитуд векторов  $U_{mL}$ ,  $U_{mC}$ ,  $U_{mR}$ . оно же амплитудное значение поданного на клеммы напряжения  $\sim u$ .

Для векторных амплитуд (23):

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2} \quad (23)$$

С учетом (7),(15),(21) имеем (24):

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m \omega L - \frac{I_m}{\omega C})^2} \quad (24)$$

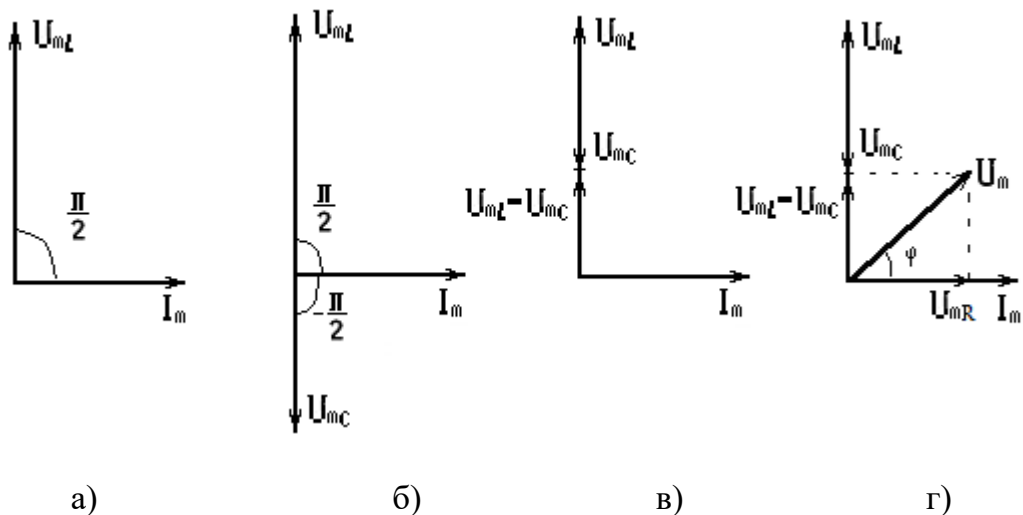


Рисунок 10. Векторная диаграмма сдвига фаз амплитудных токов и напряжений: а) - на индуктивном элементе  $L$ ; б) -на индуктивном элементе L и емкостном элементе C; в) - отражает разницу величин  $U_{mL}$  и  $U_{mC}$ ; г) - результирующего амплитудного напряжения  $U_m$ , с учетом амплитудного напряжения на резисторе  $U_{mR}$ .

Откуда (25): 
$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (25)$$

(25) похоже на закон Ома. В знаменателе – сопротивление. Между напряжением  $u$  и током  $i$  - сдвиг начальных фаз  $\varphi$  (рисунок 10 г), который находим в соответствии (26) и (27):

$$\text{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{I_m \omega L - I_m \frac{1}{\omega C}}{I_m R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (26)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (27)$$

С учетом (25), (27) справедливы выражения (28) и (29), при начальной фазе тока, равной 0.

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}) \quad (28)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + 0) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \sin \omega t \quad (29)$$

Особенности цепи с гармоническим током. Чтобы указать мгновенное напряжение (ток) в момент времени  $t$ , следует знать: амплитуду, частоту, начальную фазу. В цепи гармонического тока учитывают активное и реактивное сопротивления. Последние разделяется на индуктивное и емкостное. Элементы  $L$  и  $C$  в цепи организуют временные задержки:  $L$  – задержку изменения тока;  $C$  – напряжения. Реактивность элементов  $L$  и  $C$  связана с тем, что они в ходе работы в электрической цепи могут возвращать энергию: соленоид - энергию магнитного поля; конденсатор емкостью  $C$  – энергию электрического поля.

### Порядок выполнения лабораторной работы

Таблица 1. Данные варианта  $U_m$ ,  $f$ ,  $R$  и ОИ задаются преподавателем.

$U_m$ , В	$f$ , Гц	$R$ , кОм	$L$ , Гн	$C$ , Ф
5 – 20	500 - 2000		?	?

Задание I. Измерение параметров гармонических сигналов.

1. Включите генератор и осциллограф и подайте сигнал с выхода ГН на вход осциллографа. В осциллографе, используемый канал, должен быть включен. В генераторе (ГН):

- регулятор выходного напряжения ГН (он же регулятор  $U_m$  для  $u_{\text{вх}}$  ОИ), должен находиться, примерно, в среднем положении;



- dB (логарифмический делитель напряжения) должен находиться в положении «0», тогда регулировка  $u_{\text{вых}}$  ГН осуществляется регулятором «~».

2. Установите ГН на частоту  $f$  (переключатель  $10^2$ ,  $10^3$ ... и круговая шкала). Получите осциллограмму вида рисунка 1а. Если таковой не наблюдается, то подстройте масштабирование по осям напряжения (ось Y) и времени (ось X).

Масштабирование напряжения (ось Y) осуществляется из зоны ВЕРТИК осциллографа. Вращая регулятор ПЛАВНО, следует добиться, чтобы на экране появилась синусоида. Регулятором СМЕЩЕНИЕ устанавливаем нулевой уровень напряжения (по выбору исследователя). Количество вольт/деление для канала 1 СН 1 высвечивается в левом нижнем углу экрана и; правее, (СН 2) для канала 2. Если на экране видим напряжение в пределах  $(+U_m, -U_m)$ , то масштаб выбран правильно.

Масштабирование по X осуществляем из зоны ГОРИЗОНТ. Регулятором ОКНО, добиваемся появления на экране 2–3 периодов напряжения. Регулятором СМЕЩЕНИЕ (по выбору исследователя) устанавливается нулевой уровень времени, который должен совпадать с нулевым уровнем напряжения. Время/деление (M  $\mu$ S; mS) высвечивается, примерно, в центре нижней части экрана и указывает цену одной клетки. В правой части экрана высвечивается частота  $f$  исследуемого сигнала. Дополнительные данные об исследуемом сигнале (сигналах) можно получить, если нажать кнопку МЕНЮ. Наиболее точные измерения производятся тогда, когда по осям X и Y выбрана максимально возможная для данного уровня сигнала чувствительность осциллографа.

Измерьте амплитуду и период заданной синусоиды, сопоставьте эти результаты с показаниями осциллографа. Зарисуйте осциллограмму в виде графика.

Задание 2. Исследование активно-емкостной RC-цепи (рисунок 11 б).

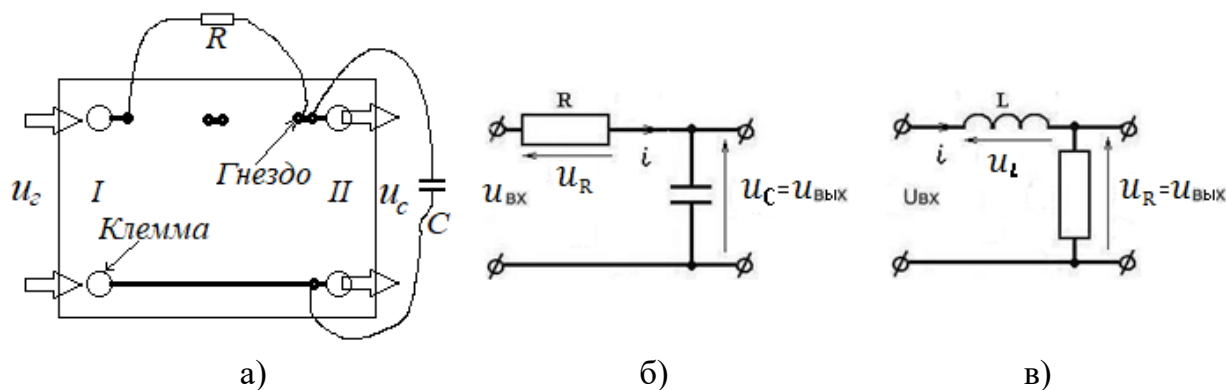


Рисунок 11. Объект исследования: а) – лабораторный макет подключения элементов электрической цепи; б) – схема интегрирующей RC-цепи; в) – схема интегрирующей RL-цепи.

1. Используем стенд рисунка 11. Канал 1 осциллографа кабелем «разъем/разъем» подключите через разветвитель к выходу «~» ГН. Канал 2; через кабель «разъем/двухпроводная линия» - к выходу схемы. Вход схемы таким же

кабелем подключите к разветвителю сигналов. Итак, канал 1 позволяет измерять  $u_{вх}$ ; канал 2 -  $u_{вых}$  схемы.

2. Изменяя  $u_{вх}$  в сторону повышения с шагом,  $\approx 1 В$ , измерьте размах  $u_{вых}$ , и перейдите к амплитудным значениям. Данные занесите в таблицу 2.

3. На основе (23) найдите  $U_{mR}$  и ток через резистор  $I_{mR}$  (7).

4. Посредством (21) определите емкость  $C$  RC-цепи для каждого значения  $u_{вх}$ . Найдите среднее значение емкости конденсатора  $\langle C \rangle$ . Оцените погрешность емкости конденсатора  $\Delta C$ .

5. На основе (27), величины  $\langle C \rangle$ , и данных варианта определите угол сдвига фазы  $\varphi_{расч}$  между  $U_{mвх}$  и  $U_{mвых}=U_{mC}$ .

Таблица 2. Результаты исследования RC-цепи.

№	$u_{вх}$ , В	$u_{вых}$ , В	$U_{mвх}$ , В	$U_{mC}$ , В	$U_{mR}$ , В	$I_{mR}$ , мА	$C$ , нФ	$\langle C \rangle$ , нФ	$\Delta C$ , нФ	$\varphi_{расч}$ , град	$\varphi_{эксп}$ , град	$\Delta\varphi$ , град
1												
2												
...												
10												

6. Определите экспериментально сдвиг фазы  $\varphi_{эксп}$  между входным напряжением  $U_{mвх}$  и выходным  $U_{mC}$ . Для этого для последнего опыта 10 измерьте время между максимумами гармонических сигналов и переведите его в угловую меру. Результат занесите в таблицу 2. Оцените погрешность между расчетными и экспериментальными результатами  $\Delta\varphi$ .

7. С соблюдением масштаба постройте векторную диаграмму исследований. Для этого воспользуетесь результатами п.10 таблицы 2.

Задание 3. Исследование активно-индуктивной RL-цепи.

В соответствии плана исследования RC-цепи, на основе данных предложенного варианта для величин  $R$  и  $L$ , составьте таблицу для результатов исследования RL-цепи (рисунок 11 в). Проведите ее исследование.

### Контрольные вопросы.

1. Какие измерения следует осуществить для гармонического напряжения и тока в электрической цепи, чтобы описать ее на основе математических моделей? Как оценить валидность полученной модели на основе погрешностей?

2. Какова методика для измерения сдвига фазы между током и напряжением на  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементах. Как оценить погрешность измерения?

3. Предложите измерительный эксперимент, чтобы продемонстрировать линейную зависимость между амплитудами гармонического тока и напряжения в  $R$ ,  $L$ ,  $C$ -цепях. Оцените точность эксперимента как косвенного измерения.

4. Предложите измерительный эксперимент, чтобы получить зависимость угла сдвига фазы между током и напряжением в  $R,L,C$ -цепи от частоты ГН.

## Лабораторная работа 3

### Автоматизация измерений характеристик и параметров полупроводниковых диодов, резисторов, электрона на основе компьютерной техники

*Цель работы:* знакомство с понятием «вольтамперная характеристика» (ВАХ). Измерение ВАХ элементов радиоэлектроники. Измерение элементарного заряда.

*Приборы и оборудование:* Лабораторная установка для измерения ВАХ, компьютер, образцы элементов – резистор, германиевый p-n-переход, кремниевый p-n-переход.

#### Теоретические сведения

Электрический заряд любого тела всегда кратен некой величине, названной элементарным зарядом. Значение этой величины  $e=1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл было измерено Милликеном в 1909 году. Опыт Милликена весьма сложен в реализации. Поэтому в данной работе используется другой метод, основанный на измерении вольтамперной характеристики p-n-перехода.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) элемента – это зависимость тока через элемент от приложенного к нему напряжения. Например, ВАХ отрезка металлического проводника представляет собой прямую пропорциональность и определена законом Ома:  $I=U \cdot g$ , где  $g$  – электропроводность проводника – величина обратная электрическому сопротивлению ( $g=1/R$ ).

Прямо пропорциональная ВАХ является редким примером. Обычно зависимость тока  $I$  от приложенного напряжения  $U$  выражается более сложным законом. В частности, ВАХ электронно-дырочного перехода определяется, так называемой, формулой Шокли:

$$I = I_{\text{обр}} \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

В данной формуле  $I_{\text{обр}}$  – обратный ток перехода, который протекает через него в направлении непротекания тока. Величина обратного тока очень слабо зависит от приложенного обратного напряжения и ее можно считать константой для данного образца электронно-дырочного перехода. Параметр  $U_T$  имеет размерность напряжения и называется температурным потенциалом. Он выражается через мировые константы:  $k$  – постоянную Больцмана,  $e$  – элементарный заряд:

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (2)$$

Если по виду ВАХ определить температурный потенциал, то при известных  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/(моль К) и абсолютной температуре – Т можно вычислить величину элементарного заряда –  $e$ . Лабораторная установка позволяет измерить ВАХ исследуемого элемента, представить ее в виде графика на экране и запомнить в виде двух столбцовой таблицы, в которой первый столбец – величины напряжения -U, второй соответствующие величина тока -I. Таблица сохраняется в виде текстового файла actual.txt. Обработывая этот файл с помощью Excel (электронные таблицы), мы определим величину температурного потенциала  $U_T$ , а затем по формуле (2) вычислим элементарный заряд.

### Порядок выполнения лабораторной работы

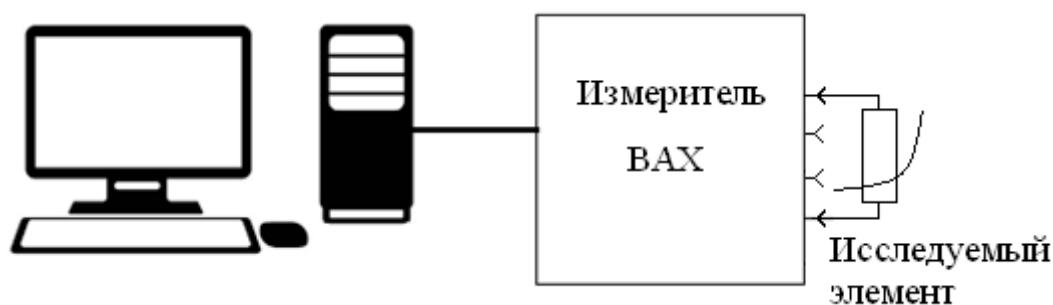


Рис. 1. Стенд для исследования ВАХ элементов радиоэлектроники.

Рассмотрите лабораторную установку и образцы (Рис. 1), предложенные для измерения ВАХ элементов. Образцы находятся в круглом пенале с надписью «Лабораторная работа Э-10, р/детали». Установка имеет контактные гнезда, в которые (два крайних гнезда) вставляются выводы исследуемого элемента.

Включите компьютер и установку, на которой должен засветиться индикаторный светодиод.

Установите в контактные гнезда резистор, который будет первым исследуемым элементом.

Запустите на исполнение программу Elem\_zar.exe, которую легко найти на рабочем столе по яркой желтой семерке. В появившейся на экране вкладке нажмите кнопку «старт» и на сообщение об открытии порта нажмите Ок. Установка готова к работе.

На мониторе отобразятся начальные значения напряжения на исследуемом элементе и тока через него. Величину напряжения можно изменять вручную, передвигая мышью движок регулятора в нижней части вкладки. Двигая регулятор, посмотрите, в каких пределах изменяются напряжение на элементе и ток через него.

Для снятия ВАХ подключенного элемента служит кнопка «сканировать». После нажатия на нее происходит ступенчатое увеличение напряжения на исследуемом элементе, измерение тока через него, отображение напряжения и

тока в виде точек на графике и накопление данных в файле. После окончания цикла сканирования установка готова к повторению его с другим исследуемым элементом. Новый график ВАХ будет совмещен со старым. Процесс накопления графиков ВАХ на экране можно продолжать многократно.

### **Задание 1. Измерение и сравнение ВАХ.**

Снимите графики ВАХ со всех представленных в работе элементов: резистора, германиевого р-п-перехода, кремниевого р-п-перехода, стабилитрона.

Перерисуйте полученное семейство графиков в тетрадь, указав тип элемента на каждом из графиков.

### **Задание 2. Измерение ВАХ германиевого перехода.**

Очистите память компьютера, нажав кнопку «Закончить». Вновь запустите на исполнение файл Elem\_zar.exe. Подключите к контактным гнездам германиевый переход. Соответствующий элемент имеет цилиндрическую форму с усеченным конусом. Именно он в наилучшей степени соответствует формуле Шокли. Получите ВАХ. Закройте файл нажатием кнопки «Закончить».

### **Задание 3. Вычисление элементарного заряда.**

Данные эксперимента сохранены в файле actual.txt в виде таблицы. Первый столбец таблицы – величины напряжений на исследуемом элементе в вольтах, второй – соответствующие величины тока в мкА. Для просмотра и обработки таблицу данных загрузим в программу работы с таблицами «EXEL». Запускаем EXEL, в меню “файл” выбираем “открыть” в подменю – “все файлы”. Находим и выделяем файл actual.txt и загружаем его в EXEL. Выбираем: “с разделителями”, разделитель – пробел. После этого мы увидим таблицу значений ВАХ, состоящую из двух столбцов.

Можно вновь получить на экране график ВАХ средствами EXEL. Для этого выделим любую ячейку на свободном поле, выделим полученную таблицу, выберем опцию «вставить», под опцию - точечную диаграмму в виде простого графика. EXEL построит график зависимости тока через переход от напряжения на нем. Конечно, этот график должен быть таким же как в программе Elem\_zar.exe.

1. Нас на этом этапе интересует таблица данных. В первой строчке при отрицательном напряжении на переходе величина тока через него равна  $-I_{обр}$  – обратному току через переход в формуле (1). Таким образом, величина  $I_{обр}$  легко определится.

2. Прокрутим таблицу до конца и из последней строчки узнаем величины тока  $I_m$  и напряжения  $U_m$ , которые должны удовлетворять соотношению (3):

$$I_m = I_{обр} \left( e^{\frac{U_m}{U_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

В этой формуле неизвестна только одна величина –  $U_T$ , которую необходимо выразить и вычислить (4):

$$U_T = \frac{U_m}{\ln \left( 1 + \frac{I_m}{I_{обр}} \right)} \quad (4)$$

По известной  $U_T$  с помощью формулы (2) вычислим величину элементарного заряда. Необходимое для вычислений значение постоянной Больцмана равно  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Контрольные вопросы:

1. Что такое вольтамперная характеристика элемента электрической цепи?
2. Автоматизация измерений ВАХ диодов и резисторов посредством компьютерной техники.
3. Что называется элементарным зарядом?
4. Методика измерения заряда электрона на основе ВАХ полупроводникового диода.
5. Физическая модель стенда, позволяющего автоматизировать исследования ВАХ элементов радиоэлектроники.
6. Цели автоматизации измерительной техники на основе микропроцессоров.

## Лабораторная работа 4

### Измерение индуктивности $L$ соленоида на основе резонансного метода

*Цель работы:* изучить резонанс и его проявления в последовательном колебательном контуре.

*Приборы и оборудование:* генератор электрических сигналов, осциллограф, электрический колебательный контур.

### Теоретические сведения

Резонанс – процесс в колебательной системе, когда частота внешнего воздействия на систему совпадает с ее собственной частотой, сопровождающийся увеличением амплитуды колебаний в системе.

Колебательный контур - система с разнородными носителями энергии. В нем происходит переход энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора. С колебательного контура начинается радиоприемник, сотовый телефон, безинтернетный телевизор. Антенны этих устройств

подключается к колебательному контуру, где в соответствии закона электромагнитной индукции в катушке индуктивности индуцируется эдс от сигнала передающей станции. Далее этот сигнал декодируется до звукового или (и) изображения, в зависимости от функций приемника. Передатчик передающей системы заканчивается антенной, но сигнал на нее поступает из колебательного контура. Процессы в приемо-передающих системах радиоэлектроники гораздо сложнее тех, которые мы рассмотрим, но в основе понимания их работы лежат изучаемые нами явления. Если частота передатчика телефонных сигналов совпадает с частотой колебательного контура вашего телефона, то вы организуете радиосвязь. В радиоэлектронике применяются последовательные и параллельные колебательные контуры (рисунок 1) Рассмотрим некоторые аспекты их работы на примере колебательного контура рисунка 1 а.

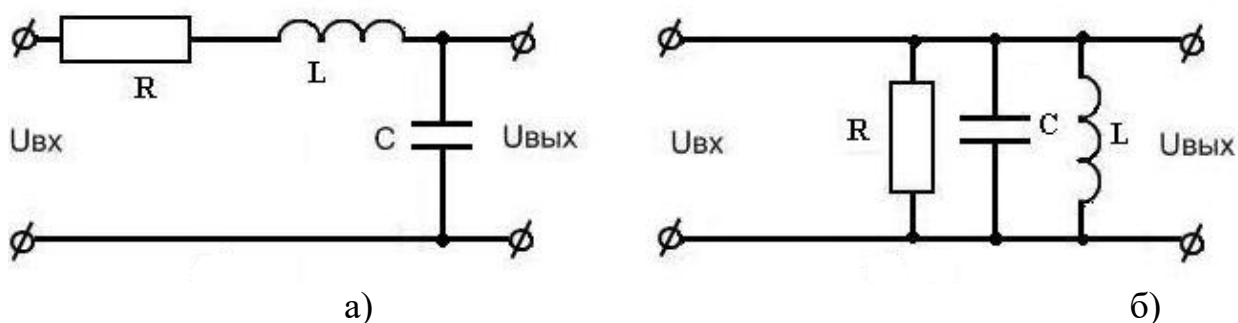


Рисунок 1. а) – колебательный контур последовательного типа; б) - колебательный контур параллельного типа.

Пусть на входе колебательного последовательного контура присутствует источник гармонического напряжения:  $e = E_m \cos \omega t$ . Для анализа электрических процессов используем физическую модель рисунка 2.

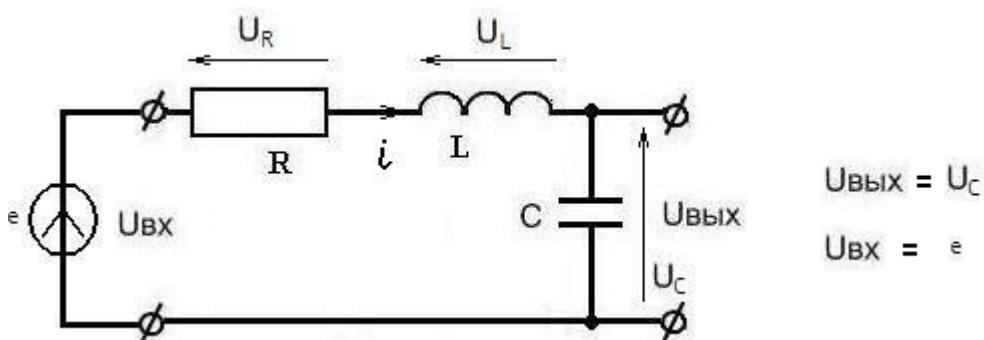


Рисунок 2. Последовательный колебательный контур, подключенный к гармоническому источнику напряжения  $e$ .

В соответствии электрической схемы рисунка 2, имеем (1):

$$e = U_R + U_L + U_C \quad (1)$$

$$U_R = iR; \quad U_L = L \frac{di}{dt}; \quad U_C = \frac{1}{C} \int idt \quad (2)$$

$$E_m \cos \omega t = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt \quad (3)$$

(3) - интегрально дифференциальное уравнение. Его частным решением является функция (4). Если ее подставить в (3), получим тождество.

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Найдем амплитуду  $I_m$  и начальную фазу  $\varphi$  для последнего выражения.

$$U_R = iR = I_m R \cos(\omega t + \varphi)$$

$$U_L = L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int idt = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t + \varphi)$$

Подставим  $U_R$ ,  $U_L$  и  $U_C$  в (1), получим (5):

$$E_m \cos \omega t = I_m R \cos(\omega t + \varphi) - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Если в (5) принять  $\omega t = 0$  и  $\omega t = \pi/2$ , то получим два частных уравнения. Они и позволят определить  $I_m$  и  $\varphi$ .

$$E_m = I_m R \cos \varphi - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin \varphi$$

$$0 = I_m R \cos(\frac{\pi}{2} + \varphi) - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin(\frac{\pi}{2} + \varphi)$$

или,

$$E_m = I_m R \cos \varphi - (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \sin \varphi \quad (6)$$

$$0 = I_m R \sin \varphi + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \cos \varphi \quad (7)$$

Все слагаемые (6) и (7) возведем в квадраты и просуммируем (8):

$$E_m^2 = I_m^2 R^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 I_m^2 (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) \quad (8)$$



Из (8) следует (9):

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (9)$$

Из (7) следует (10):

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R}; \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (10)$$

Уравнение (4) будет иметь вид (11):

$$i = \frac{E_m \cos(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R})}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (11)$$

Из (9) и (11) следует, что  $I_m$  и  $i$  зависят от частоты  $\omega$  источника эдс  $e$ . При этом,  $I_m$  и  $i$  возрастут, если в выражении под корнем станет равным нулю величина (12). Такое состояние цепи называют резонансным.

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0; \quad (12)$$

Частота  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$  - собственная частота колебательного контура. Если частота внешнего сигнала  $e = E_m \cos \omega t$  совпадет с собственной частотой колебательного контура, то в цепи на частоте  $\omega$  произойдет увеличение тока цепи  $i$  и, как следствие, напряжения  $U_{\text{вых}}$ , которое есть напряжение на конденсаторе. Однако при резонансе будет происходить и увеличение напряжения и на катушке с индуктивностью  $L$ , и на резисторе сопротивлением  $R$ .

Качество резонанса оценивается величиной, которая называется добротностью ( $Q$ ) контура. Она показывает - во сколько раз в колебательном контуре, при резонансе, возрастает напряжение на конденсаторе (индуктивности).

Для амплитудных значений напряжений на катушке индуктивности (13) и конденсаторе (14):

$$U_{mL} = \omega_0 L I_m = \frac{\omega_0 L}{R} E_m = Q E_m \quad (13)$$

$$U_{mC} = \frac{1}{\omega_0 C} I_m = \frac{1}{\omega_0 C R} E_m = Q E_m \quad (14)$$

Величины  $U_{mL}$ ,  $U_{mC}$  и  $E_m$  могут определяться осциллографическими измерениями.

### Стенд для исследования колебательного контура

Система колебательного контура реализована в «черном ящике», который имеет вход для сигналов генератора и два выхода для подключения двух каналов осциллографа: один на вход колебательного контура, другой - на его выход. Колебательный контур содержит катушку с индуктивностью  $L$  и сопротивлением обмотки  $R_k$ , конденсаторы  $C_1 - C_4$  и магазин сопротивлений  $R_{доб}$ , от 0 до десятков (сотен) кОм.

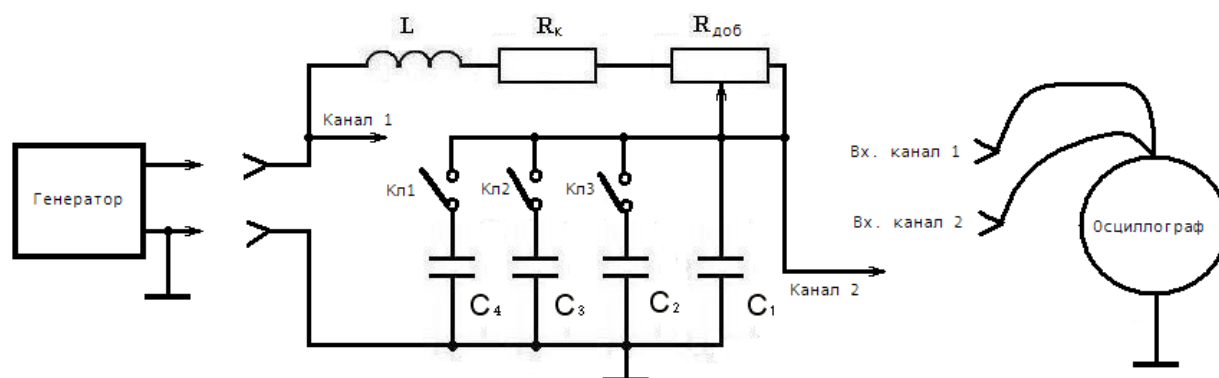


Рисунок 3. Схема для исследования резонанса в электрической цепи.

$C_1 = 290$  пФ;  $C_2 = 390$  пФ;  $C_3 = 560$  пФ;  $C_4 = 750$  пФ.

Возможны и другие номиналы емкостей.

Колебательный контур может иметь разные собственные частоты (12), зависящие от положения ключей Кл1 – Кл3 для конденсаторов  $C_1 - C_3$  (Рисунок 3). Их подключение осуществляется переключателями «черного ящика» 1 – 4. В зависимости от комбинации положения этих переключателей в колебательном контуре включается разная результирующая емкость. Тем самым изменяется собственная (резонансная) частота колебательного контура.

#### Порядок выполнения работы

1. Изучите математическую модель резонанса в колебательном контуре.

2. На вход колебательного контура от генератора подаем максимально возможный гармонический сигнал. Это когда регулятор уровня выходного сигнала генератора, при движении по часовой стрелке, в крайнем правом положении. Его величину контролируем каналом 2 осциллографа. Заметим, что  $U_{\text{вых.ген}} \approx \text{const}$  во всем частотном диапазоне. Поэтому, в дальнейшем, зафикси-

ровав величину  $U_{\text{вых.ген}}$  возможно отключить канал 2 осциллографа, что облегчит эксперименты.

Выходной сигнал снимаем с конденсатора (конденсаторов) и подаем на вход канала 1 осциллографа (Рисунок 3). Положение выключателей 1-4 на «черном ящике» в выключенном состоянии.

Если изменять частоту выходного напряжения генератора от 0, например, до 100 кГц, и при этом подавать на вход «черного ящика» постоянное по амплитуде напряжение, то, начиная с некоторых частот выходное напряжение (канал 1) начнет увеличиваться, а потом уменьшатся. Это есть проявление резонанса. В ходе эксперимента, возможно, зафиксировать частоту, при котором будет пик напряжения на выходе колебательного контура. Если это проделали, и получилось наблюдать описанное, Вы готовы к дальнейшим исследованиям.

### 3. Измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебательного контура.

АЧХ – есть зависимость изменения амплитуды выходного сигнала по отношению к амплитуде входного сигнала ( $U_{\text{вх}} = \text{const}$ ) при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

По заданию преподавателя, переключатели 1 - 4 установите в активное состояние и задайте величину напряжения генератора сигналов -  $U_{\text{вх}}$ . Зафиксируйте номинал результирующей емкости  $C = \dots$  колебательного контура и определите экспериментально его собственную (резонансную) частоту  $f_{\text{рез}}$ .

Снимите данные в соответствии таблицы 1 для следующих значений добавочного сопротивления (возможны и др. значения  $R_{\text{доб}}$ ):

$$R_{\text{доб1}} = 0 \text{ Ом}; \quad R_{\text{доб2}} = 500 \text{ Ом} \text{ и } R_{\text{доб3}} = 1 \text{ кОм}.$$

Таблица 1. Данные для построения АЧХ колебательного контура.

	f, кГц	$f_{\text{рез}} - 30$	$f_{\text{рез}} - 20$	$f_{\text{рез}} - 10$	$f_{\text{рез}}$	$f_{\text{рез}} + 10$	$f_{\text{рез}} + 20$	$f_{\text{рез}} + 30$	$f_{\text{рез}} + 40$
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$									
$U_{\text{вых1}}, \text{ В}$	$R_{\text{доб1}} = 0 \text{ Ом}$								
$U_{\text{вых2}}, \text{ В}$	$R_{\text{доб2}} = 500 \text{ Ом}$								
$U_{\text{вых3}}, \text{ В}$	$R_{\text{доб3}} = 1 \text{ кОм}$								

Для трех случаев исследований, при различных сопротивлениях  $R_{\text{доб}}$ , в одной координатной системе постройте АЧХ. В качестве ординаты используйте отношение  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ ; в качестве оси абсцисс – параметр частоты  $f$ .

По полученному графику по уровню 0, 707 от максимального значения напряжения на резонансной частоте  $U_{\text{рез}}$  графически определите полосу пропускания последовательного колебательного контура  $\Delta f$ . Отношение:  $f_{\text{рез}}/\Delta f =$

$Q$ , есть добротность колебательного контура. Это еще один экспериментальный метод нахождения  $Q$ .

4. Определение индуктивности  $L$  в последовательном колебательном контуре.

Считаем, что  $R_k \approx 0$ ; выставляем  $R_{доб} = 0$ .

Изменяя емкость  $C$  колебательного контура, определяем соответствующие его резонансные частоты, которые определяем с помощью генератора и осциллографа и, которые являются для него собственными. Полученные результаты исследований заносим в таблицу 2.

Величину индуктивности  $L$  определяем в соответствии выражения (12) на основе показаний частоты осциллографом, поскольку они более точны сравнительно с показаниями генератора. По осциллографическим показаниям определяем и период колебаний  $T$  на различных собственных частотах последовательного колебательного контура.

Таблица 2. Результаты исследования параметров колебательного контура

$N$	$C, \text{нФ}$	$f_{осц}, \text{кГц}$	$f_{ген}, \text{кГц}$	$\varepsilon$	$L, \text{мГн}$	$\Delta L, \text{мГн}$	$\langle L \rangle, \text{мГн}$	$Q$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

По самому худшему результату исследований определите погрешность измеренной индуктивности  $\Delta L$ . Найдите относительную погрешность измерений величины  $L$ .

Имея данные показаний частоты генератора и осциллографа, оцените относительную погрешность показаний генератора для резонансных частот, считая точность осциллографа по частоте эталонной.  $|\varepsilon| = (f_{осц} - f_{ген})/f_{осц}$

5. Исследование зависимости добротности колебательного контура от его собственной частоты.

Исследуйте, как зависит добротность  $Q$  колебательного контура (отношение выходного напряжения на резонансной частоте  $U_{вых рез}$ , ко входному –  $U_{вх рез}$ ) в зависимости от изменения его собственной частоты (14).

Для этого используйте результаты ранее проведенных измерений, представленных в таблице 2, и для всех  $N$  резонансных частот экспериментально

определите добротность контура  $Q_1 - Q_8$ . Данные исследований занесите в таблицу 2.

По результатам эксперимента постройте зависимость:  $Q = r(f_{рез})$ .

Сделайте выводы по проведенному исследованию: зависимости добротности последовательного колебательного контура  $Q$  от его собственной частоты  $f$ .

6. Оцените по параметру относительной погрешности точность измерений напряжения и времени визуальным способом и способом измерения по меткам каналов X и Y осциллографа. Для этого придумайте методику исследования и осуществите ее на практике.

### Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена неточность измерения АЧХ колебательного контура?
2. Почему показания осциллографа сравнительно с показаниями генератора считаем эталонными?
3. В чем сущность резонансного метода измерения индуктивности (емкости) колебательного контура?
4. Какой компонентный состав погрешностей имеет место в ходе проведения измерения косвенным методом величины индуктивности  $L$ ? Как теоретически улучшить измерение этой индуктивности  $L$ ?
5. Как изменяется погрешность  $\Delta L$  с ростом резонансной частоты колебательного контура ?
6. Методы определения добротности колебательного контура.
7. Методы повышения качества измерения добротности колебательного контура.

## Лабораторная работа 5

### Измерение емкости конденсатора на основе переходных процессов в электрической цепи

*Цель работы:* изучить процессы в конденсаторе при переходных процессах и на основе полученных данных определить величину его емкости.

*Приборы и оборудование:* генератор электрических сигналов, осциллограф, электрическая цепь из RC элементов.

### Теоретические сведения

Конденсатор – элемент электро-, радио- электроники из двух обкладок, с диэлектриком внутри. Наиболее распространены – плоские конденсаторы. В микро- электронике они выполнены в виде микро- элементов, в компьютере

их тысячи. Основные параметры конденсатора: емкость -  $C$ , погрешность -  $\Delta C$ , напряжение -  $U$ . Для плоского конденсатора (1):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  
 $S$  – площадь пластин,  $d$  – расстояние между пластинами.

Емкость конденсатора  $C$  характеризует диэлектрик и его геометрические размеры (1). Понятие «емкость» для конденсатора связана со способностью накапливать заряд  $q$ , при подаче на него напряжения  $U$ .

$$C = \frac{q}{U}; \quad C = \frac{dq}{dU} \quad (2)$$

Зависимость между током и напряжением конденсатора (3):

$$dq = CdU; \quad dq = idt; \quad C = \frac{idt}{dU} \quad (3)$$

Откуда (4):

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt}; \quad U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (4)$$

Формулы (3) - (4) устанавливают зависимость между током и напряжением конденсатора в дифференциальной и интегральной формах.  $i_c$  и  $U_c$  - *мгновенные* значения тока и напряжения, зависящие от времени:  $i_c = i_c(t)$ ;  $U_c = U_c(t)$ . Однако время, в этих величинах, как правило, не указывают.

Рассмотрим, как будут меняться ток  $i_c(t)$  и напряжение  $U_c(t)$  на конденсаторе, если его через резистор  $R$  (Рисунок 2) подключить к источнику постоянного напряжения  $E$  (Рисунок 1).

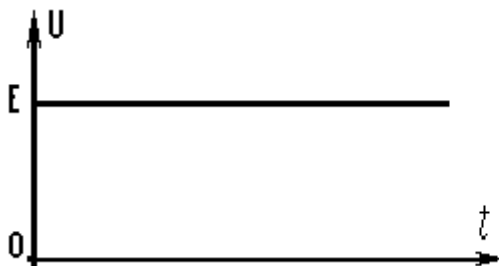


Рисунок 1. График напряжения источника постоянной ЭДС величиной  $E$

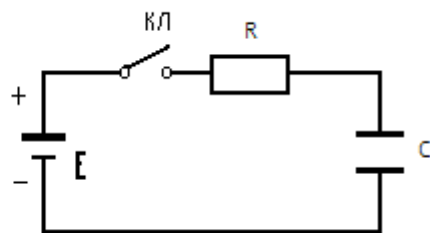


Рисунок 2. Схема подключения конденсатора к источнику ЭДС через резистор сопротивлением  $R$

Положим, при  $t=0$ , замыкают ключ КЛ (Рис. 2). Найдем  $U_c$  для  $t \geq 0$ :

$$E = U_R + U_C; \quad U_R = i_C R; \quad i_C = C \frac{dU_C}{dt}; \quad (5)$$

$$E = RC \frac{dU_C}{dt} + U_C \quad (6)$$

Это однородное линейное дифференциальное уравнение (ДУ) первого порядка. Его решение (функцию  $U_C$ , которую подставим в последнее уравнение и получим тождество) будем искать как сумму частного решения и, решения, соответствующего ему однородного ДУ. Частное решение обозначим как  $U_{ПП}$ , - принужденная составляющая. Решение соответствующего ему однородного уравнения –  $U_{СВ}$ , свободная составляющая.

$$U_C = U_{ПП} + U_{СВ} \quad (7)$$

Если КЛ замкнуть, то при  $t=\infty$  конденсатор зарядится и, получим:  $U_C(\infty)=E$ . Это частное решение:  $U_{ПП}=E$ . Принужденная составляющая определяет, к чему *принудит* внешнее воздействие  $E$  параметр  $U_C$  при  $t=\infty$ .

Решение однородного ДУ определяет  $U_{СВ}$  (7). Имеется ввиду, что цепь *свободна* от внешних воздействий, т. е.  $E=0$  (8).

$$RC \frac{dU_{СВ}}{dt} + U_{СВ} = 0 \quad (8)$$

Используем подстановку Эйлера:

$$U_{СВ} = Ae^{Pt} \quad (9)$$

Если найдем  $A$  и  $P$ , то определим  $U_{СВ}$  и, соответственно,  $U_C$ . Подставим (9) в (8), получим характеристическое уравнение и его корень (10):

$$RC \frac{dAe^{Pt}}{dt} + Ae^{Pt} = 0; \quad RC PAe^{Pt} + Ae^{Pt} = 0; \quad P = -\frac{1}{RC} \quad (10)$$

Для определения  $A$ , воспользуемся начальными условиями задачи.

Будем учитывать свойства конденсатора в переходных процессах (переключениях), которые известны как законы коммутации, описывающие его поведение по величинам напряжения и тока. Такие законы имеются и для катушки с индуктивностью.

1. В моменты переключений напряжение на конденсаторе не меняется мгновенно, а сохраняет свое предыдущее состояние, а затем плавно изменяется (11):

$$U_C(0_-) = U_C(0_+) \quad (11)$$

$0_-$  - момент времени перед переключением;  $0_+$  - сразу после переключения.

2. В моменты переключений ток через конденсатор меняется мгновенно, и может достигать бесконечного значения. Однако провода к конденсатору обладают сопротивлением, поэтому, в реальности, ток будет конечным. Во время переключений конденсатор рассматривают как короткозамкнутый элемент.

При  $t=0$  КЛ замыкается, но до этого  $U_C(0_-)=0$ . Следовательно, (12):

$$U_C(0) = U_{IP}(0) + U_{CB}(0) = E + Ae^{-P_0} = 0; \quad A = -E; \quad U_{CB} = -Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (12)$$

Итак,  $U_C$  для  $t \geq 0$ :

$$U_C = E - Ee^{-\frac{t}{RC}} = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}); \quad U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (13)$$

$T=RC$  - приблизительно, время зарядки конденсатора. Если  $t=T$ , то  $U_C/E = 0,637$ . Более точно,  $T=RC$  - это время от начала зарядки конденсатора до значения  $0,637$  от максимальной величины  $E$ .

График заряда конденсатора приведен на рисунке 3 а. Зная  $U_C$ , найдем  $i_C$  (14). График  $i_C$  представлен на рисунке 3 б.

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{d \left[ E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \right]}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}}; \quad i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{T}} \quad (14)$$

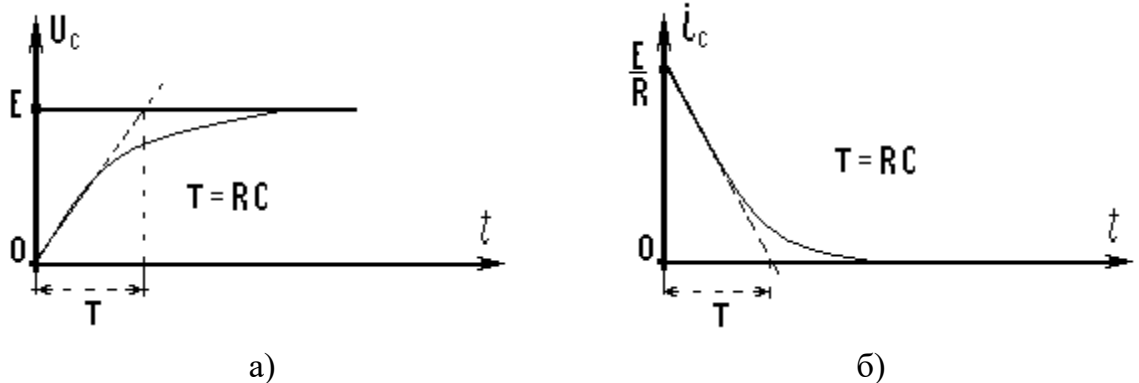


Рисунок 3. Графики изменений напряжения - а); и тока - б) на конденсаторе при его подключении к батарееке напряжением  $E$ .

Постоянную зарядки конденсатора  $T$  можно, приблизительно, определить графически, на основе построения касательной к графику Рис.3 а), б).

Прибор, который позволяет наблюдать процесс зарядки конденсатора - осциллограф. Он может отображать график функции (13) и позволяет измерять напряжение, время и, напряжение во времени. Если для исследования использовать схему рисунка 2, то после замыкания ключа КЛ произойдет зарядка



конденсатора и на нем установится напряжение  $E$  (рисунок 3 а). Процесс зарядки будет кратковременным и за это время невозможно провести измерение данных эксперимента. Дело в том, что современные резисторы и конденсаторы таковы, что медленная зарядка может составлять единицы секунд. Проще организовать зарядку конденсатора в мС или мкС. Но, чтобы на экране осциллографа видеть зарядку этого элемента, необходимо его разряжать и заряжать. Эту идею можно реализовать, если вместо схемы рисунка 2 использовать схему рисунка 4.

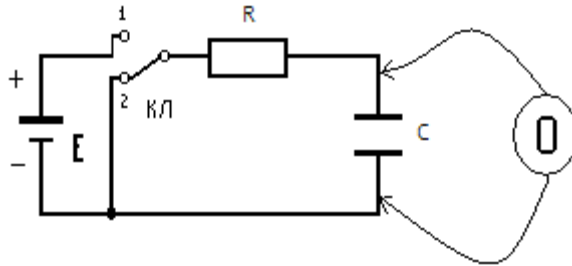


Рисунок 4. Схема для осциллографического наблюдения процесса заряда/разряда конденсатора

Процесс переключения следует проводить с частотой, которая соответствовала бы периоду колебаний  $T=RC$ , или, с частотой, близко кратной  $1/T$ . Инерционность зрения глаз не сможет ощущать переключения и тогда на экране осциллографа будет заряд/разряд конденсатора.

Как будет изменяться напряжение  $U_C$ , когда ключ КЛ перейдет в положение 2 (рисунок 4)? Считаем, что в положении 1 КЛ конденсатор зарядился до напряжения  $E$ .

Состояние цепи будет описываться тем же уравнением (6), с той разницей, что  $E=0$ , то есть, уравнение (6) примет вид (15):

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0 \quad (15)$$

Оно по форме совпадает с (8).

Используем тот же алгоритм решения, что и для (6), получим (16):

$$U_C = U_{ПР} + U_{СВ}; \quad U_{ПР} = U_C(\infty) = 0; \quad U_C = U_{СВ}; \quad (16)$$

$U_{ПР} = 0$ , так как после замыкания КЛ в положение 2 конденсатор разрядится и при  $t \rightarrow \infty$   $U_C = 0$ . Для определения  $U_{СВ}$  воспользуемся, еще раз, подстановкой Эйлера (9). Подставляя (9) в (15) найдем характеристическое уравнение, соответствующее нашему ДУ и его корень  $P$ . Вполне очевидно, что он совпадает с (10). Получим (17):

$$P = -\frac{1}{RC} \quad (17)$$

Что касается  $A$ , то оно будет другим, поскольку изменились начальные условия задачи. В момент переключения ( $t=0$ ), с учетом законов коммутации для конденсатора (в моменты переключений он сохраняет свое предыдущее состояние по напряжению), получим (18):

$$E = Ae^{p^0} + 0; \quad A = E \quad (18)$$

И тогда, (16) примет вид (19):

$$U_C = U_{CB} = Ee^{-\frac{t}{RC}} \quad (19)$$

График разряда конденсатора ( $U_{\text{вх}} = 0$ ) приведен на рисунке 5.

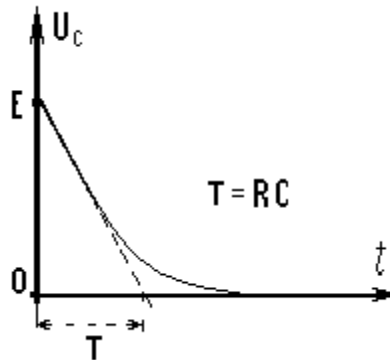


Рисунок 5. Разряд конденсатора при переключении ключа КЛ в положение 2

Ключ КЛ (рисунок 4) можно «автоматизировать», если на вход  $RC$  – цепи (рисунок 7) подавать прямоугольные импульсы (рисунок 6). Время  $t_1$  – соответствует состоянию ключа КЛ -1 (рисунок 4);  $t_2$  – 2.

Техника электроники позволяет организовать сигнал рисунка 6, с частотами, позволяющими наблюдать зарядку/разрядку конденсатора. Эти приборы – генераторы прямоугольных импульсов (ГПИ). В схеме рисунка 2 исключим источник ЭДС и на вход цепи (рисунок 7) будем подавать прямоугольные импульсы (рисунок 6), имитирующие переключение ключа КЛ (рисунок 4).

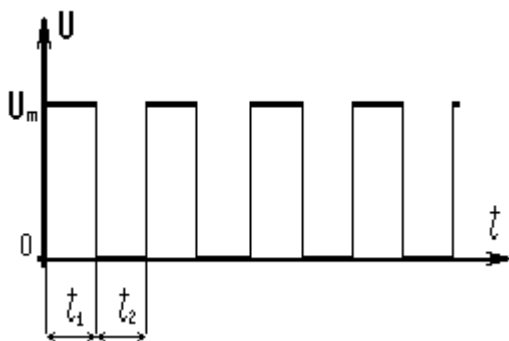


Рисунок 6. Прямоугольные импульсы

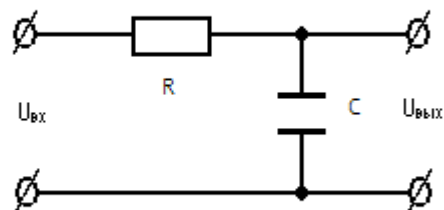


Рисунок 7.  $RC$  – цепь

## Стенд для определения емкости конденсатора

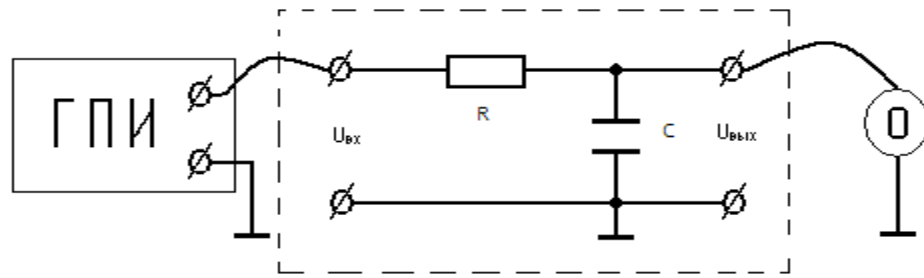


Рисунок 8. ГПИ - генератор прямоугольных импульсов;  
О – осциллограф; RC – цепь

### Порядок выполнения работы

1. Соберите стенд рисунка 8. ГПИ, О, RC-цепь должны иметь общую «землю» - провод нулевого потенциала.

2. Включите тумблеры ВКЛ генератора и осциллографа. Проконтролируйте, чтобы в осциллографе:

- канал, который используете для исследований, был включен (найдите на панели прибора кнопки подключения каналов и включите необходимый);

- была включена синхронизация канала, который Вы используете для исследований (в цифровом осциллографе (ЦО) эта операция реализуется автоматически);

3. Проконтролируйте, чтобы в ГПИ:

- провод, идущий на RC – цепь, был подключен ко выходу прямоугольных импульсов;

- регулятор плавной регулировки импульсного выходного сигнала генератора (найдите его на передней панели прибора), находился, примерно, в среднем положении;

- переключатель dB (логарифмический делитель выходного напряжения генератора) находился в положении «0». Это означает, что логарифмический делитель напряжения отключен, и регулировка уровня выходного сигнала генератора осуществляется только плавной регулировкой.

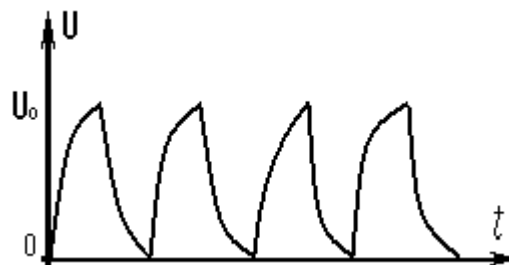


Рисунок 9. Процесс заряда/разряда конденсатора, если на вход RC – цепи подавать импульсное напряжение

4. Установите частоту генерации ГПИ 1кГц; грубую подстройку частоты (время/дел) установите в положение  $10^3$  ( $10^2$ ); а точную (круговая шкала) - 1,0 кГц (10,0 кГц).

5. Получите примерную осциллограмму рисунка 9.

Для этого подстройте каналы X и Y осциллографа по величинам времени (канал X) и напряжения (канал Y). Что это означает.

Канал Y позволяет измерять вольты. На Y-пластины электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), по паспортным данным, следует подавать напряжение не более  $U_{max}$ . Если подать на пластины Y синусоидальное напряжение более этой величины, то увидим, лишь часть синусоиды, и трудно будет понять, что за сигнал подан на осциллограф. Если подать очень малый сигнал по напряжению (раз в 100 меньше  $U_{max}$ ) - не сможем видеть форму сигнала. Это требует согласования величины измеряемого сигнала к величине допустимого напряжения на Y-пластины ЭЛТ. Согласование осуществляется переключателем В/дел или, ВЕРТИК В  $\cap$  мВ, если осциллограф цифровой. Барабанным переключателем включаем между входным разъемом прибора делителя напряжения из резисторов (когда надо уменьшить величину входного напряжения), либо усилители (если входной сигнал имеет маленькую величину).

Переключателем В/дел выберите такое его положение, чтобы на экране отображался график функций (13) и (19) (рисунок 9). У цифрового осциллографа это переключатель ВЕРТИК В  $\cap$  мВ.

Согласование требуется и для пластин – X ЭЛТ. Если период измеряемого сигнала значительно меньше периода переноса луча ЭЛТ (слева – направо), то на экране будет большое количество периодов исследуемого сигнала, которое будет представляться в виде темной сплошной полосы. Если же период исследуемого сигнала значительно больше периода развертки осциллографа, то можем видеть лишь часть синусоиды. Чтобы на экране прибора получить осциллограмму, по которой можно проводить измерения времени, необходимо частоту развертки прибора подстроить к частоте измеряемого сигнала (синхронизировать осциллограф). Иначе будем наблюдать «бегущую» осциллограмму рисунка 9.

Последнее реализуется барабанным переключателем время/дел. Если частота исследуемого сигнала совпадет с частотой развертки X-канала, то на экране увидим один период колебаний. Измерение можно проводить и тогда, когда частота развертки осциллографа будет близко-кратной к частоте измеряемого сигнала. При этом сможем видеть 2, 3, 4 ... периода сигнала. Барабанный переключатель осуществляет грубую подстройку частоты синхронизации; плавная подстройка проводится регулятором «УРОВЕНЬ». В ЦО процедура синхронизации автоматизирована и осуществляется регулятором ...ГОРИЗОНТ с  $\cap$   $\mu$ с.

Установите такой режим работы осциллографа, чтобы на экране наблюдался, примерно, один цикл заряда/разряда конденсатора. Это позволит более точно фиксировать интервалы времени исследуемого процесса.

Добейтесь наибольшей чувствительности осциллографа при измерении напряжения. Осциллограмму можно двигать по измерительной сетке экрана с помощью регуляторов смещения по осям X, Y (разберитесь, как это осуществить). Установите осциллограмму в положение, удобное для измерений (когда начало заряда/разряда конденсатора совпадает с началом координат сетки экрана, которое выбирается произвольно исследователем на экране).

Если у Вас «неподвижная» осциллограмма на экране прибора, будем считать, что Вы научились, в основном, пользоваться приборами лабораторной работы и можете снимать данные для уравнений заряда (13) и разряда (19) конденсатора.

6. На основе графика заряда/разряда конденсатора, осуществите снятие зависимости  $U_C = f(t)$ . Какой из вариантов N (1, 2, 3 или 4) Вам выполнять, согласуйте с преподавателем. Число измерений  $n = 10$ . 5 измерений для заряда конденсатора; 5- для его разряда. Моменты времени 1-10 на осциллограмме выбираете самостоятельно.  $U_{m\text{ вх}}$  – амплитудное значение напряжения импульсов генератора, оно же  $U_m$  на рисунке 6.

7. Данные исследований своего варианта занесите в таблицу.

8. На основе (13) и (19) получите выражения для определения C и найдите их для всех точек n ваших графиков. Далее определите среднее значение  $\langle C \rangle$ .

Таблица результатов исследований конденсатора

N	$U_{\text{вх}}$			Процесс n	Заряд конденсатора (13)					Разряд конденсатора (19)				
	f, кГц	$U_m$ вх, В	R, кОм		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,5	15	82	t, мкс										
				$U_C$ , В										
2	1,0	20		t, мкс										
				$U_C$ , В										
3	2,0	25		t, мкс										
				$U_C$ , В										
4	По заданию преподавателя			t, мкс										
				$U_C$ , В										
5	N	По зад. преподав.		C, пФ										
6	Среднее значение			$\langle C \rangle$ , пФ										
7	ΔC													

7. По худшему результату из числа  $n = 10$  определите максимальную погрешность измерения  $\Delta C$  емкости конденсатора. Оцените относительную погрешность измерения емкости конденсатора.

8. Оцените компонентный состав полученной погрешности для емкости конденсатора и, вклад каждой из них, в результирующую погрешность элемента радиоэлектроники.

9. По результатам исследования определить класс точности для емкости  $C$ , исследованного конденсатора.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается метод измерения емкости конденсатора на основе переходного процесса?

2. Сформулировать условия, позволяющие получить такую осциллограмму процесса заряда/разряда конденсатора в RC-цепи, которые позволят иметь визуально наиболее точные параметры измерения.

3. Какие классы точности для емкости  $C$  конденсаторов существуют в промышленной электронике?

### **Лабораторная работа 6**

#### **Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов**

Цель работы: изучить параметры, характеристики и работу выпрямителей вычислительной техники; научиться измерять эти параметры и характеристики.

Приборы и оборудование. Стенд для изучения, измерения выпрямительных схем, генератор, осциллограф.

#### **Теоретические сведения**

Для работы электронных устройств, в том числе вычислительной техники, необходимы источники постоянного напряжения. Производство переменных напряжений давно освоено на промышленном уровне; это осуществляют тепловые, гидро, атомные и др. электростанции. Такого производства постоянного напряжения не имеется. В решении этой задачи физики пошли по иному пути: они предложили несколько способов преобразования переменных напряжений в постоянные. Познакомимся с одним из них, который широко используется в технике.

В промышленной сети действует гармоническое напряжение, которое математически отображается так:

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

где:  $U_m$  - амплитудное напряжение;  $\omega$  - циклическая частота, определяемая выражением  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ;  $T$  и  $f$  - соответственно, период колебаний напряжения и частота сети;  $\varphi$  - начальная фаза;  $t$  - текущее время. График постоянного напряжения представляет прямую. Рассмотрим, как переменное напряжение рисунка 1 а можно "привести" к прямой или квази- прямой.

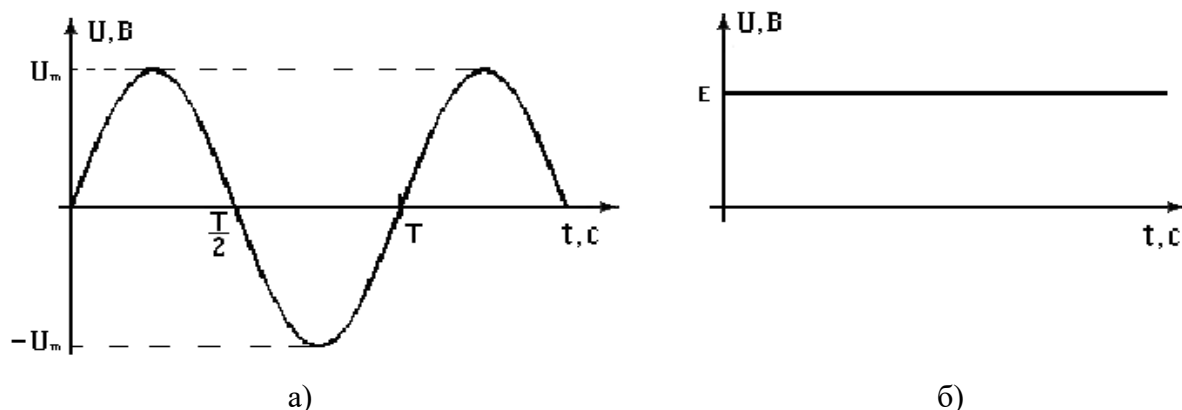


Рисунок 1. - а) график напряжения сети; б) график напряжения источника питания постоянного тока

Простейшим выпрямителем является полупроводниковый диод, принцип работы которого основан на работе р-п перехода. Он имеет два электрода: анод и катод. Его выпрямительные свойства определяются вольт-амперной характеристикой:  $I = f(U)$ .

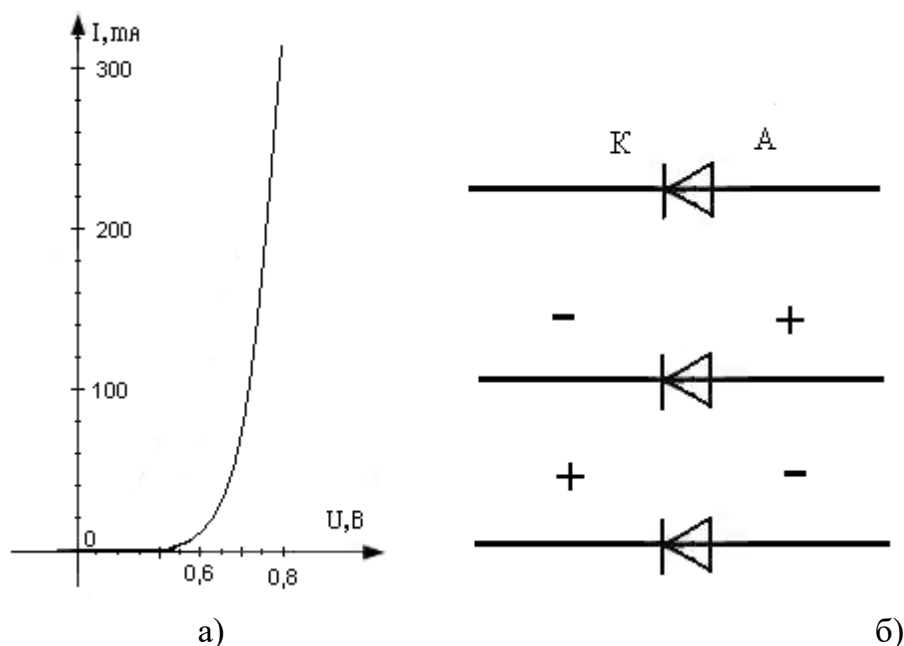


Рисунок 2. - а) вольт-амперная характеристика выпрямительного диода; б) открытое и закрытое состояние диода

Типичная вольтамперная характеристика выпрямительного диода приведена на рисунке 2 а. Как следует из графика, если к аноду диода подключить положительное напряжение, а к катоду " – ", то ток диода отличен от нуля: говорят, что он находится в открытом состоянии. При обратной полярности напряжения на электродах, когда на аноде " – ", а на катode " + ", диод ток не проводит. В этом случае говорят, что он заперт (рисунок 2 б). Рассмотрим процесс "выпрямления" переменного тока.

Если собрать электрическую цепь согласно рисунку 3 а и подать на ее вход синусоидальное напряжение (рисунок 1 а), то на выходе схемы (резистор  $R_H$ ) появится напряжение, изображенное на рисунке 3 б. Эта электрическая схема является схемой однополупериодного выпрямителя.

В полупериоды:  $0 - T/2$ ;  $T - 3T/2$  на аноде диода положительное напряжение, а на катode — отрицательное; диод открыт и пропускает ток. В полупериоды:  $T/2 - T$ ;  $3T/2 - 2T$  полярность напряжений на электродах меняется: на аноде появляется " – ", на катode " + ", диод закрывается. В это время ток через диод равен нулю. Напряжение  $U_{\text{вых}}$  является выпрямленным однополярным. Оно далеко не постоянное, в виде графика рисунка 3 б, но его среднее выпрямленное значение  $U_{\text{н ср}}$  отлично от нуля и определяется площадью между графиком функции и осью абсцисс.

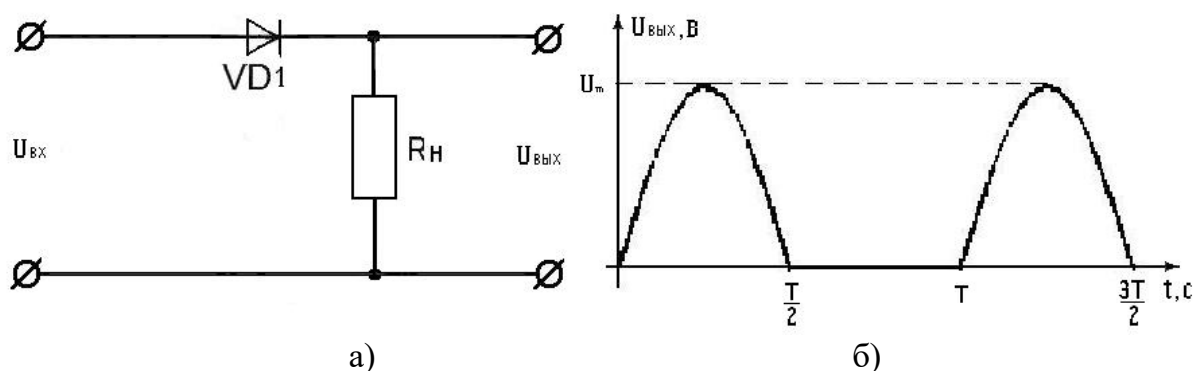


Рисунок 3. - а) электрическая схема однополупериодного выпрямителя; б) график выходного напряжения однополупериодного выпрямителя

Если найти  $U_{\text{н ср}}$  за период времени  $T$  для  $U_{\text{вх}}$  (рисунок 1 а), то оно равно нулю, поскольку положительный полупериод напряжения будет скомпенсирован отрицательным. Для напряжения рисунка 3 б среднее выпрямленное значение определяется так (2):

$$U_{\text{н ср.}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^T U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \quad (2)$$

Как видим, среднее выпрямленное напряжение  $U_{\text{н ср}}$  рассмотренного выпрямителя есть величина постоянная. Она будет постоянной и различной для других схем выпрямителей, поэтому ее используют для оценки эффективности



процесса выпрямления. Это значит, что выпрямленному переменному напряжению можно ставить в соответствие некоторое постоянное  $U_{н\ ср}$  и по его величине оценивать свойства выпрямителя.

Однополупериодный выпрямитель выпрямляет ток в течение полупериода входного синусоидального напряжения. Вполне очевидно, что если выпрямление осуществлять и в промежутки времени:  $T/2 - T$ ,  $3T/2 - 2T$  и т.д., то возрастет  $U_{н\ ср}$ , поскольку возрастет площадь, ограниченная графиком выпрямленного напряжения. Эта задача была решена на основе конструирования электрических схем. При построении выпрямителей в соответствии схем рисунков 4 а и 4 б возможно получить двухполупериодное выпрямленное напряжение. На схеме рисунка 4 а представлен мостовой двухполупериодный выпрямитель; на схеме рисунка 4 б — двух- полупериодный выпрямитель со средней точкой. Несмотря на различие обеих схем, они имеют одинаковое по форме выпрямленное напряжение  $U_{в\ вых}$  (рисунок 5 в).

При работе мостовой схемы одна диагональ моста входная, на нее подается напряжение, которое следует выпрямить, с другой диагонали снимается выпрямленное напряжение. В полупериоды времени  $0 - T/2$ ,  $T - 3T/2$  и т.д. (рисунок 1 а) оказываются открытыми диоды: VD2 и VD3; диоды VD1 и VD4 в это время имеют положительное напряжение на своих катодах и поэтому оказываются закрытыми. В полупериоды времени  $T/2 - T$ ,  $3T/2 - 2T$  открытыми оказываются диоды VD1 и VD4; диоды VD2 и VD3 в это время закрыты. Таким образом, диоды попарно оказываются открытыми, либо закрытыми, но в отличие от однополупериодного выпрямителя выпрямление осуществляют в оба полупериода времени.

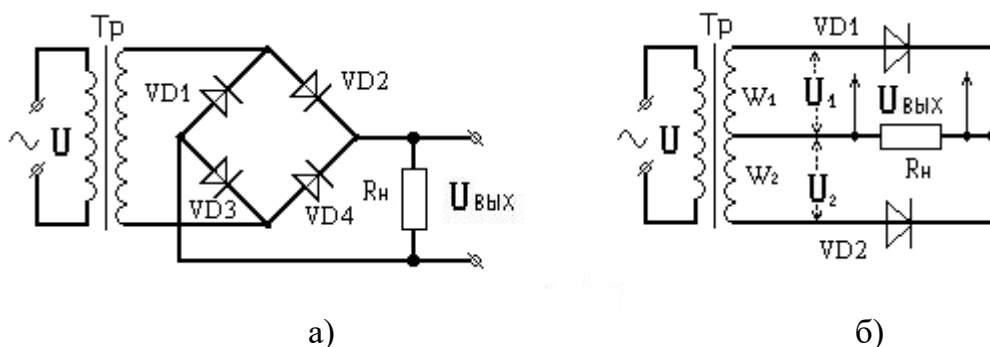


Рисунок 4. - а) мостовой двухполупериодный выпрямитель; б) двух- полупериодный выпрямитель со средней точкой

Для работы выпрямителя со средней точкой необходимо два диода и трансформатор с двумя одинаковыми обмотками. Графики напряжений на обмотках трансформатора  $w_1$  и  $w_2$  с соответствующими напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  и выпрямленное переменное напряжение приведены на рисунке 5. В один полупериод времени синусоидального напряжения оказывается открытым диод VD1, в другой — VD2, в результате на нагрузке  $R_n$  появляется напряжение рисунка 5 в.

Выходные напряжения выпрямителей однополярны и далеки от прямой, но являются постоянными пульсирующими. Согласно рисунку 3 б и рисунка 5 в пульсации  $U_{\text{вых}}$  составляют величину  $U_m$ .

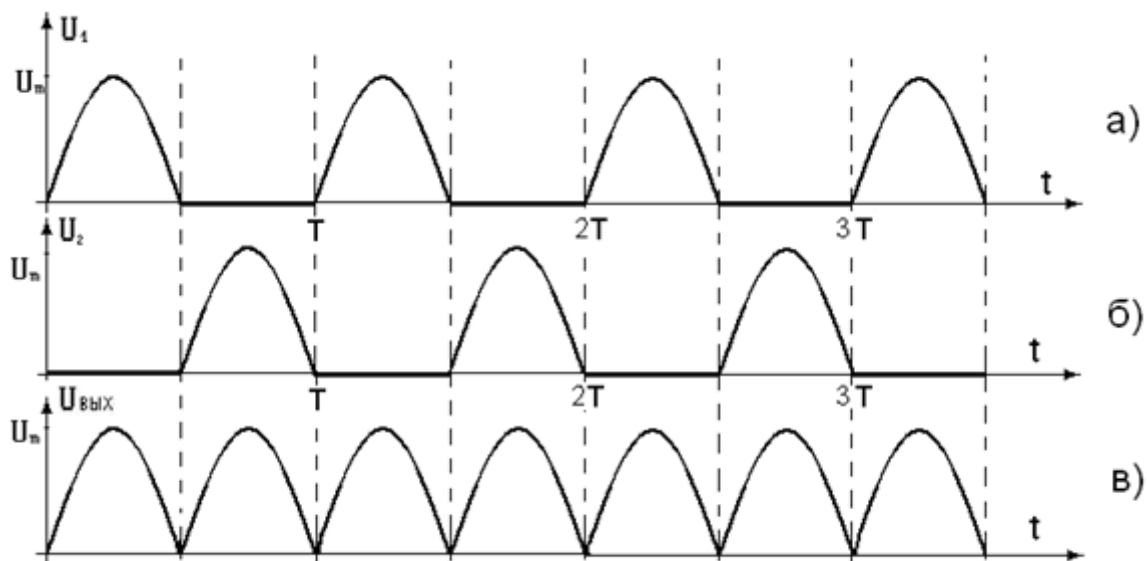


Рисунок 5. - а) напряжение трансформатора обмотки  $w_1$ ; б) напряжение трансформатора обмотки  $w_2$ ; в) выпрямленное напряжение на нагрузке  $R_n$

При этом падением напряжения на диодах пренебрегают, так как в открытом состоянии напряжение p-n перехода не более 0,8 В; в то время как выпрямители строят для напряжений единиц, десятков, сотен ... вольт.

Но в источниках напряжений не ограничиваются таким качеством выпрямления и уменьшают пульсации  $U_{\text{вых}}$ . Изучим еще один метод, позволяющий повысить качество выпрямляемого напряжения, который используется в компьютерной технике, телевидении и т.д. Суть метода в следующем.

Напряжение сети частотой 50 Гц с помощью электронных устройств с высоким КПД преобразуют в импульсное напряжение частотой 1...160 кГц вида меандр (рисунок 6 б).

Меандр — прямоугольные импульсы, у которых длительность высокого напряжения равна длительности низкого ( $t_b=t_n$ ). Это напряжение-меандр выпрямляют традиционными выпрямителями, приведенными на рисунках 3 а, 4 а, 4 б. Чтобы оценить эффективность выпрямления этого метода, рассмотрим графики выпрямления напряжения частотой 50 Гц для синусоидального тока и 1 кГц для импульсного (рисунок 6). Поскольку  $f = 1/T$ , то период колебаний тока промышленной сети  $f = 1/50$  Гц = 20 мС. Частоте 1 кГц соответствуют импульсы длительностью в 1 мС. На рисунке 6 а приведено одно колебание гармонического напряжения периода  $T_{50\text{Гц}} = 20$  мС; на рисунке 6 б — импульсное напряжение с периодом  $T_{1\text{кГц}} = 1$  мС, той же амплитуды. После их выпрямления однополупериодным выпрямителем, получим напряжения указанные на графиках рисунка 6 в и рисунка 3 б. Нетрудно видеть, что площадь

выпрямленного синусоидального напряжения за время 20 мс меньше площади выпрямленного меандра за то же время. Это значит, что при одинаковой амплитуде обоих напряжений  $U_{н\ ср}$  прямоугольных импульсов выше, чем у синусоиды; причем оно будет возрастать с повышением частоты выпрямляемых импульсов.

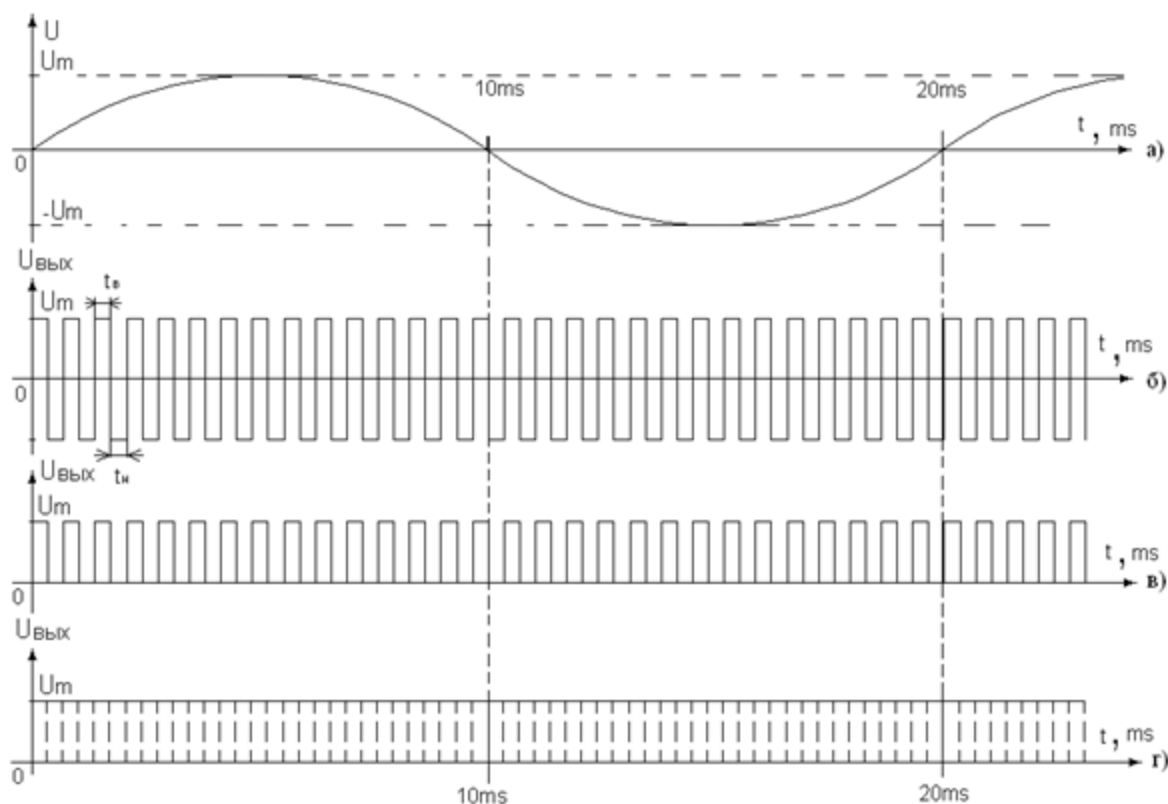


Рисунок 6. - а) выпрямляемое гармоническое напряжение; б) выпрямляемое напряжение-меандр; в) однополупериодное выпрямленное напряжение-меандр; г) двухполупериодное выпрямленное напряжение-меандр.

Еще более эффективен такой подход при двухполупериодном выпрямлении. Однако, выпрямленное импульсное напряжение и выпрямленное синусоидальное — далеки от идеального постоянного напряжения. Чтобы их приблизить к графику прямой линии, используют фильтры: устройства, на которые подается выпрямленное напряжение, а снимается постоянное, график которого более близок к прямой. В качестве фильтров используют элементы, способные накапливать энергию: катушки индуктивности и конденсаторы. Первые могут накапливать энергию поля магнитного; вторые — электрического. Иногда строят фильтры, одновременно содержащие оба эти элемента. Например, при работе в схеме однополупериодного выпрямителя, в интервалы времени:  $0 - T/2$ ,  $T - 3T/2$  фильтр, конденсатор или катушка индуктивности, накапливает энергию; в полупериоды  $T/2 - T$ ,  $3T/2 - 2T$  — отдает ее в нагрузку. Рассмотрим процесс фильтрации на основе конденсатора.

Пусть на вход выпрямителя с фильтром (рисунок 7 а) поступают импульсы (рисунок 6 б). Если бы в схеме не было конденсатора С, то напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  имело бы вид, изображенный на рисунке 6 в, но фильтр

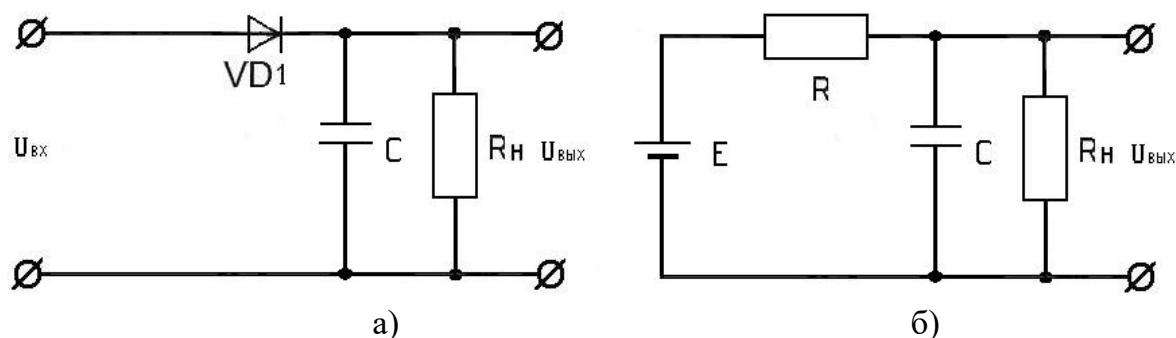
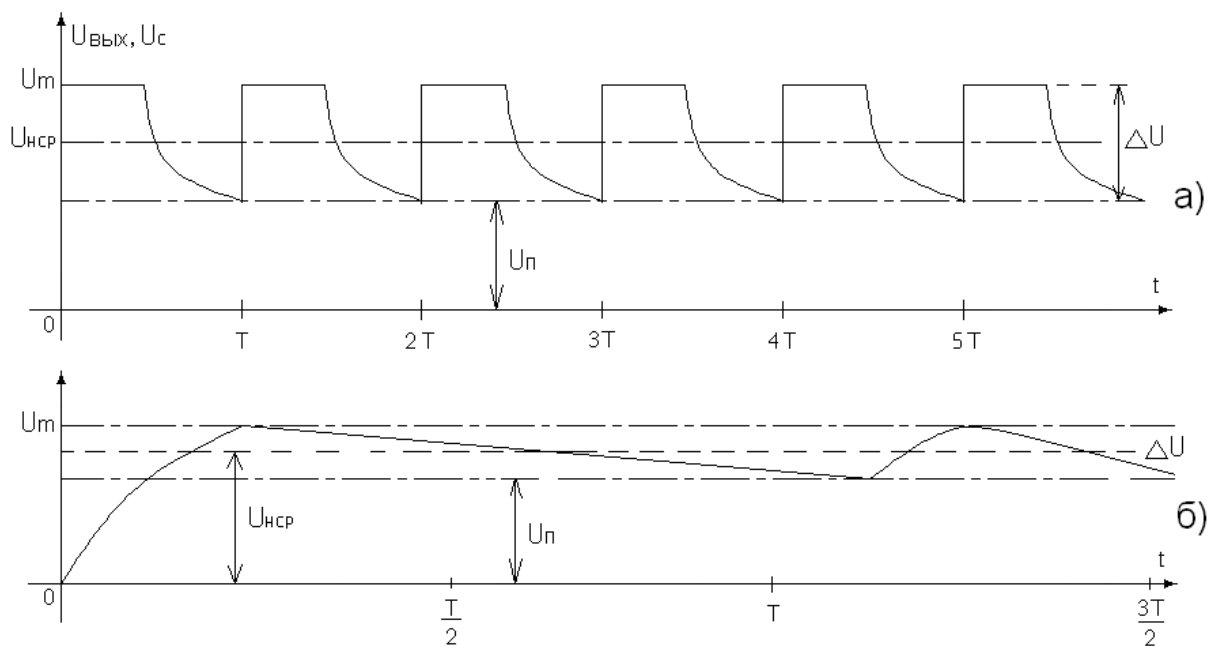


Рисунок 7. а) выпрямитель с емкостным фильтром; б) эквивалентная схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром.

изменяет его. Конденсатор заряжается в полупериоды времени  $0 - T/2$ ,  $T - 3T/2$  и т.д. и разряжается в течение времени  $T/2 - T$ ,  $3T/2 - 2T$  и т. д. Если эти процессы отобразить графически для каждого импульса, то получим выпрямленное напряжение вида, изображенного на рисунке 8 а.



$\Delta U$  – пульсации напряжения;  $U_{\text{п}}$  – постоянная составляющая выпрямленного напряжения;  $U_{\text{нсп}} = U_{\text{п}} + \Delta U/2$ .

Рисунок 8. - а) напряжение на нагрузке R<sub>н</sub> выпрямителя импульсов; б) напряжение на нагрузке R<sub>н</sub> выпрямителя гармонических токов.

Аналогичные процессы происходят при выпрямлении синусоидальных напряжений (рисунок 8 б). Нетрудно заметить, что применение фильтра повышает  $U_{\text{нсп}}$ , поскольку площадь выпрямленного напряжения, ограниченная графиком и осью абсцисс увеличивается. При этом уменьшаются пульсации  $\Delta U$  и

появляется область постоянного напряжения  $U_{п.}$ . Таким образом, фильтр на выходе выпрямителя отфильтровывает постоянное напряжение и уменьшает пульсации переменного, тем самым, приближая выпрямленное напряжение к идеальному постоянному напряжению. Чем больше величина постоянной составляющей напряжения и меньше пульсации, тем более качественное выпрямленное напряжение. Вполне очевидно, что чем больше емкость конденсатора  $C$ , тем более эффективно осуществляется выпрямление переменного тока в постоянный, так как разряд конденсатора большей емкости при прочих равных условиях будет происходить медленнее.

Индуктивные фильтры используют в выпрямителях с большими токами, так как при этом эффективно используются свойства катушки индуктивности – создавать магнитное поле. Выпрямительные устройства характеризуются следующими параметрами и характеристиками:

1. Максимальные входное  $U_{вх}$  и выходное  $U_{вых}$  напряжения выпрямителя.
2. Максимальный входной  $I_{вх}$  и выходной  $I_{вых}$  токи выпрямителя.
3. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения  $U_{п.}$
4. Пульсации выходного напряжения выпрямителя  $\Delta U$ .
5. Коэффициент пульсаций выходного напряжения:  $\Delta U / U_{п.}$
6. Среднее выпрямленное значение напряжения  $U_{н ср} = U_{п.} + \Delta U / 2$ .
7. Нагрузочная характеристика выпрямителя:  $U_{вых} = f(I_{н.})$ .
8. Внутреннее дифференциальное сопротивление выпрямителя:  $r = \Delta U_{вых} / \Delta I_{н.}$

### Стенд для однополупериодного выпрямителя напряжений и токов.

Собран на основе диода  $VD_1$  (рисунок 9). В качестве нагрузки подключен резистор  $R_{н.}$ . Для изучения влияния нагрузки на величину выпрямленного напряжения используются резисторы  $R_1 - R_5$ . Емкости  $C_1, C_2$  и  $C_3$  разных номиналов; позволяют оценить влияние величины емкости фильтра  $C$  на уровень пульсаций выходного напряжения. Переключатель  $\Pi$  необходима для подключения амперметра. Переключатель  $\Pi$  отключается и на ее место включается амперметр. Кроме диода-выпрямителя в исследованиях используется генератор гармонических и прямоугольных сигналов, а также осциллограф и амперметр.

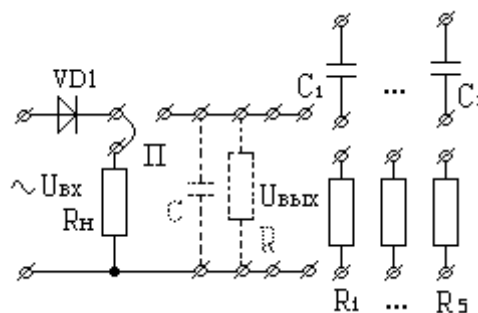


Рисунок 9. – Элементы ( $VD_1, R, C$ ) для составления цепи однополупериодного выпрямителя

## Стенд для двухполупериодного выпрямителя напряжений и токов.

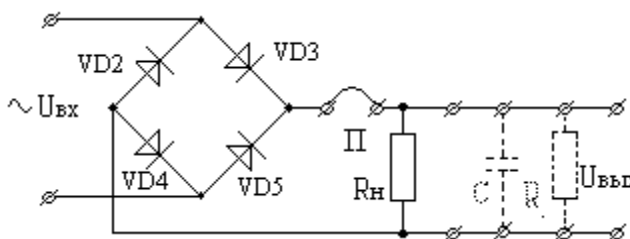


Рисунок 10. – Диодный мост и элементы (R, C) для составления двух- полупериодного выпрямителя

Цепь собрана на основе диодов  $VD_2 - VD_5$ . Как и в предыдущей схеме,  $R_H$  – нагрузочный резистор, к которому могут подключаться нагрузочные сопротивления  $R$  и емкостный фильтр  $C$  на основе конденсаторов. Приборы для измерений те же: генератор гармонических и импульсных сигналов, осциллограф и амперметр.

### Порядок выполнения работы.

Измерение параметров и характеристик однополупериодного выпрямителя.

#### Уровень А.

1. На вход схемы выпрямителя от генератора гармонических сигналов подайте напряжение  $5 \sin 314t$  В. Осциллографом наблюдайте выходное напряжение и измерьте величину его пульсаций. Результаты измерений представьте графиками.

2. Изменяя частоту генератора в соответствии данных таблицы 1, измерьте выходное напряжение для каждого из значений при нагрузке  $R_H$ . Эксперимент проведите и для трех других значений сопротивления нагрузки, параллельно подключая к  $R_H$  (по согласованию с преподавателем) резисторы из числа имеющихся на стенде. Результаты занесите в таблицу 1. По полученным данным постройте графики зависимости  $U_{\text{вых}} = \psi(f)$ .

Таблица 1

$f * 10^3$ Гц	0,05	0,5	1	5	15	40	100	150
$U_{\text{м вых}},$ В	$R_H$							
	$R_{H1}$							
	$R_{H2}$							
	$R_{H3}$							

3. Подключите емкость  $C_1$  параллельно нагрузке и измерьте параметры выпрямителя в соответствии таблицы 2.

Таблица 2.

C, мкФ	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
$\Delta U$ , В			
U <sub>п</sub> , В			
( $\Delta U / U_{п}$ )			
$U_{н\text{ ср}} = U_{п} + \Delta U/2$ , В			

4. Включите на выходе выпрямителя емкостный фильтр C<sub>1</sub>. Подключая последовательно резисторы R<sub>1</sub> – R<sub>5</sub> параллельно нагрузочному резистору R, проведите с помощью амперметра измерение тока нагрузки I<sub>н</sub>. Для этого вместо перемычки П включите амперметр. По полученным данным постройте зависимость  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}})$ .

Таблица 3

	R <sub>н</sub>   R <sub>1</sub>	R <sub>н</sub>   R <sub>2</sub>	R <sub>н</sub>   R <sub>3</sub>	R <sub>н</sub>   R <sub>4</sub>	R <sub>н</sub>   R <sub>5</sub>
R, Ом					
U <sub>вых</sub>					
I <sub>н</sub>					

### Уровень В.

Выполните задания уровня А и п. 5.

5. В соответствии плана исследования для однополупериодного выпрямителя на основе электрической цепи, представленной на рисунке 10, разработайте методику и проведите исследование двухполупериодного выпрямителя.

### Уровень С.

Выполните задания уровня А, В и п. 6.

6. Выберите основные параметры, на основе которых возможно оценить эффективность выпрямителя переменных токов и напряжений. Осуществите такое сравнение для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.

### **Контрольные вопросы.**

1. Основные параметры выпрямительных устройств и их погрешности.
2. Методика измерения напряжений выпрямителя  $\Delta U$ ; U<sub>п</sub>; U<sub>н ср</sub>.
3. Предложите методику измерения внутреннего дифференциального сопротивления диода-выпрямителя r.
4. На основе проведенных измерений обоснуйте эффективность двухполупериодной схемы выпрямления по сравнению с однополупериодной и оцените ее на погрешности по параметрам напряжения и тока.
5. Возможно ли построить зависимость  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}})$ , не прибегая к измерениям амперметра, а пользуясь показаниями осциллографа?

## Лабораторная работа 7

### Обработка результатов прямых равноточных измерений с многократными наблюдениями посредством EXCEL

#### Теоретические сведения

Измерение – процесс сравнения некоторой величины с ее эталоном, в результате которого определяется численное значение этой величины и возможная ошибка - погрешность измерения. Она появляется из-за неточности измерительных приборов, округления измеренных результатов, изменения температура окружающей среды, давления, влажности и других причин, которые могут иметь систематический или (и) случайный характер. Все это обуславливает вероятностный характер процесса измерения и, если проведенные измерения подчиняются нормальному распределению, то процесс измерения предполагает:

- найти наиболее вероятное значение измеряемой величины;
- оценить погрешность;
- указать надежность результата.

При этом результат измерения записывают вместе с погрешностью и вероятностью (1):

$$x = x_{\text{изм}} \pm \Delta x; P \quad (1)$$

Числовое значение результата измерения  $x_{\text{изм}}$  должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности  $\Delta x$ . Эту запись следует понимать как неравенство (2):

$$x_{\text{изм}} - \Delta x \leq x \leq x_{\text{изм}} + \Delta x \quad (2)$$

Интервал значений  $x$  - доверительный интервал измерения;  $P$  – его доверительная вероятность (надежность). Погрешность  $\Delta x$  равна полуширине доверительного интервала и определяется на основе расчетов данных измерений. Так как, измерение какой то величины предполагает многократное проведение наблюдения и получение массива значений, то обработка результатов измерений основывается на использовании математической статистики и теории вероятностей.

Величина погрешности  $\Delta x$  называется абсолютной, но она не всегда удобна для оценки точности измерений. Несколько большую информацию об измерении имеет относительная погрешность, указывающая, какую долю абсолютная погрешность составляет от измеренной величины (3):

$$\varepsilon = \Delta x / \Delta x_{\text{ист}} \approx \Delta x / \Delta x_{\text{изм}} \quad (3)$$



Поскольку величина погрешности измерения  $\Delta x$  имеет статистический характер, то и относительная погрешность  $\varepsilon$  так же определяется с доверительной вероятностью.

Возможны измерения, когда неизвестен вид функции распределения погрешностей, но есть необходимость дальнейшей обработки результатов измерений. В этом случае форма записи результатов измерений предполагает следующие параметры:  $x_{изм}$ ,  $\sigma$ ,  $n$ ,  $\theta$ ,  $P$ . Величины  $x_{изм}$  и  $P$  имеют тот же смысл, что и в выражениях (1) и (2);  $\sigma$  – среднее значение среднеквадратичного отклонения  $n$  измерений.  $\theta$  – границы неисключенной систематической погрешности. Такие измерения в данной работе мы рассматривать не будем. Объектом нашего изучения будут измерения, описываемые нормальным распределением погрешностей и, которые могут представляться в виде (1). Их особенность в том, что в ходе таких измерений будет небольшое количество измерений с большой величиной отклонения от среднего значения и будет значительное большинство измерений с небольшим отклонением от среднего значения, либо равные среднему значению.

Погрешности измерений классифицируются по нескольким признакам (рисунок 1).

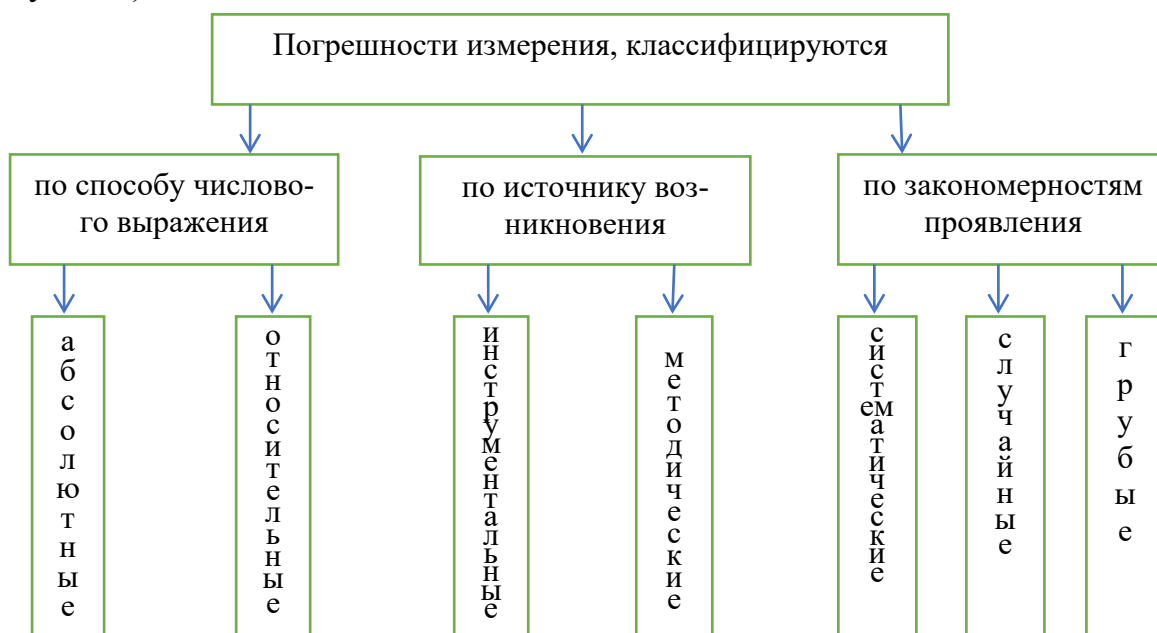


Рисунок 1. Классификация погрешностей измерений

Их взаимозависимость гораздо сложнее. Например, инструментальная погрешность, обусловленная *неточностью средств измерений*, согласно ГОСТ 8.009-84, имеет в своей структуре основную, дополнительную, обусловленную взаимодействием средств измерений и объекта измерений и динамическую погрешности.

Основная погрешность показывает отличие действительной функции преобразования средств измерений в нормальных условиях от номинальной. Но-

минальная статическая характеристика преобразования - это функция преобразования, которую должен иметь измерительный прибор при нормальных условиях внешней среды и неизменных значениях (медленно меняющихся) значениях входного сигнала.

По способу числового выражения основная погрешность разделяется на *абсолютную, относительную и приведенную*.

По характеру влияния на функцию преобразования основная погрешность имеет *аддитивную и мультипликативную* составляющие, которые, в свою очередь, могут иметь *систематическую и случайную* компоненты.

Дополнительная погрешность обусловлена реакцией средств измерений на изменения внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала. Неинформативным параметром входного сигнала называется параметр входного сигнала, не используемый для передачи значения измеряемой величины. Например, при измерении частотомером частоты сигнала указывается уровень входного сигнала.

Погрешность, обусловленная взаимодействием средств измерений и объекта измерений. Это когда подключение средства измерения изменяет режим работы объекта измерения.

Динамическая погрешность обусловлена реакцией средства измерения на скорость (частоту) изменения входного сигнала и зависит от свойств инерционности средства измерения, частотного спектра входного сигнала, изменений нагрузки и других величин.

Как видим, классификация измерений сложнее, чем это приведено на рисунок 1, где нет связей между инструментальной погрешностью и погрешностями: абсолютной, относительной, систематической, случайной, грубой и другими. Кроме того, инструментальная погрешность имеет составными погрешности: основную, дополнительную, динамическая и др, что указывает на возможность и других подходов в их классификации. Заметим и то, что выше рассмотрены погрешности средств измерений. *Погрешности измерений*, более широкое понятие, чем *погрешности средств измерений*, при этом, последний, являются компонентами первых. Как следствие, в метрологии нет универсальных подходов к процессу измерений. К каждому измерению следует подходить дифференцированно, с учетом его особенностей.

В сфере электро-, радио- измерений обычно учитываются *систематические, случайные и грубые* погрешности. В них, в качестве составных погрешностей, учитываются инструментальные и методические, которые могут представляться в виде абсолютных и относительных величин. Так как в процессе измерений случайные и систематические погрешности проявляются одновременно, поэтому погрешность результата в электро-, радио- измерениях представляют в виде суммы погрешностей систематической и случайной (4):

$$\Delta = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{сл}} \quad (4)$$

Систематические погрешности  $\Delta_{\text{сист}}$ , как правило, проявляются стабильно и обычно известны в виде поправочных графиков к прибору, таблиц или формул. Если возможно, их учитывают аппаратными средствами при разработке и создании средств измерений. Такие погрешности называют исключенными. Однако бывают систематические погрешности, которые аппаратными методами исключить невозможно. Их называют неисключенными. Случайные погрешности проявляются хаотично и имеют вероятностный характер. Рассмотрим оба вида погрешностей.

### Случайные равноточные погрешности

Прямые многократные наблюдения называются равноточными (равнорассеянными), если они являются независимыми, одинаково распределенными случайным образом, выполняются одним и тем же наблюдателем в одних и тех же условиях, одним и тем же прибором.

Согласно ГОСТ 8.207 – 76 статистическая обработка группы результатов наблюдений при равноточных измерениях осуществляется в два этапа:

- проверяется гипотеза о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению;
- определяется погрешность результата измерения.

Случайная погрешность определяется соотношением (5):

$$\Delta_{\text{сл}} = \sigma t_{n,P} \quad (5)$$

где  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} \quad (6)$$

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение  $n$ -измерений (6);

$\sigma_x$  – СКО отдельного наблюдения; оно же стандартное отклонение отдельного измерения.

$t_{n,P}$  – коэффициент Стьюдента.

$n$  – количество измерений;  $P$  – доверительная вероятность;

$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$  - отклонение  $i$ -го измерения от среднего значения. Если проведено достаточно большое число измерений  $n$ , то положительные и отрицательные значения  $\Delta x_i$  появляются одинаково часто, поэтому распределение  $\Delta x$  около среднего значения будет симметричным.

$\langle x \rangle$  - среднее значение  $n$ -измерений; оно же математическое ожидание  $m_x$ ;  $x_i$  – результат  $i$ -го измерения;

Чтобы уяснить смысл величины  $t_{n,P}$  входящей в выражение (5), укажем еще одну особенность среднеквадратичного отклонения отдельного измерения  $\sigma_x$ . Оказывается, что если провести серию из  $n$  измерений, которые подчиняются нормальному распределению, и для них определить  $\sigma_x$ , то приблизительно в 68% случаев отклонения  $\Delta x_i$  по модулю не превысят эту величину  $\sigma_x$ , а в 32%

превысят ее. Это означает, что отклонение измерения  $\Delta x_i$  с вероятностью 68% лежит в интервале  $[-\sigma_x; +\sigma_x]$ . Для интервала  $[-2\sigma_x; +2\sigma_x]$  эта вероятность уже будет равна 95%, а для  $[-3\sigma_x; +3\sigma_x]$  – 99,7%. Тогда для любой вероятности  $P$  доверительный интервал значений  $[-\lambda_p \sigma_x; +\lambda_p \sigma_x]$  определяется числовым множителем  $\lambda_p$ , зависящем от величины доверительной вероятности (надежности)  $P$ . Из выше рассмотренного следует, что  $\lambda_{0,68} = 1,0$ ;  $\lambda_{0,95} = 2,0$ ; а  $\lambda_{0,997} = 3,0$ . Однако величина СКО отдельного измерения  $\sigma_x$ , и - совокупности измерений  $\sigma$ , зависят от числа проведенных наблюдений  $n$ . Этого не учитывает коэффициент  $\lambda$ . Англичанин Уильям Сили Госсет, изучая проблему повышения урожайности ячменя, предложил таблицу, которая исправляла указанный недостаток. Эта таблица оказалась полезной не только в сельском хозяйстве, но и статистической науке и теории вероятностей. Автор опубликовал свою работу под псевдонимом «Стьюдент». Его таблица будет использована нами и при оценке погрешности измерений. В отличие от коэффициента  $\lambda$ , коэффициент Стьюдента определяется не только на основе доверительной вероятности  $P$ , но и числа проведенных наблюдений  $n$ . В теории вероятностей и математической статистике коэффициенты Стьюдента обозначаются как  $t_{n,P}$ , которые, в отличие от  $\lambda_p$ , не являются целочисленными значениями. Предлагаемая таблица 1 использует значения доверительной вероятности  $P$ , которые часто используются в практической науке и технике, и которыми мы будем пользоваться в своих расчетах.

Таблица 1. Коэффициенты Стьюдента

n	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,98	P = 0,99	P = 0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,3	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
$\infty$	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Существуют и более подробные таблицы коэффициентов Стьюдента  $t_{n,P}$ , но они дают хорошие результаты при небольшом числе измерений  $n$

### Не исключенные систематические погрешности

Как ранее отмечено, помимо исключенных систематических погрешностей, могут быть и неисключенные. Их вычисляют путем построения композиции распределения составляющих неисключенных систематических погрешностей. При равномерном распределении последних, доверительные границы неисключенных систематических погрешностей вычисляются по ниже приведенной формуле (28), в которой  $k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $P$ ;  $m$  – количество суммируемых неисключенных погрешностей. Коэффициент  $k$  для вероятности  $P$  определяется из графика, представленного на рисунке 1 стр. 68. Доверительную вероятность  $P$  для неисключенной систематической погрешности принимают ту же, что и при вычислении доверительных границ случайной погрешности. Для проводимых оценок измерений будем пользоваться данными соответствующими коэффициенту  $k_{ср}$ .

$$\Delta_{\text{сист.неиск}} = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2} \quad (7)$$

### Погрешность прибора

Инструментальная погрешность прибора закладывается в его класс точности. *Класс точности прибора* – это отношение предельной абсолютной погрешности прибора  $\delta$  к максимальному значению измеряемой им величины  $x_{max}$  (8); может характеризоваться процентным выражением, либо безразмерной величиной:

$$k = \frac{\delta}{x_{max}} 100\% \quad (8)$$

У многопредельного прибора эта величина определяется на рабочем пределе. Для радиоизмерительных приборов возможны следующие классы точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 4,0.

Величины  $k$  и  $\delta$  задаются с вероятностью  $P = 0,997$ . Это предполагает, что полуширина доверительного интервала, в котором может быть заключена измеряемая величина равно  $3\sigma$ ; где,  $\sigma$  – стандартное отклонение  $n$  измерений. Для произвольной надежности  $P$  абсолютная погрешность рассчитывается соотношением (9). В ходе измерений часто ограничиваются  $P = 0,95$ ; которой соответствует полуширина  $2\sigma$  и выбирают приблизительно, усредненное значение  $t_{n,P} \approx 2$ .

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{t_{n,P}}{3,0} \delta = \frac{t_{n,P}}{3,0} \frac{k}{100\%} x_{max} \quad (9)$$

Величина 3,0 соответствует доверительной вероятности  $P = 0,997$ , безотносительно числа проведенных измерений.  $k$  – класс точности измерительного прибора в процентном выражении;  $x_{max}$  – максимальное значение рабочего предела прибора;  $\delta$  – предельная абсолютная погрешность, которая может указываться в паспортных данных прибора.

#### Погрешность округления измерения

Как правило, измерения могут осуществляться приборами со стрелочной шкалой, либо электронным цифровым индикатором. Если результаты измерения фиксируются по стрелочной шкале, то учитываются те ошибки, которые вызваны несовершенством органов чувств экспериментатора и округлением полученных цифровых данных. Если же измерения проводятся на основе цифровой шкалы измерительного прибора, то точность считывания результата определяется последним разрядом цифры. Ее следует учитывать, когда последний разряд цифровой шкалы прибора является изменяющимся. В случае, когда последний разряд цифровой индикации стабилен, погрешностью округления измерения цифрового прибора можно пренебречь. В обоих случаях эта погрешность (10):

$$\Delta_{окр} = P * \frac{h}{2} \quad (10)$$

где,  $h$  – величина минимального значения одного деления на измерительной шкале стрелочного прибора. Если измерение осуществляется цифровой шкалой, то это величина первого «плавающего» разряда.

#### Результирующая погрешность измерения

Как видим, погрешность измерения, величина, зависящая от многих факторов, одни из которых являются доминирующими, другие мало влияют на результат измерений. Это предполагает дифференцированный подход в ходе измерений. Одна из формул, описывающих измерения в сфере электро-, радиоэлектроники учитывает следующие компоненты (11):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta_{сл}^2 + \Delta_{пр}^2 + \Delta_{окр}^2 + \Delta_{сист}^2} \quad (11)$$

где,  $\Delta_{сл}$  – случайная погрешность;  $\Delta_{пр}$  – приборная;  $\Delta_{окр}$  – округления;  $\Delta_{сист}$  – систематическая.

В случаях, когда некоторыми видами погрешностей в ходе обработки результатов измерений можно пренебречь, некоторые компоненты выражения (9) обращаются в нуль и формула упрощается.

Рассмотрим пример обработки результатов измерений.

### Пример.

В процессе измерения напряжения в компьютере на пятивольтовых логических элементах, получены следующие значения величин на пределе шкалы 10 В (таблица 2). Класс точности прибора  $k = 2,5$ . Надежность измерения принять 95%. Неисключенная систематическая погрешность, обусловленная нестабильностью напряжения питания, составляет 0,02 В; изменением температуры окружающей среды – 0,01 В.

Найти абсолютную и относительную погрешности проведенного измерения по компонентам случайной, приборной, округления и систематической погрешностей, если результаты наблюдений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Ряд значений измерения напряжения

n	1	2	3	4	5	6	7
$U_{\text{изм}}$	5,000	5,054	5,043	5,151	4,930	4,864	5,200
n	8	9	10	11	12	13	
$U_{\text{изм}}$	5,116	4,840	4,867	5,003	4,986	5,056	

1. Случайная погрешность определяется выражением (5):  $\Delta_{\text{сл}} = \sigma t_{nP}$ .

Коэффициент Стьюдента  $t_{n,P}$  находим по таблице 1; он зависит от числа проведенных измерений  $n$  и доверительной вероятности  $P$ . Определение  $\sigma$  – СКО проведенных измерений осуществляется на основе следующей последовательности действий:

а) находим среднее значение проведенных измерений напряжения:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 5,008 \text{ В}$$

б) определяем случайные отклонения  $\Delta x_i = \langle x \rangle - x_i$  для  $n$  измерений;

в) проверяем равенство нулю алгебраической суммы всех значений  $\Delta x_i$ , что будет отвечать одному из условий нормального распределения измеренных величин напряжения:

$$\Delta x_i(+)\approx \Delta x_i(-)$$

г) определяем величину СКО  $n$ -измерений  $\sigma$  (6):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = 0,026776 \text{ В}$$

5. По полученным значениям  $\sigma$  и  $t_{nP} = 2,18$  находим случайную погрешность измерения:

$$\Delta_{сл} = \sigma t_{nP} = 0,0583 \text{ В}$$

2. Приборная погрешность. Определяем выражением (9), учитывая, что  $P = 95\%$ ;  $t_{n,P} = 2,18$ ; класс точности прибора  $k = 2,5$ ; максимальное значение шкалы на измеряемом пределе  $x_{max} = 10 \text{ В}$ .

$$\Delta x_{пр} = x_{max} \frac{t_{n,P}}{3,0} * \frac{k}{100\%} = 0,1816 \text{ В}$$

3. Погрешность округления измерения. Поскольку плавающей на цифровом индикаторе напряжения оказалась величина второго знака после запятой, то это соответствует 10 мВ. Тогда (8):

$$\Delta_{окр} = P * \frac{h}{2} = 0,95 * 0,005 = 0,0048 \text{ В}$$

4. Неисключенная систематическая погрешность. Согласно условию задания, она определяется двумя причинами: нестабильностью напряжения питания  $\Delta_{сист.1} = 0,02 \text{ мА}$  и изменением температуры окружающей среды –  $\Delta_{сист.2} = 0,01 \text{ ма}$ . По графику рис. 7 и формуле (28) находим:

$$\Delta_{сист} = 0,042933 \text{ В}$$

Результирующая погрешность измерения (9):

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_{сист}^2 + \Delta U_{сл}^2 + \Delta U_{пр}^2 + \Delta U_{окр}^2} = 0,1956 \text{ В}$$

Относительная погрешность измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} = 0,038$$

Результаты измерения.

$$U = \langle U \rangle \pm \Delta U = 5,008 \pm 0,196 \text{ В}; \quad \varepsilon = 0,038; \quad P = 0,95$$

Задание.

Выполнить обработку результатов измерений.



В ходе измерений проведено  $n$  наблюдений физической величины. Результаты наблюдений  $x_i (i=1, 2 \dots n)$  лежат в диапазоне, указанном для Вашего варианта и составляют выборочный размах:  $x_{max} - x_{min}$ . Считая измерения равноточными (проведенными одним оператором, одним и тем же прибором, при одних и тех же условиях), определить результат измерений:  $x = \langle x \rangle \pm \Delta x$ ;  $\varepsilon$ ;  $P$  физической величины Вашего варианта.

Выбор ряда измерений проводить таким образом, что бы положительные и отрицательные значения  $\Delta x_i$  появлялись одинаково часто, с тем, чтобы распределение  $\Delta x$  около среднего значения было симметричным и имело колоколообразную функцию. Значение  $x_{max}$  прибора имеет размерность величины, соответствующей Вашему варианту. Неисключенную систематическую погрешность, обусловленную изменением температуры окружающей среды, принять 0,1 % от  $\langle x \rangle$ .

#### Задания вариантов 1-26.

В-т	Число измерений $n$	Диапазон измерений	Величина	Доверительная вероятность $P$	$x_{max}$	Класс точности прибора $k$ , %
1	10	99,92...100,10	мВ	0,9	120	0,02
2	11	7,633...7,959	В	0,95	10	0,05
3	12	0,124... 0,156	А	0,99	0,3	0,1
4	13	10,021...10,038	мА	0,98	15	0,2
5	13	12,101...12,118	С	0,9	15	0,5
6	12	8,020...8,038	Ом	0,95	10	1,0
7	11	100,292 ... 100,324	кОм	0,99	150	2,5
8	10	10,492 ... 10,524	МОм	0,999	15	4,0
9	10	9,92...10,2	А	0,9	15	0,02
10	12	41,111...42,321	мС	0,99	50	0,05
11	13	110,01...110,12	мкФ	0,98	140	0,1
12	13	482,364...482,381	Гц	0,9	500	0,2
13	12	8,911...8,927	В	0,95	10	0,5
14	11	76,138...76,391	М	0,99	100	1,0
15	10	3,63...3,95	см	0,999	5	2,5
16	10	346,227...346,257	кГц	0,9	500	4,0
17	11	1,92...2,10	н	0,95	3	0,02
18	12	5,688...5,712	мС	0,99	10	0,05
19	13	89,134...89,210	мм	0,98	100	0,1
20	13	625,12...625,31	кН	0,98	1000	0,2
21	12	21,97...22,19	Гн	0,95	50	0,5
22	11	76,331...79,591	Дж	0,99	100	1,0
23	10	46,127...46,257	А	0,999	100	2,5
24	10	9,58...9,99	см	0,9	10	4,0
25	11	952,1...953,4	Ом	0,95	1000	0,02
26	12	47,20...48,42	мкС	0,99	50	0,05

## Лабораторная работа 8

### Оценка распределения измерений на принадлежность к нормальному распределению величин посредством EXCEL

#### Теоретические сведения

**Распределение случайной величины.** Если на улице случайных прохожих спросить о том, какой у них рост (вес, возраст, доход, и т.п.), а потом отсортировать всех людей по группам так, чтобы каждый попал в свой диапазон роста; затем посчитать число людей в каждой подгруппе (частоту попадания роста в данный диапазон), то получим данные для гистограммы (рисунок 1а), у которой вдоль оси  $Y$  – количество жителей данного роста; вдоль  $X$  – соответствующий диапазон роста.

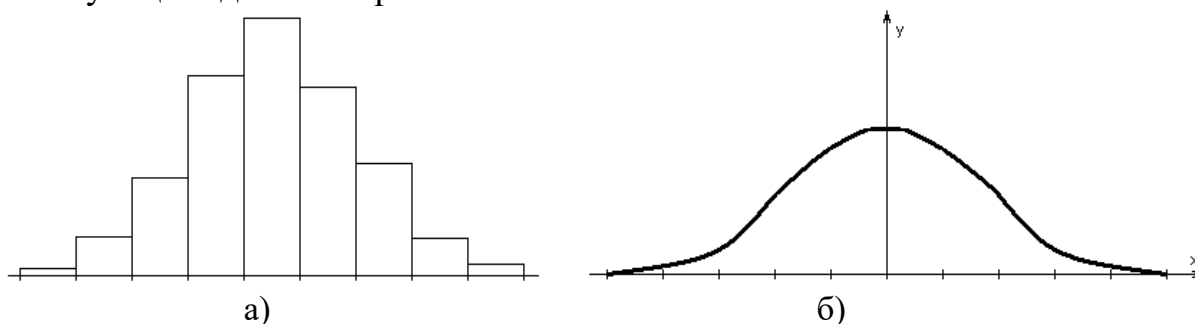


Рисунок 1. Распределение роста людей по их количеству из числа опрошенных: а) - в виде гистограммы; б) - графика функции

Уточним задачу: каждый диапазон разбиваем на десять, а жителей сортируем по росту с точностью до миллиметра. Диаграмма станет глаже и уменьшится по высоте, так как уменьшится число жителей в каждом маленьком диапазоне. Тем не менее, будет вырисовываться колоколообразная фигура (рисунок 1б). В таких задачах невозможно точно установить причины, приводящие к конкретному результату, поэтому они описываются теорией вероятности и математической статистикой. Появление случайных погрешностей в измерениях так же не может быть выявлено достоверно, поэтому определяют вероятность появления какой-то погрешности. Характеристикой случайных погрешностей в ходе измерений является закон *распределения вероятностей*. Различные законы распределения вероятностей в координатах  $y=f(x)$  приведены на рисунке 2. Распределение вероятностей рисунок 1б напоминает нормальное, но, чтобы оно действительно было таким, необходимо, кроме совпадения формы графиков, выполнение и некоторых математических условий. Этой теме посвящена работа.

Пусть имеем  $n$ -измерений. Распределение вероятностей их случайных погрешностей имеет вид колоколообразной функции. Является ли полученная

функция нормальным распределением? Существует несколько методов оценки распределения вероятностей, позволяющих ответить на этот вопрос. Один из них -  $\chi^2$  (хи-квадрат). Рассмотрим данный метод подробнее.

Терминология теории вероятностей и математической статистики различается с терминологией метрологии, тем не менее, сущностное понимание математических величин в них единое.

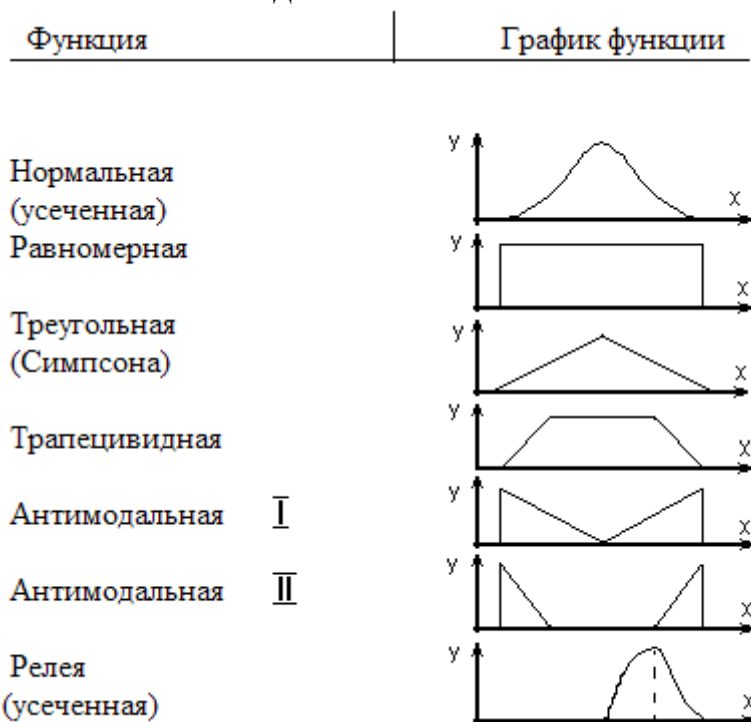


Рисунок 2. Возможные распределения вероятностей измерений

Например, в теории вероятностей и математической статистике оперируют понятием «математическое ожидание»; в метрологии – «среднеарифметическим значением». Однако, математическое ожидание измерений определяется как среднеарифметическое значение измеренных величин; получается об одном и том же разными словами. Условимся так же, что используя понятие «наблюдение» (термин теории вероятностей и математической статистики), иметь ввиду - «измерение», что не меняет сущности рассматриваемого.

В математической статистике нормальным является распределение вероятностей непрерывной случайной величины, которое описывается уравнением плотности вероятности (1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (1)$$

где,  $m_x$  – математическое ожидание (среднее значение) случайной величины измерений  $x$ ;  $\sigma_x$  – среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов наблюдений  $x_i$  относительно среднего значения  $m_x$  (2). Рассмотрим эти величины подробнее. Если в ходе исследований получены измерения:  $x_1, x_2 \dots x_n$  ( $n =$

1, 2, 3 ...), то их среднее значение  $\langle x \rangle$  определяет величину математического ожидания  $m_x$  (2):

$$m_x = x_{\text{ср}} = \langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$\sigma_x$  характеризует степень рассеяния результатов измерений вокруг среднеарифметического значения, определяется на основе суммы квадратов отклонений измерений  $\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$  и характеризует пологость функции нормального распределения (3):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = \sqrt{D} \quad (3)$$

Ее деление на  $n - 1$  вместо  $n$  приближает вычисляемое значение к теоретическому, и чем больше  $n$ , тем лучше это приближение. Выражение  $D$  под знаком корня (3) называют дисперсией случайной погрешности.

Распределение вероятностей (1) – дифференциальный способ описания распределения. Поскольку плотность распределения вероятностей находится как производная от интегральной функции распределения (4), то существует и интегральное представление распределения измерений, (5):

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (4)$$

$$F(x) = \int f(x) dx \quad (5)$$

где,  $F(x)$  - интегральная функция распределения вероятностей измерения. Так как в ходе процесса наблюдений измеряемая величина изменяется в некотором конкретном диапазоне значений, то неопределенный интеграл переходит в определенный (6):

$$F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (6)$$

При этом разница:  $F(x_2) - F(x_1)$  определяет вероятность попадания результата наблюдения  $x_i$  в интервал  $(x_1, x_2)$  (7):

$$P[x_1 < x_i < x_2] = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (7)$$

В теории вероятностей и математической статистике существует распределение, которое условно считают нормальным. Оно получено теоретически и поэтому его называют теоретическим. Различные его вариации представлены на основе таблиц и (или) графиков. Если в ходе измерений получили данные, то сравнивая их распределение с параметрами теоретического, можем оценить принадлежность полученных данных к нормальному распределению. Уровень точности того, что полученное распределение является нормальным, определя-

ется так называемым уровнем значимости  $q$  в процентах. Гипотеза о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, проверяются по уровню значимости  $q$  от 10 до 2%, т. е. с достоверностью от 90 до 98%. В ходе исследований, исследователь сам выбирает допустимый для него уровень значимости  $q$ .

Оценка качества распределения измерений определяется на основе параметров, которые называют *моментами*. *Моменты* представляют собой некоторые средние значения и называются *начальными*, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, и *центральными* – от центра функции плотности вероятности. Начальные моменты определяются выражением (8):

$$\mu_r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad (8)$$

центральные – (9):

$$\mu_r = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^r f(x) dx \quad (9)$$

Порядок  $r$  в уравнениях (8) и (9) определяет номер момента, начального или центрального. Отличие уравнений, в величине  $m_x$ , которая есть среднее значение измеренного массива данных, и предполагает рассмотрение функции распределения вероятностей около этого среднего значения (9). В выражения (8)  $f(x)$  рассматривается относительно начала координат. Первый начальный момент совпадает с математическим ожиданием  $m_x$  результатов наблюдений (10):

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = m_x = \langle x \rangle \quad (10)$$

Второй центральный момент – дисперсия результатов наблюдений (11):

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx = D = \sigma_x^2 \quad (11)$$

Рассмотренные величины математического ожидания  $m_x$ , и дисперсии  $D$ , связанной со СКО выражением (3); являются, соответственно, первым начальным моментом и вторым центральным. При этом, величина СКО –  $\sigma_x$  определяет пологость функции  $f(x)$ , которая, в принципе, может переходить в прямую, т.е. равномерное распределение вероятностей (рисунок 2). Однако, не только пологость функции распределения вероятностей может лишить его статуса нормального, но и большая крутизна графика (рисунок 4). Кроме того, возможна положительная или отрицательная асимметрия распределения массива измеренных величин (рисунок 3), что тоже делает распределение ненормальным. Это обусловило существование еще двух параметров нормального распределения: асимметрии и эксцесса. Для нормального распределения они равны нулю. Поэтому, если для изучаемого распределения асимметрия и эксцесс имеют небольшие значения, то оно считается нормальным. Большие зна-

чения этих величин указывают на значительное отклонение рассматриваемого распределения от нормального. Как оценить асимметрию?

Асимметрией теоретического распределения называют отношение центрального момента третьего порядка к кубу СКО (12):

$$A_s = \frac{\mu_3}{\sigma_x^3} \quad (12)$$

$\mu_3$  определяется интегральным выражением (13):

$$\mu_3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^3 f(x) dx \quad (13)$$

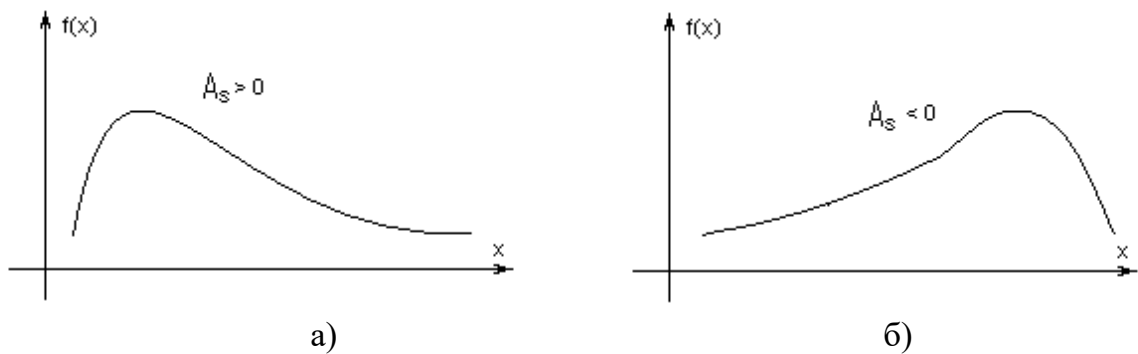


Рисунок 3. Положительная (а) и отрицательная (б) асимметрия распределения массива измеренных величин

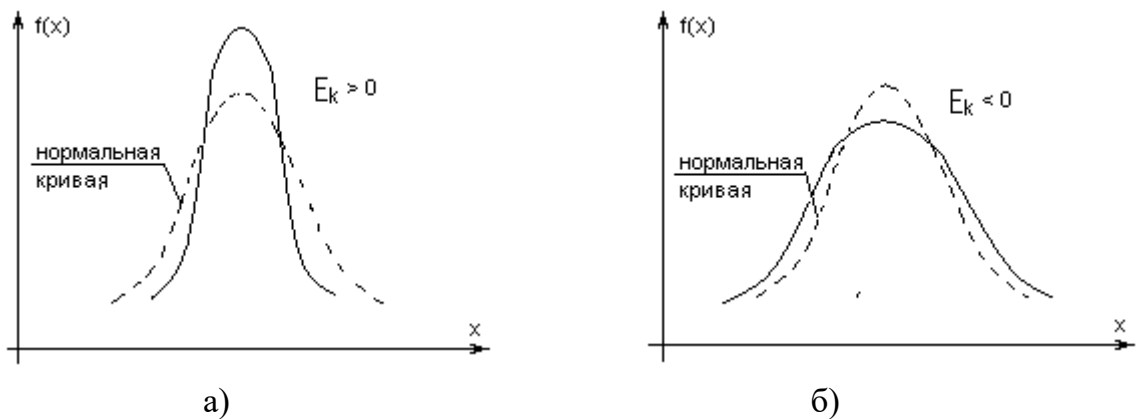


Рисунок 4. Положительный (а) и отрицательный (б) эксцессы распределения массива измеренных величин

Асимметрия положительна (рисунок 3а), если «длинная» часть кривой распределения расположена справа от  $m_x$ ; и – отрицательна (рисунок 3б), когда «длинная часть» распределения расположена слева от  $m_x$ . В принципе для оценки асимметрии можно использовать центральный момент  $\mu_3$ , но он имеет размерность. Чтобы уйти от размерной величины делим  $\mu_3$  на  $\sigma^3$  и получаем безразмерный коэффициент асимметрии  $A_s$ .

Для оценки «крутости» подъема полученной кривой, по сравнению теоретическим распределением, используют – эксцесс. Он определяется равенством (14), в котором  $\mu_4$  - центральный момент четвертого порядка (15).

$$E_k = \frac{\mu_4}{\sigma_x^4} - 3 \quad (14)$$

$$\mu_4 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^4 f(x) dx \quad (15)$$

Для нормального распределения  $\mu_4/\sigma_x^4 = 3$ ; следовательно, эксцесс равен нулю. Поэтому, если эксцесс некоторого распределения отличен от нуля, то кривая этого распределения отличается от нормальной кривой. Если же эксцесс положительный, то кривая имеет высокую и острую вершину (рисунок 4 а), если эксцесс отрицательный, то сравниваемая кривая имеет более низкую и плоскую вершину, чем нормальная кривая (рисунок 4 б). При этом предполагается, что рассматриваемое и теоретическое распределения имеют одинаковые математические ожидания и дисперсии.

Эксцесс, аналогично коэффициенту асимметрии  $A_s$ , сделан безразмерной величиной, за счет деления  $\mu_4$  на СКО в четвертой степени  $\sigma_x^4$ . Это позволяет сделать его универсальным и использовать для любых исследований.

Существуют разные методики проверки нормальности распределения вероятностей. При этом, для разного количества проведенных наблюдений -  $n$  рекомендуются разные методики (таблица 1).

Таблица 1. Проверка распределения вероятностей на его принадлежность к нормальному

Диапазон измерений	Рекомендуемые методики оценки распределений вероятностей
$3 < n < 50$	Критерий W
$n > 50$	Критерий Пирсона $\chi^2$ , Колмогорова, Мизеса – Смирнова ( $\omega^2$ )
$15 < n < 50$	2 составные критерия

Рассмотрим критерий  $\chi^2$ , который еще известен как критерий Пирсона. Его рекомендуется применять, если число измерений более 50.

*Проверка согласия опытного распределения случайной величины погрешности с теоретическим на основе  $\chi^2$ .*

Суть критерия  $\chi^2$  состоит в контроле отклонений гистограммы опытных данных  $f_j^*(x)$  от гистограммы с таким же числом интервалов, построенной на основе теоретического нормального распределения  $f(x)$ . Сумма квадратов разностей опытной  $m_j^*$  теоретической  $m_j$  частот по интервалам  $(m_j^* - m_j)^2$  не

должна превышать значений  $\chi^2_{k, q}$  в зависимости от заданного уровня значимости  $q$  и числа степеней свободы  $k = r' - 3$ , где: 3 – число наложенных связей;  $r'$  – число интервалов измерений. По уровню значимости  $q$  и числу степеней свободы  $k$  на основе таблицы 2 можно определить границы односторонней критической области  $\chi^2_{k, q}$ . Для найденного значения (16):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{r'} \frac{(m_i^* - m_i)^2}{m_i} \quad (16)$$

справедливо условие (17):

$$q = P\{\chi^2 > \chi^2_{k, q}\} \quad (17)$$

Таблица 2 Квантили  $\chi^2$ -распределения для различных значений  $k, q$

К	1- q/2			q/2		
	0,99	0,95	0,90	0,10	0,05	0,01
1	0,0 <sup>3</sup> 157	0,0 <sup>2</sup> 393	0,0158	2,706	3,841	6,635
2	0,0201	0,103	0,211	4,605	5,991	9,210
3	0,115	0,352	0,584	6,251	7,815	11,345
4	0,297	0,711	1,064	7,779	9,488	13,277
5	0,554	1,145	1,610	9,236	11,070	15,086
6	0,872	1,635	2,204	10,645	12,592	16,812
7	1,239	2,167	2,833	12,017	14,067	18,475
8	1,646	2,733	3,490	13,362	15,507	20,090
9	2,088	3,325	4,168	14,684	16,919	21,666
10	2,558	3,940	4,865	15,987	18,307	23,209
12	3,571	5,226	6,304	18,549	21,026	26,217
14	4,660	6,571	7,790	21,064	23,685	29,141
16	5,812	7,962	9,312	23,542	26,296	32,000
18	7,015	9,390	10,865	25,989	28,869	34,805
20	8,260	10,851	12,444	28,412	31,410	37,566
30	14,953	18,493	20,599	40,256	43,773	50,892

Следовательно, вероятность того, что вычисленное значение  $\chi^2$  превысит  $\chi^2_{k, q}$ , равна  $q$  и критическую область образуют все значения  $\chi^2 > \chi^2_{k, q}$ . В этом случае гипотеза о нормальности отвергается, т.е. опытное распределение не соответствует предполагаемому теоретическому. Если  $\chi^2 \leq \chi^2_{k, q}$ , то гипотеза не отвергается, а принимается.

Кроме односторонней критической области применяют двусторонние критические области: нижнюю  $\chi^2_1$  и верхнюю  $\chi^2_2$  (18). При

$$q = P\{\chi^2_1 \leq \chi^2 < \chi^2_2\} = P\{\chi^2_{k, q/2} \leq \chi^2 < \chi^2_{k, \frac{1-q}{2}}\} \quad (18)$$

гипотеза о нормальности отвергается.

Будем учитывать так же следующее:



а) оценку опытного распределения осуществляем не на основе бесконечного числа измерений, а на основе конечного –  $n$ , то есть выборки;

б) истинное значение измерений  $A$  предполагает обработку их бесконечного числа, поэтому, в рамках рассматриваемого, правильнее говорить об оценке истинного значения выборки из  $n$  - измерений, которое обозначим через  $\tilde{A}$ ;

в) определяя по данным выборки из  $n$  – измерений значения дисперсии  $D$  и СКО -  $\sigma$ , мы определяем не их истинные значения, характерные для всей генеральной совокупности, а лишь оценки выборки, поэтому, вместо  $\sigma$  будем использовать оценку  $S$ .

Введенные уточнения образуют 3 наложенные связи, которые мы учитывали при определении числа степеней свободы  $k = r^f - 3$ . Рассмотрим оценку распределения на конкретном примере.

### Пример.

Цифровым вольтметром в ходе контроля напряжения было зафиксировано  $n = 100$  его значений в диапазоне: 8, 911...8,927 В, при выборочном размахе 0,016 В. Является ли распределение измеренных величин нормальным? Найти его функцию плотности распределения.

1. Находим величины, которые могут быть определены на основе данных задания. Определяем среднее арифметическое наблюдений  $\tilde{A}$  по формуле (2). По приближенной формуле Бесселя (3) находим среднее квадратичное отклонение  $S$ .  $\tilde{A} = 8,91936$  В.  $S = 0,0028$ .

2. Проводим ранжирование полученных значений  $n$ , т. е. располагаем их в порядке возрастания и группируем по интервалам. В соответствии табл. 3, выберем число интервалов  $r = 8$ .

Таблица 3. Предпочтительные объемы интервалов измерений

Число измерений $n$	30 - 100	100 - 500	500 - 1000
Число интервалов $r$	5 - 9	8 - 12	10 - 16

При этом оказывается возможным выбор равных по величине интервалов  $\Delta x_j = 0,002$  В. Возможен выбор и не равных интервалов, но поскольку условие задания позволяет провести выбор равных интервалов, воспользуемся таким преимуществом.

3. Для каждого интервала определяем его середину  $x_{j0}$  и подсчитываем опытное число наблюдений  $m^*_j$ , попавшее в каждый интервал.

Если в каком либо интервале попадает меньше пяти наблюдений, то необходимо этот интервал объединить с соседними интервалами, чтобы в новом интервале было  $m^*_j > 5$ .

4. Далее вычисляем теоретическое число наблюдений  $m_j$  в интервале  $\Delta x_j$ , соответствующее нормальному распределению. Для этого от реальных се-

редин интервалов  $x_{j0}$  переходим к нормированным величинам:  $z_j = (x_{j0} - \tilde{A})/S$ . Далее для каждого из значений  $z_j$  находим из таблицы 4 значение нормированной функции плотности распределения вероятностей (19):

$$f(z_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z_j^2/2} \quad (19)$$

От нормированного значения  $f(z_j)$  переходим к реальному значению (20):

$$f(x_j) = f(z_j)/S \quad (20)$$

Теоретическое число наблюдений в интервале (21):

$$m_j = n \Delta x_j f(x_j) \quad (21)$$

Таблица 4. Плотность вероятности нормированного распределения

$z$	$f(z)$	$z$	$f(z)$	$z$	$f(z)$	$z$	$f(z)$
0,0	0,3989	1,0	0,2420	2,0	0,0540	3,0	0,0044
0,1	0,3970	1,1	0,2179	2,1	0,0440	3,1	0,0033
0,2	0,3910	1,2	0,1942	2,2	0,0355	3,2	0,0024
0,3	0,3814	1,3	0,1714	2,3	0,0283	3,3	0,0017
0,4	0,3683	1,4	0,1497	2,4	0,0224	3,4	0,0012
0,5	0,3521	1,5	0,1295	2,5	0,0175	3,5	0,0009
0,6	0,3332	1,6	0,1109	2,6	0,0136	3,6	0,0006
0,7	0,3123	1,7	0,0940	2,7	0,0104	3,7	0,0004
0,8	0,2897	1,8	0,0790	2,8	0,0079	3,8	0,0003
0,9	0,2661	1,9	0,0656	2,9	0,0069	3,9	0,0002

Как и для опытного распределения, если в интервале наблюдений менее пяти, то этот интервал объединяем с соседним, чтобы выполнялось условие  $m_j > 5$ . Далее определяем число степеней свободы:

$$k = r' - 3 = (8-2) - 3 = 5$$

$r'$  - общее количество интервалов после объединения.

Далее вычисляем  $\chi^2$  по формуле (16). По заданному уровню значимости  $0,02 \leq q \leq 0,1$  и числу степеней свободы  $k$  определяем по таблице 2 одностороннюю или двухстороннюю критическую область. Если  $\chi^2_{k, q/2} > \chi^2 \geq \chi^2_{k, 1-q/2}$ , то распределение считают нормальным.

Результаты вычислений сведены в таблицу 5. При  $k = 8-2-3 = 3$   $q = 0,10$  (см. таблицу 2) определяем значения  $\chi^2$  верхней и нижней критических областей:  $\chi^2_{3; 0,05} = 7,815$ ; для  $\chi^2_{3; 0,95} = 0,352$ . Следовательно, распределение опытных данных можно считать нормальным, так как  $0,35 < 1,17 < 7,82$ .

Для построения гистограммы дополнительно вычисляем статистические оценки средней плотности распределения вероятностей  $f^*(x_j)$  в интервале  $\Delta x_j$ , используя формулу (22):

$$f^*(x_j) = \frac{m_j^*}{n\Delta x_j} \quad (22)$$

По оси абсцисс откладываем интервалы  $\Delta x_j$  в порядке их возрастания и на каждом интервале строят прямоугольник высотой, равной оценке средней плотности распределения  $f^*(x_j)$ . Площадь всех прямоугольников равна 1 (23):

$$\sum_{j=1}^r f^*(x_j) \Delta x_j = \sum_{j=1}^r \frac{m_j^*}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^r m_j^* = 1 \quad (23)$$

Масштабы по осям гистограмм должны быть такими, чтобы соотношение ее высоты к основанию составляло примерно 5:8. После построения гистограмм подбирают плавную кривую теоретического распределения, которая выражает все существенные черты статистического распределения. В нашем примере математическое ожидание и СКО кривой нормального распределения должна совпадать со средним арифметическим и оценкой среднего квадратичного отклонения, вычисленным по измеренным данным  $\bar{A} = 8,91936$  В;  $S = 0,0028$ . Это графический способ определения распределения вероятностей в рассматриваемом примере.

Если найденные значения и СКО -  $\sigma_x$  подставить в (1), то получим уравнение кривой нормального распределения. Данное уравнение имеет вид (20) и является аналитическим представлением распределения вероятностей (24):

$$f(x) = \left( \frac{1}{0,0028\sqrt{2\pi}} \right) e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-3,91936}{0,0028} \right)^2} \quad (24)$$

Оценка качества уравнения может быть проведена на основе определения начального момента (10) и центрального - (11). Параметры асимметрии распределения (12) и эксцесса (14), найденные соответственно на основе центральных моментов (13) и (15), характеризуют качество самого распределения, его статус как нормального.

На основе значений средней плотности распределения вероятностей для каждого из восьми интервалов может быть построена гистограмма. Если ее дискретные значения  $f^*(x_j)$  в каждом интервале соединить прямыми линиями, то получим график, у которого по оси у, величина  $f^*(x_j)$ , а по оси х – средние значения напряжения в каждом j-ом интервале. Вид такого графика, полученного из гистограммы, представлен на рисунке 5.

Таблица 5. Данные промежуточных вычислений при исследовании проведенных измерений напряжения

j	$x_j$	$x_{j+1}$	$m_j^*$	$f^*(x_j) = \frac{m_j^*}{n\Delta x_j}$	$x_{j0} = \frac{x_j + x_{j+1}}{2}$	$x_{j0} - \bar{A}$	$z_j = \frac{x_{j0} - \bar{A}}{s}$	$f(z_j)$	$f(x_j) = \frac{f(z_j)}{S}$	$m_j = n\Delta x_j f(x_j)$	$\chi_j^2$
1	3,911	3,913	1 + = 6	5	3,912	-0,00736	- 2,630	0,0126	4,5	0,90 + = 5,46	0,5340
2	3,913	3,915	5	25	3,914	-0,00536	- 1,914	0,0640	22,8	4,56	
3	3,915	3,917	14	70	3,916	-0,00336	- 1,200	0,1942	69,4	13,88	0,00104
4	3,917	3,919	27	135	3,918	-0,00136	- 0,485	0,3546	126,6	25,32	0,1150
5	3,919	3,921	24	120	3,920	+ 0,00064	+ 0,229	0,3885	138,8	27,76	0,50920
6	3,921	3,923	18	90	3,922	+ 0,00264	+ 0,943	0,2558	91,4	18,28	0,00426
7	3,923	3,925	9 + =	45	3,924	+ 0,00464	+ 1,660	0,1006	35,9	7,18 + = 8,90	0,49500
8	3,925	3,927	11 2	10	3,936	+ 0,00664	+ 2,370	0,0241	8,6	1,72	$\sum = 1,17$

Расчет для строки j = 1:  $f^*(x_j) = \frac{1}{100 \cdot 0,002} = 5$ ;  $x_{j0} = \frac{3,911 + 3,913}{2} = 3,912$ ;  $z_j = \frac{3,912 - 3,91936}{0,0028} = -2,630$ ;

$f(x_j)$  определяется по таблице 4;  $f(x_j) = \frac{0,0126}{0,0028} = 4,5$ ;  $m_j = 100 \cdot 0,002 \cdot 4,5 = 0,99$ ;  $\chi_j^2 = \frac{(6 - 5,46)^2}{5,46} = 0,05340$

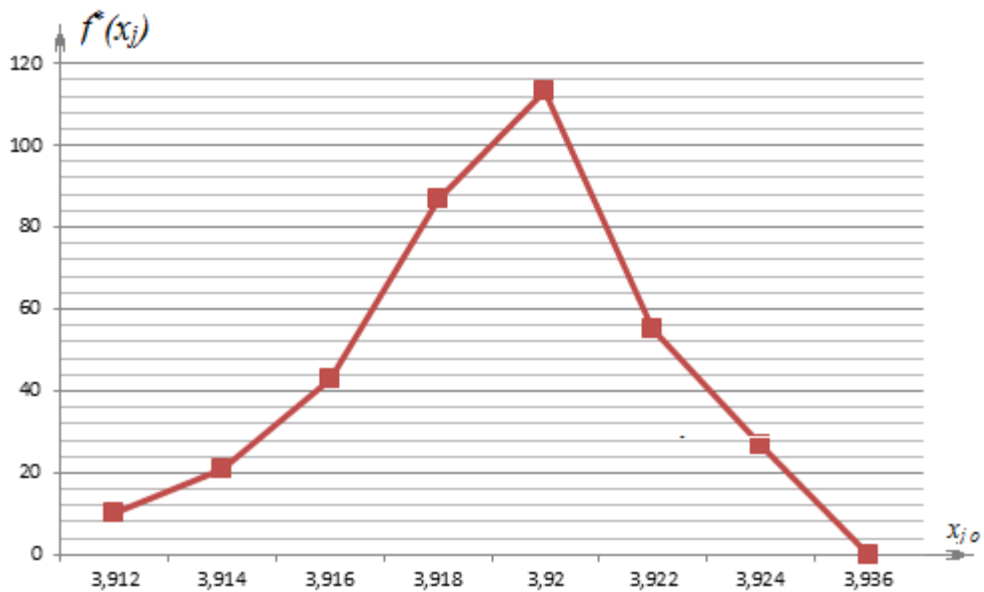


Рисунок 5. График функции  $f^*(x_j)$ , построен для значений интервалов: 1-8

### Вывод.

Таким образом, исследованное в примере распределение измеренных напряжений в диапазоне 8,911...8,927 В является нормальным; поскольку найденное  $\chi^2 = 1,17$  укладывается в пределы значений  $\chi^2$  верхней и нижней критических областей:  $\chi^2_{3; 0,05} = 7,815$ ; для  $\chi^2_{3; 0,95} = 0,352$ .

### Задание.

Потребление энергии многими системами электроники (компьютер, телевизор, телефон и др.) происходит случайным образом. Например, питание памяти компьютера при работе в Интернете. И хотя работа памяти рассчитана на конкретное постоянное напряжение, оно не такое уж и постоянное и допускается его варьирование вблизи некоторой величины. К примеру, если стабилизатор напряжения памяти рассчитан на 5В, то предусматривается его нормальная работоспособность в диапазоне напряжений: 4,8 ...5,2 В. Так работают стабилизаторы напряжения и в других систем электроники. И все же стабилизатор напряжения рассчитывается на конкретную величину и поэтому частота ее появления при работе устройства будет выше, чем других значений. Это означает, что если измерять напряжения питания памяти, рассчитанной на 5 В в течение длительного промежутка времени и провести n- наблюдений, то значений 5В будет гораздо больше, чем напряжений 4,8 В или 5,2В. Исходя из этих соображений, на основе таблицы 6, в соответствии своего варианта, задайте ряд значений измеренной величины.

Таблица 6. Задания и условия вариантов

Вариант	Число измерений n	Параметр измерения	Измеренная величина и ее размерность	Отклонение величины от измеренного, Δ, в %	Доверительная вероятность, P
1	51	напряжение питания	5 В	10	0,95
2	52	ток потребления	2 А	9	0,99
3	53	мощность потребления	3 Вт	8	0,9
4	54	частота импульса	2 ГГц	7	0,95
5	55	время импульса	1 Нс	7	0,99
6	56	температура процессора	60°	11	0,9
7	57	напряжение питания	9 В	11	0,95
8	58	ток потребления	1,5 А	7	0,99
9	59	мощность потребления	2,5 Вт	7	0,9
10	60	частота импульса	1,8 ГГц	8	0,95
11	61	время импульса	0,8 Нс	9	0,99
12	62	температура процессора	55°	10	0,9
13	63	напряжение питания	12 В	12	0,95
14	64	ток потребления	1,6 А	11	0,99
15	65	мощность потребления	2,8 Вт	10	0,9
16	66	частота импульса	2,2 ГГц	9	0,95
17	67	время импульса	10 Нс	8	0,99
18	68	температура процессора	65°	7	0,9
19	69	напряжение питания	16 В	6	0,95
20	70	ток потребления	1 А	11	0,99
21	71	мощность потребления	4 Вт	11	0,9
22	72	частота импульса	2,44 ГГц	7	0,95
23	73	время импульса	5 Нс	7	0,99
24	74	температура процессора	62°	8	0,9
25	75	напряжение питания	6,3 В	9	0,95
26	76	ток потребления	0,6 А	10	0,99

Полученные данные представьте в виде таблицы 7.

Таблица 7. Сгенерированные данные n-измерений

n= 1	n= 2	n= 3	n= 4	n= 5	n= 6	.....	.....	.....	n= 80
						.....	.....	.....	

На основе критерия Пирсона  $\chi^2$  проверьте полученный массив величин на предмет его принадлежности к нормальному распределению вероятностей.

Выполнение задания можно проводить как с помощью компьютера или на основе традиционных расчетов. В первом случае возможно использовать, например, электронные таблицы EXCEL. В этом случае программным продуктом может стать таблица 5 или другая, отражающая последовательность действий расчетов.

## Лабораторная работа 9

### Исследование параметров и характеристик четырехполюсника посредством измерителя АКИП 4115/1А

*Цель работы:* изучить и провести лабораторное исследование метрологических параметров и характеристик системы генератор-осциллограф по параметрам напряжения и времени.

*Приборы и оборудование:* генератор гармонических сигналов, осциллограф, четырехполюсник.

#### Теоретические сведения

АКИП 4115/1А – автоматизированный контрольно-измерительный прибор, функции которого рассмотрены на стр. 29; является панорамным, цифровым, запоминающим осциллографом. Условно, параметры прибора разделяются на параметры вертикального и горизонтального отклонений. Некоторые параметры осциллографов этой серии приведены в Таблице 1. Укажем основные параметры осциллографа.

Таблица 1 Различия в возможностях приборов серии АКИП 4115

Тип прибора	Полоса пропускания	Частота дискретизации на каждый канал/ в режиме объединения	Объем памяти на канал/ объединение	Время нарастания переходной характеристики
АКИП 4115/1А	25 МГц	250 МГц/ 500 МГц	16 кБ/ 32 кБ	14 нс
АКИП 4115/2А	40 МГц	500 МГц/ 1000 МГц	1 МБ/ 2МБ	8,8 нс
АКИП 4115/3А	70 МГц			5,8 нс
АКИП 4115/4А	100 МГц			3,5 нс
АКИП 4115/5А	150 МГц			2,3 нс
АКИП 4115/6А	200 МГц			5 кБ
АКИП 4115/7А	200 МГц	1 ГГц/ 2ГГц	12 кБ/ 24 кБ	1.8 нс

*Коэффициент отклонения каждого из каналов ( $K_0$ )* – отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча в делениях шкалы. У наиболее распространенных осциллографов коэффициент отклонения находится в диапазоне от 2 мВ/дел до 10 В/дел. Чувствительность осциллографа – величина, обратная коэффициенту отклонения осциллографа  $S = 1/K_0$ .

*Полоса пропускания* – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения изменяется не более, чем на 30% относительно его значения, на некоторой средней (опорной) частоте. Для низкочастотных осциллографов полоса пропускания составляет 1-5 МГц, для универсальных осциллографов верхняя частота достигает десятков МГц, для высокочастотных – сотен МГц.

*Время нарастания переходной характеристики* – параметр, влияющий на точность измерения импульсных сигналов. Переходная характеристика четырехполосника – это его реакция на ступенчатое воздействие.

*Частота дискретизации* – это величина, обратная времени, с которой осуществляется последовательность отсчетов напряжения входного сигнала, взятых через равные промежутки времени.

*Относительная погрешность установки коэффициентов*  $K_0$  не более 3%.

*Абсолютная погрешность по измеряемому напряжению*  $U$ , при установленном смещении  $U_{см}$ , для коэффициента отклонения  $K_0 > 5$  мВ/дел не более:

$$\pm(3 \cdot 10^{-2} \times U + 6 \cdot 10^{-2} \times U_{см} + 0,1 \text{ дел} \times K_0 + 1 \text{ мВ})$$

Параметры входов осциллографа определяются входным активным сопротивлением и входной емкостью.

*Активное входное сопротивление прибора:*  $R_{вх} = 1 \text{ МОм} \pm 2\%$ ;

*Входная емкость прибора*  $C_{вх}$ : не более 13 пФ. Для высокочастотных осциллографов эта величина составляет единицы пФ.

*Закрытый вход осциллографа (AC)* – обеспечивает прохождение входного сигнала с частотой более 10 Гц. Входной сигнал поступает через емкость прибора, включенную на его входе.

*Открытый вход осциллографа (DC)* – обеспечивает прохождение входного сигнала во всем частотном диапазоне, включая постоянную составляющую. В этом режиме сигнал на вход осциллографа поступает через входной резистор (не проходит через емкость). Это позволяет измерять постоянное напряжение, а также визуализировать постоянную составляющую исследуемого сигнала.

*Режим закороченного на «землю» прибора (GND/ Земля)* – это когда входной сигнал осциллографа равен 0.

*Максимально допустимое входное напряжение* (с делителем 1:10) – 600 В.

*Коэффициент развертки*  $K_p$  – отношение времени отклонения луча входным сигналом по горизонтали к величине отклонения луча в делениях шкалы. В разных осциллографах диапазон этой величины может изменяться от нс/дел до с/дел. В осциллографе АК ИП 4115/1А этот диапазон от 25 нс/дел до 50 с/дел. В модификации прибора АК ИП 4115/7А: от 2,5 нс/дел до 50 с/дел.

В зависимости от коэффициентов осциллографа  $K_0$  и  $K_p$ , они разделяются на классы точности 1, 2, 3, 4. Соответственно их пределы погрешностей не превышают 3, 5, 10, 12 % по трактам вертикального и горизонтального отклонений. Минимальная частота измеряемых сигналов – 10 Гц.

Подробнее, параметры и характеристики прибора приводятся в его техническом описании (ТО), где указываются величины погрешностей в разных диапазонах напряжений при разных временных интервалах измеряемых сигналов, при разных условиях синхронизации прибора, при разных нагрузках входной цепи осциллографа и т.д.



Укажем некоторые параметры и характеристики генератора сигналов. В радиотехнике – это система с положительной обратной связью, имеющая большой коэффициент усиления (стр. 36).

По частоте генерируемых сигналов эти приборы разделяются на низкочастотные (НЧ) (от единиц Гц до единиц МГц), высокочастотные (ВЧ) (от единиц и десятков до сотен МГц) и, сверхвысокочастотные (СВЧ) (от сотен МГц до десятков ГГц).

*Полоса генерируемых частот генератора* – диапазон частот, в пределах которого генератор обеспечивает выходной сигнал, величина которого может быть разной на разных частотах и описываться его амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

По форме выходного сигнала генераторы разделяются на *генераторы гармонических сигналов* и *релаксационные*. Выходным сигналом последних, являются импульсы разных форм: прямоугольные, треугольные, линейно изменяющихся напряжений, произвольной (задаваемой) формы.

*Диапазон напряжений выходного сигнала.* В зависимости от формы выходного сигнала может представляться как диапазон либо действующих, либо амплитудных, либо средних значений генерируемых напряжений.

*Мощность выходного сигнала генератора* – величина, определяемая параметрами напряжения и тока на нагрузке, которую подключают к генератору.

*Выходное сопротивление генератора.* Когда говорят о выходном сопротивлении генератора, то подразумевают модель выхода как линейной электрической цепи, в которой  $R_{\text{вых}}$  включено последовательно с идеальным источником напряжения (источником ЭДС).

Как и для осциллографов, для генераторов, в ТО, в разделе технические данные, приводится множество параметров и характеристик работы генератора при различных условия как по параметрам напряжения, так и времени.

### Стенд для осциллографических измерений

Изучение осциллографических измерений будем проводить в соответствии блок-схем рисунка 1. Первая - позволяет исследовать задаваемые генератором напряжения различной частоты и формы; вторая – исследовать четырехполюсник по входным/выходным напряжениям (сигналам).

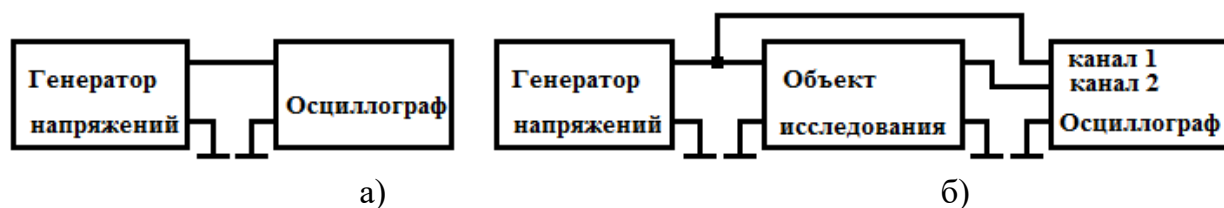


Рисунок 1. Стенд для исследования: а) – генератора напряжений (ГН); б) – входных/выходных сигналов четырехполюсников (например, R, L, C цепей).

## Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Выставление генератором гармонических напряжений, заданной амплитуды; частоты и начальной фазы. Согласно блок-схемы Рис. 3 а, подключите генератор напряжений (ГН) ко входу канала 1 и активируйте соответствующую кнопку. Используя масштаб: Вольт/дел.; Время/дел., задайте на экране осциллографа напряжения:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = 5 \sin(314t) \text{ В}$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = 10 \sin(1500t + \pi/3) \text{ В}$$

Для этого:

- изучите на передней панели генератора как установить необходимую частоту выходного сигнала и регулировать его амплитуду. Рассчитайте частоту сигнала первого уравнения и выставите ее генератором;

- регулятором зоны «ВЕРТИК» «В – мВ» добейтесь, чтобы на экране наблюдался максимально возможный размах синусоиды;

- регулятором «с – нс» из зоны «ГОРИЗОНТ» установите такое «окно» частот, чтобы на экране видеть 2-3 периода напряжения. Если осциллограмма движется в горизонтальном направлении (не синхронизирована), остановите ее регулятором «УРОВЕНЬ» из зоны «СИНХР».

В такой же последовательности действий выставите другое напряжение. Осциллограммы изобразите в отчете в графическом виде.

Задание 2. Измерение параметров осциллограмм на основе «курсоров». Воспользуйтесь инструкцией управления «Курсорами» и проведите измерения второго сигнала по параметрам амплитуды  $U_m$  и периода колебаний  $T$ . Сравните их с этими же параметрами, измеряемыми осциллографом.

Задание 3. Исследование амплитудных и временных параметров RC-цепи. Соберите блок-схему Рис. 3 б. При этом используйте четырехполюсник Рис. 13 б (стр. 18). Задайте максимальное выходное напряжение ГН (регулятор «~» в крайнем правом положении) и снимите параметры четырехполюсника в соответствии Табл. 3. Величины R и C задает преподаватель.

f, кГц	0,05	0,5	1,0	10,0	50,0	100,0	200,0	400,0
$U_{mвх}$ , В								
$U_{mвых}$ , В								
$K=U_{mвых}/U_{mвх}$								
$\Delta t$ , С								
$\Delta\varphi$ , град								

По результатам исследования постройте зависимости:  $K = \varphi(f)$  и  $\Delta\varphi = \gamma(f)$ .

Задание 4. Используя кнопку «МАТЕМ» активизируйте у прибора математические функции. Проверьте на практике выполнение операций сложения и вычитания гармонических сигналов. В качестве сигналов используйте данные амплитуд задания 3 для частоты  $f = 1$  кГц (или по заданию преподавателя). Результаты исследования оформите в виде графиков.

Задание 5. Исследование прямоугольных импульсов.

1. Вернитесь к блок-схеме Рис. 3 а. Переключите вход осциллографа с гармонического сигнала на прямоугольные импульсы. Получите осциллограмму прямоугольного импульса с амплитудой  $U_m = 10$  В для частоты  $f = 1$  кГц.

2. Нажмите кнопку «ИЗМЕРЕНИЯ» осциллографа, после чего появятся основные параметры осциллограммы; далее нажмите любой параметр – высветится меню возможных измерений (Время. Напряжения. Задержка. Все измерения). Выбираем – Задержка – высвечивается подменю (Период. Частота. Длительность. Время нарастания. Скважность и т. д). Измерьте все параметры заданного импульсного напряжения, в соответствии возможностей меню. Уясните смысл проведенных измерений. Изобразите график импульса в течение одного периода с указанием полученных временных параметров.

Задание 6. Исследование логарифмического ослабителя напряжений (аттенюатора) ГН. Задайте гармонический сигнал с  $U_m = 15$  В и  $f = 1$  кГц. Измерьте выходные напряжения ГН для всех положений переключателя «dB». В положении «dB» 0 аттенюатор выключен. По результатам исследования сделайте выводы о работе аттенюатора.

Таблица 1. Данные исследования аттенюатора ГН

dB	0	10	20	30	40	50	60
$U_{мвх}, В$	15						
$U_{мвых}, В$							
$K = U_{мвых} / U_{мвх}$							
$Lg K$							

#### Контрольные вопросы

1. Отличие традиционного осциллографа и измерителя серии АКИП.
2. Возможности АКИП 4115/1А в измерении параметров сигналов.
3. Назначение и функции канала Y осциллографа.
4. Назначение и функции канала X осциллографа.
5. Сущность синхронизации и методы ее реализации в приборе.
6. Калибровка осциллографа.
7. Методика измерений напряжений и времени прибором АКИП 4115/1А.
8. Основные параметры импульса.
9. Основные параметры генератора сигналов.
10. Функции аттенюатора в измерительной технике.

## Лабораторная работа 10

### Метод сравнения с эталоном в измерении емкости конденсатора

*Цель работы:* знакомство с одним из методов измерений на примере емкости конденсатора, оценка емкости измеряемого конденсатора, знакомство с маркировкой на корпусах конденсаторов.

*Приборы и оборудование:* лабораторная установка, компьютер, набор эталонных и измеряемых конденсаторов.

### Теоретические сведения

Различают методы измерения непосредственной оценки и сравнения с мерой. Эти методы определяют принципы построения измерительных приборов.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, в котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, заранее градуированного в единицах измеряемой физической величины.

Метод сравнения с мерой – метод измерений, в которой измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Метод сравнения имеет следующие модификации: противопоставления, дифференциальный, нулевой, замещения, совпадения. Воспроизводимая мера (в приборостроении) – это эталон измеряемой величины.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами; применяется при измерении ЭДС, напряжения, тока.

Дифференциальный метод – метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой; применяют при измерении сопротивления, индуктивности, емкости, напряжения и др.

Нулевой метод – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод замещения часто применяют при измерении параметров цепей.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Метод применяют при измерении частот, приеме точных сигналов времени.

Рассмотрим действие «метода сравнения с мерой» на примере измерения емкости конденсатора. В лабораторной работе организована автоматизация из-

мерений на основе компьютерной техники. Однако сначала вспомним некоторые аспекты, касающиеся параметра емкости конденсатора.

Емкость – параметр, характеризующий пару электропроводных тел, разделенных диэлектриком. Если переместить электрический заряд  $-q$  с одного электрически нейтрального проводящего тела на другое, также изначально нейтральное, то они будут противоположно заряженными, в пространстве между ними появится электрическое поле, а между телами возникнет разность потенциалов  $-U$ . Отношение перенесенного заряда к возникшей вследствие этого разности потенциалов между телами называется их емкостью (1):

$$C = \frac{q}{U} \quad (1)$$

Устройства, использующие эффект емкости для накопления электрического поля – конденсаторы. Это две металлические пластины, разделенные диэлектриком. Емкость плоского конденсатора определяется его размерами и параметрами диэлектрика между обкладками (2):

$$C = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{d} \quad (2)$$

где,  $S$  – площадь обкладок,  $d$  – толщина диэлектрика,  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  соответственно диэлектрическая проницаемость диэлектрика и электрическая постоянная. Единица измерения емкости – фарада (Ф); такая величина, которая при заряде 1 Кулон дает разность потенциалов 1 Вольт. Для измерения  $C$ , используется (1). Конденсатору  $C_x$  сообщается известный заряд  $\Delta q$ , измеряется вызванное этим приращение напряжения между обкладками  $\Delta U$  и вычисляется отношение (3):

$$C_x = \frac{\Delta q}{\Delta U} \quad (3)$$

Электрическая схема лабораторной установки приведена на рисунке 1. Для получения известного заряда используется т.н. эталонный конденсатор  $C_0$ . Процесс измерения двухэтапный. На первом этапе эталонный конденсатор с помощью переключателя ПК подключается к источнику постоянного известного напряжения  $U_0$  и получает от него электрический заряд  $\Delta q = U_0 * C_0$ .



Рисунок 1. Электрическая схема лабораторной установки.

На втором этапе переключатель подключает заряженный эталонный конденсатор к измеряемому -  $C_x$  и происходит передача заряда из  $C_0$  в  $C_x$ . При этом напряжение на  $C_x$  изменится на величину  $\Delta U = q_0 / C_x$ . Это приращение напряжения измеряется вольтметром  $V$ . Затем измеряемая емкость вычисляется по формуле (4):

$$C_x = \frac{U_0 \cdot C_0}{\Delta U} \quad (4)$$

Измерение емкости конденсаторов при практическом применении модифицируется. Для передачи заряда от  $C_0$  в  $C_x$  используется дополнительная цепь передачи заряда, которая обеспечивает полный переток заряда, независимый от напряжения на  $C_x$ . Емкость эталонного конденсатора должна быть меньше емкости измеряемого:  $C_x > C_0$ , иначе приращение напряжения на  $C_x$  превысит предел измерения вольтметра. С другой стороны, если отношение емкостей  $C_0 / C_x$  очень мало, приращение напряжения, происходящее при передаче заряда,  $-\Delta U$  также окажется малым, что затруднит его измерение. В этом случае возможно многократное повторение цикла зарядки  $C_0$  и передачи заряда в  $C_x$ . С каждым циклом приращение напряжения  $\Delta U$  возрастает и увереннее измеряется вольтметром. При этом формула (1), выражающая  $C_x$  изменится очевидным образом (5):

$$C_x = \frac{n \cdot U_0}{\Delta U} C_0 \quad (5)$$

где,  $n$  – число циклов, в результате повторения которых напряжение на  $C_x$  изменилось на величину  $\Delta U$ .

Дополнительной проблемой описанного метода измерений является влияние входной цепи вольтметра на процесс зарядки  $C_x$ . Идеальный вольтметр не потребляет и не дает ток в цепь, к которой он подключен. Реальный вольтметр, входящий в состав лабораторной установки, почти идеален только в том случае, если измеряемое им напряжение находится в интервале 2 – 3 В. Если измеряемое напряжение меньше 2 В, вольтметр дает ток в измеряемую цепь. В нашем случае этот ток будет заряжать  $C_x$  и напряжение  $U_{cx}$  будет медленно увеличиваться. Если измеряемое напряжение больше 3 В, вольтметр потребляет ток, в нашем случае этот ток разряжает конденсатор  $C_x$  и напряжение  $U_{cx}$  медленно уменьшается. Величина входного тока вольтметра невелика, около  $10^{-8}$  А, однако конденсатор небольшой емкости может существенно зарядиться или разрядиться, если время измерений не будет достаточно малым.

### **Маркировка конденсаторов**

Для выбора эталонного конденсатора необходимо разобраться в способах считывания информации о параметрах конденсаторов. Нанесение этой инфор-

мации на корпус конденсатора называется маркировкой. Довольно трудно увидеть маркировку маленьких конденсаторов, потому что площадь поверхности их корпусов очень мала. Маркировка кодирует множество параметров конденсатора: величину емкости, погрешность изготовления, допустимое напряжение между обкладками, температурный коэффициент емкости и др. В настоящей лабораторной работе требуется только определить величину емкости.

Основной единицей измерения емкости является фарад (Ф). Один фарад – это огромное значение для большинства применений, поэтому обычные конденсаторы маркируются дольными единицами измерения.

$$1 \mu\text{F}, = 1 \text{ мкФ (микрофарад)} = 10^{-6} \text{ Ф.}$$

$$1 \text{ nF} = 1 \text{ нФ (нанофарад)} = 10^{-9} \text{ Ф.}$$

$$1 \text{ pF}, \text{ пФ} = 1 \text{ пФ (пикофарад)} = 10^{-12} \text{ Ф}$$

В случае большого корпуса конденсатора значение емкости наносится непосредственно на корпус (рисунок 2 а, б). Могут быть некоторые различия, но в большинстве случаев надо искать число с одной из единиц измерения емкости, описанных выше.

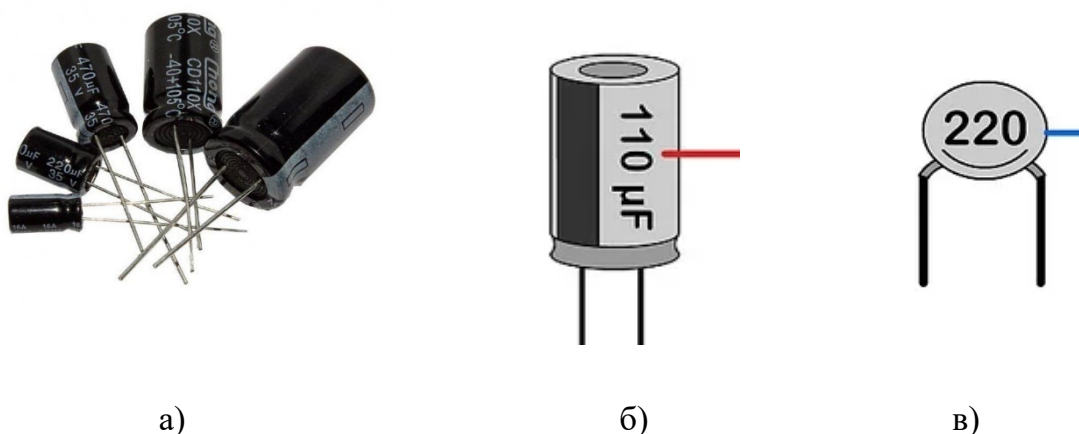


Рисунок 2. а) – электролитические конденсаторы; б) – маркировка больших конденсаторов; в) – числовой код на корпусе конденсатора

Если корпус конденсатора мал, для обозначения емкости используется числовой код. Чаще всего емкость конденсатора кодируется 3 десятичными цифрами, например 123. В этом случае две первые цифры – это емкость конденсатора в пикофарадах, а последняя – показатель степени десятичного множителя. Так в приведенном примере – 123 емкость конденсатора равна  $12 \cdot 10^3$  пф. Если имеем код 155, то емкость равна  $15 \cdot 10^5$  пф, что равно 1,5 мкФ. Определите емкость конденсатора, показанного на рисунке 3 в.

Нередко на корпусе указывается единица измерения емкости: р-пикофарад, μ-микрофарад, n-нанофарад. При этом код единицы измерения заменяет запятую в десятичной дроби, выражающей емкость конденсатора. Так

обозначение  $47 \mu$  означает емкость 47 микрофарад, а обозначение  $4 \mu 7$  – емкость 4,7 микрофарад. Если имеем обозначение  $\mu 47$ , то емкость равна 0,47 микрофарад. Определите емкости конденсаторов по следующим маркировкам: n33, 3n3, 33n, 680p, 6p8.

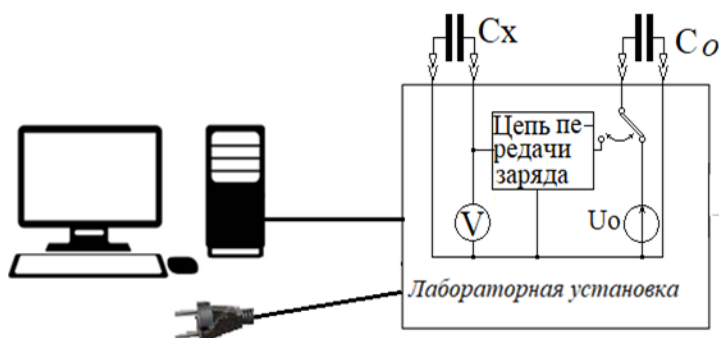
Промышленность радиоэлектроники выпускает конденсаторы (и резисторы) с рядами предпочтительных чисел E6 (разброс параметра емкости 20%), E12 – 10%, E24 – 5%, E48 -2,5% и т.д. (стр.53-54 ) Радиоэлектроника использует и элементную базу прецизионных элементов с рядами E96 или E192.

Лабораторная работа использует компьютерную технику и реализует некоторые современные принципы автоматизации измерений (стр. 46). В частности, стенд лабораторной работы:

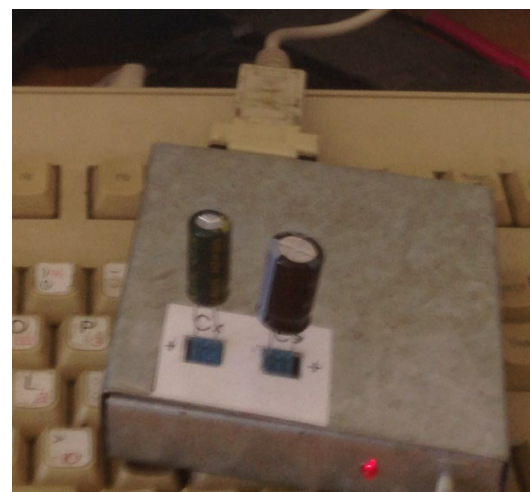
- рутинные измерения емкости конденсатора заменяет автоматизированной системой снятия показателей в координатной плоскости: напряжение (вертикальная ось) – число циклов подачи напряжений (горизонтальная ось);
- имеет панорамное отображение данных измерений;
- использует интеллектуальные системы радиоэлектроники на основе микропроцессорной техники.

### Стенд для измерения электроемкости конденсатора

Внешний вид лабораторной установки и полная схема лабораторного комплекта показаны на рисунке 3.



а)



б)

Рисунок 3. а) -блок-схема лабораторной установки для измерения электроемкости конденсатора; б) - фотография электронного блока лабораторной установки, обеспечивающего передачу заряда от конденсатора-эталона емкостью  $C_0$  к конденсатору с неизвестной емкостью  $C_x$ .

Лабораторная установка имеет гнезда для подключения эталонного и измеряемого конденсаторов. Переключатель эталонного конденсатора управля-



ется компьютером, который также получает от установки и отображает показания вольтметра -  $U_{cx}$ .

Для проведения измерений необходимо запустить на исполнение программу «С\_метр», ярлык которой легко найти на рабочем столе компьютера по яркой желтой семерке. После запуска программы на мониторе появляется вкладка с набором кнопок управления.

Первой следует нажать кнопку «Старт» и на появившееся сообщение об открытии порта ответить «Ок». На экране появится координатная сетка, у которой горизонтальная ось проградуирована в количестве измерительных циклов -  $n$ , а вертикальная в величине напряжения на измеряемом конденсаторе -  $U_{cx}$ . Изначально это напряжение равно нулю, так как к  $C_x$  подключен замыкатель. Измерительный цикл осуществляется последовательным нажатием кнопок «Зарядка», «Передача заряда». Этот цикл можно повторять многократно. При этом на мониторе отображается график зависимости  $U_{cx}$  от числа циклов. В верхней части экрана отображаются текущее количество проведенных циклов -  $n$  и величина  $U_{cx}$ .

Для проведения одиночного измерительного цикла необходимо кратко-временно нажать кнопку «Зарядка  $C_0$ ». При этом замыкатель  $C_x$  отключится, а  $C_0$  подключится к источнику напряжения  $U_0=5$  В. Так как вольтметр постоянно подключен к измеряемому конденсатору, начнется зарядка  $C_x$  входным током вольтметра и его показания будут медленно увеличиваться. При измерении больших емкостей это увеличение мало и им можно пренебречь. Если измеряемая емкость мала (десятки – сотни пикофарад), следует выждать паузу до прекращения изменений показаний вольтметра и записать где-нибудь эти стабильные показания.

После этого кратко-временно нажимаем кнопку «Передача заряда». Заряженный эталонный конденсатор подключится к измеряемому и передаст ему весь свой заряд. При этом произойдет скачок напряжения на измеряемом конденсаторе, что отобразится в виде изменения показаний вольтметра и скачком на графике напряжения  $U_{cx}$ . Емкость измеряемого конденсатора вычисляется по формуле (4).

Если скачок напряжения при передаче заряда в  $C_x$  мал, измерительный цикл можно повторить несколько раз (или десятков раз), пока суммарное приращение напряжения на  $C_x$  не превысит величину 2 – 2.5 вольта. После этого емкость измеряемого конденсатора вычисляется по формуле (5).

Ручное переключение  $C_0$  неудобно, его невозможно выполнять быстро и ритмично. Компьютерная программа предусматривает автоматическое повторение измерительных циклов до превышения напряжением  $U_{cx}$  величины 2.5 В. Для этого надо кратко-временно нажать кнопку «Автоматическое измерение». При этом произойдет обнуление заряда измеряемого конденсатора и последующее многократное повторение измерительного цикла, пока напряжение  $U_{cx}$  не превысит 2.5 В. Весь процесс измерений отобразится в виде графика на мони-

торе. Суммарное число циклов  $n$  и конечное напряжение  $\Delta U$  также отобразятся на экране. Их надо подставить в формулу (4) и вычислить  $C_x$ .

При измерении больших электроемкостей, десятков – сотен или тысяч микрофард времени, отводимого на обнуление заряда  $C_x$  (0.1 сек.) оказывается недостаточно. Поэтому перед нажатием кнопки «Автоматическое измерение» необходимо вручную осуществить разрядку  $C_x$  путем нажатия на соответствующую кнопку. Разрядку надо проводить до тех пор, пока не обнулятся три старших цифры значения  $U_{cx}$ .

### Проведение измерений

Для измерений можно выбрать любую пару из комплектов измеряемых и эталонных конденсаторов, подключив их к соответствующим гнездам установки. Однако для проведения «ручных» измерений желательно, чтобы электроемкости выбранных конденсаторов отличались не более, чем в несколько десятков раз. Начинать следует с конденсаторов больших емкостей. Это так называемые оксидные конденсаторы, в которых диэлектриком служит очень тонкая пленка окиси алюминия, а одна из обкладок - жидкий электролит. По этой причине оксидные конденсаторы также называют *электролитическими*. Очень важна полярность прикладываемого к конденсатору напряжения. Обычно минусовой (катодный) электрод помечен на корпусе знаком минус (рисунок 2 а). Иногда на корпусе указывается анодный вывод, помеченный знаком плюс. На лабораторной установке гнезда подключения также отмечены знаками плюс и минус. Выполните следующие действия:

- выберите для измерения пару оксидных эталонного и измеряемого конденсаторов. Подключите их с соблюдением полярности к соответствующим гнездам установки. Прочитайте маркировку эталонного конденсатора и определите его электроемкость;

- включите адаптер питания установки в розетку электрической сети;

- запустите на исполнение программу  $C\_метр$ , Нажмите кнопку «Старт» на появившейся вкладке и далее - «Ок» - на сообщение об открытии порта;

- рассмотрите графическое оформление вкладки, где расположена координатная сетка, показания вольтметра -  $U_{cx}$ , число измерительных циклов -  $n$ . В исходном состоянии  $n=0$  и  $U_{cx}=0$ ;

- для оценки удачности выбора конденсаторов можно сразу нажать кнопку «автоматическое измерение». После этого на мониторе можно наблюдать построение графика зависимости  $U_{cx}$  от числа измерительных циклов. Выбор конденсаторов можно считать удачным, если получен четкий ступенчатый график и результирующее число измерительных циклов составляет несколько десятков. Вычислите емкость измеряемого конденсатора по формуле (5);

- если число измерительных циклов превышает 100, нужно увеличить емкость эталонного конденсатора и повторить автоматическое измерение, предварительно обнулив  $U_{сх}$ . Перечертите график в тетрадь и отметьте на нем интервалы времени зарядки  $C_0$  и передачи заряда в  $C_x$ ;

- проведите «ручное измерение». Для этого обнулите  $U_{сх}$  и нажимайте поочередно кнопки «зарядка  $C_0$ », «Передача заряда в  $C_x$ ». Делать это надо по возможности быстро и ритмично, пока  $U_{сх}$  не превысит 2 В. Определите  $C_x$  по формуле (5);

- получив навык измерений, проделайте измерение емкости 5 – 6 конденсаторов из имеющегося набора  $C_x$ . Каждое измерение включает в себя выбор эталонного конденсатора, измерение, вычисление  $C_x$ .

### Контрольные вопросы

1. Проведите классификацию существующих методов измерений в метрологической науке.

2. Дайте определение физической величине - емкость конденсатора. Как различаются понятия емкость конденсатора и электроемкость конденсатора?

3. Какова размерность электроемкости в системе СИ?

4. Охарактеризуйте метод измерения емкости, используемый в лабораторной работе.

5. Покажите на полученных графиках фазы измерительного процесса: зарядка конденсатора емкостью  $C_0$  и передачи этого заряда в  $C_x$ .

6. Возможна ли замена местами эталонного и измеряемого конденсаторов? Как в этом случае изменится формула для вычисления  $C_x$ ?

7. Какие измерения в проведенной лабораторной работе являются прямыми, а какие – косвенными?

8. Что представляют собой системы предпочтительных чисел, используемые в метрологии для номиналов резисторов и конденсаторов.

9. Какие принципы автоматизации измерений реализованы в данной лабораторной работе?

### 3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ

#### 3.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ЗАЧЕТУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ»

1. Цели и задачи метрологии. Основные термины и понятия метрологии: измерение, средства измерений, единицы измерений, результат измерений, погрешность измерения.

2. Прямые, косвенные, абсолютные и косвенные измерения.

3. Методы измерений: непосредственной оценки, сравнения (нулевой метод, сравнения, замещения, совпадения)

4. Принципы измерений и способы представления знаний о погрешности измерений. Надежность измерения.

5. Ошибки измерения: методические, систематические, случайные, приборные, личные, округления, промахи.

6. Прямые равноточные измерения. Обработка результатов прямых равноточных измерений.

7. Косвенные измерения. Обработка результатов косвенных измерений.

8. Электро-, радиоизмерения. Измерение напряжений и токов в радиоэлектронике. Измерение напряжений разной величины и, разной частоты.

9. Осциллограф. Минимальный комплект осциллографа. Физическая модель осциллографа (структурная схема).

10. Канал X и канал Y осциллографа. Синхронизация и калибровка осциллографа.

11. Основные параметры осциллографа. Автоматизация измерений напряжения и времени в приборах серии АКПП 4115.

12. Измерительные генераторы радиоэлектроники. Физическая и математическая модели генератора радиоэлектроники. Условия генерации радиоэлектронной системы.

13. Генератор с мостом Вина. Условия стационарности генератора с мостом Вина.

14. Структурная блок-схема НЧ генератора с мостом Вина.

15. Мостовой измеритель параметров сопротивления резисторов (R), индуктивности соленоидов (L) и емкости конденсаторов (C).

16. Прямые и косвенные измерения сопротивления R резистивных элементов.

17. Измерение индуктивности соленоида L резонансным методом.

18. Измерение емкости конденсатора C на основе переходных процессов.

19. Измерение емкости конденсатора C на основе метода сравнения с эталоном.

20. Физические модели математических операций сложения, вычитания, умножения, деления средствами измерительной техники.

21. Физические модели математических операций дифференцирования и интегрирования средствами измерительной техники.
22. Решение линейного неоднородного дифференциального уравнения 2-го порядка средствами измерений.
23. Система технического нормирования и стандартизации (ТНиС).
24. Единая система документации в радиоэлектронике Международные и национальные системы стандартов (ЕСКД, ЕСТД, СОЕИ, ЕССПС).
25. Система предпочтительных чисел в элементной базе радиоэлектроники (ряды E24, E48, E96, E192 и др.)
26. Виды документации в радиоэлектронике. Способы представлений знаний о работе радиоэлектронных измерительных систем (блок-схема, функциональная схема, принципиальная электрическая схема).
27. Сертификация в радиоэлектронике. Виды сертификатов (компетентный, соответствия, эксперта-аудитора по качеству).

### **Письменные задание зачета (примерное)**

#### **Обработка результатов прямых и косвенных измерений в электрической цепи постоянного тока**

Выполнить задания 1 и 2 в соответствии своего варианта. Вариант студента определяется по списку обучаемых в журнале старосты учебной группы.

##### **Задание 1.**

Необходимо измерить ток  $I$ . Имеются два амперметра: один класса точности -  $K_{I1}$ , с пределом измерений -  $I_{пр1}$ ; другой класса точности  $K_{I2}$  и пределом измерений  $I_{пр2}$ . Определите у какого прибора меньше предел допускаемой основной относительной погрешности и какой прибор лучше использовать для измерения?

Данные вариантов студентов приведены в Таблице 1

##### **Задание 2.**

В соответствии данных своего варианта, на основе закона Ома для участка цепи, определить абсолютную  $\Delta R$  и относительную  $\varepsilon$  погрешности косвенных измерений сопротивления  $R = U/I$  резистора. Показания вольтметра -  $U_V$ , показания миллиамперметра -  $I_A$ . Предел, на котором измеряется напряжение -  $U_{пр}$ ; предел, на котором измеряется ток -  $I_{пр}$ . Класс точности вольтметра -  $K_V$ ; класс точности амперметра -  $K_A$ .

Данные вариантов студентов учебной группы приведены в Таблице 2.

Таблица 1. Данные задания 1.

В-т	Измеряемый ток I, А	$K_{11}$	$I_{пр1}, А$	$K_{12}$	$I_{пр2}, А$
1	4	0,1	20	1,0	10
2	2	0.2	5	1,5	2
3	6	0,5	20	2,5	10
4	9	1,0	20	4,0	10
5	8	1,5	20	5,0	10
6	9	2,5	10	2,0	9
7	100	4,0	200	0,5	120
8	15	1,0	20	0,2	30
9	8	1,5	20	2,5	10
10	24	4,0	30	2,5	25
11	35	0,1	50	4,0	40
12	25	0.2	50	0,05	30
13	26	0,5	50	0,1	30
14	36	1,0	50	0,25	40
15	13	1,5	20	1,0	15
16	16	2,5	20	1,5	30
17	4	4,0	20	2,5	10
18	3	1,0	20	4,0	10
19	2	4,0	10	0,01	5
20	1	1,0	10	0,5	5
21	12	1,0	20	4,0	12
22	1	1,5	5	4,0	2
23	3	2,5	5	4,0	3
24	25	4,0	50	0,1	50
25	22	0,1	50	0,05	25

Таблица 2. Данные задания 2.

В-т		Показания вольтметра $U_v$ , В	Предел изме- рения вольт- метром $U_{пр}$ , В	$K_v$	Показания амперметра $I_A$ , мА	Предел изме- рения ампер- метра, $I_{пр}$ мА	$K_A$
1		5	5	0,1	12	20	0,05
2		6	10	0,2	15	20	0,1
3		7	10	0,5	16	20	0,2
4		8	10	1,0	13	20	0,5
5		9	10	1,5	24	30	1,0
6		10	10	2,5	45	60	1,5
7		11	15	4,0	36	60	2,5
8		12	15	4,0	54	60	4,0
9		13	15	2,0	53	60	2,5
10		14	15	0,1	35	40	4,0
11		15	20	0,1	13	20	10,0
12		16	20	0,2	26	30	0,05
13		17	20	0,5	98	100	0,1
14		18	20	1,0	68	100	0,2
15		19	20	1,5	90	100	0,5
16		20	20	2,5	45	100	1,0
17		25	30	4,0	32	40	1,5
18		27	30	0,5	56	100	2,5
19		36	30	1,0	84	100	4,0
20		25	30	1,0	39	40	4,0
21		23	30	0,1	23	30	2,5
22		16	30	0,2	10	20	1,0
23		12	15	0,5	26	30	0,1
24		44	100	1,0	58	100	0,2
25		60	100	1,5	100	100	0,5

#### **4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ**

##### **4.1 УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ»**

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»

Метрология, стандартизация и сертификация  
в радиоэлектронике

Учебная программа учреждения высшего образования по учебной  
дисциплине для специальностей:

6-05-0713-02	Электронные системы и технологии
6-05-0611-05	Компьютерная инженерия (профилизация - программируемые мобильные системы)
6-05-0611-05	Компьютерная инженерия (профилизация - вычислительные машины, системы и сети)



Учебная программа составлена на основе образовательных стандартов ОСВО для специальностей: 6-05-0713-02 – 2023 и 6-05-0611-05-2023, утвержденных Министерством образования Республики Беларусь, регистрационный № 257; а также учебных планов специальностей на 2024 г.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

К. М. Маркевич, старший преподаватель кафедры физики учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

О. Н. Прокопья, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств учреждения образования «Брестский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент;

А. В. Демидчик, заведующий кафедрой общей и теоретической физики «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физики

Методической комиссией факультета электронно-информационных систем БрГТУ

Научно-методическим советом БрГТУ

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» относится к циклу общепрофессиональных дисциплин и составляет основу подготовки современного инженера. Программа разработана на основе компетентностного подхода и требований к формированию компетенций, сформулированных в образовательных стандартах.

Цель преподавания дисциплины: обеспечение студентов знаниями по метрологии, основам электро-, радиоизмерений; формирование умений и навыков для выполнения измерений, правильного применения технических актов в разных сферах своей будущей профессиональной деятельности. Дисциплина призвана систематизировать и углубить знания, умения и навыки студентов (компетенции), полученные по другим предметам, позволяет более эффективно использовать достижения в области метрологии и измерительной техники.

Задачи дисциплины определяются квалификационной характеристикой и требованиями к подготовке инженера и, ее ролью в системе непрерывной подготовки специалиста. В результате изучения разделов дисциплины обучаемый должен:

*знать:*

- основные методы и направления работ по стандартизации и сертификации и условия применения их при решении задач в области информационных технологий и радиоэлектроники;
- принципы государственной системы обеспечения единства измерений;
- основы теории погрешностей;
- основные принципы, методы и средства измерений электрических величин в широком диапазоне частот и широких пределах значений измеряемых величин;
- типы современных электро- и радиоизмерительных приборов;

*уметь:*

- анализировать параметры средств измерений, устанавливать их соответствие действующим нормам;
- правильно применять средства и методы измерений при проведении экспериментальных исследований;
- анализировать технические и метрологические характеристики средств измерений при выборе метода измерения и измерительной аппаратуры для решения конкретной измерительной задачи;
- интерпретировать полученные результаты измерений с точки зрения обеспечения единства измерений и достоверности полученных результатов;
- технически и метрологически правильно выбирать методы измерения и соответствующую измерительную аппаратуру;
- выполнять измерения с минимальным количеством систематических погрешностей;

- оценивать точность и оформлять результаты измерений в соответствии с действующими нормами;

- грамотно эксплуатировать современную электро-, радиоизмерительную аппаратуру;

*иметь представление:*

- о международных организациях по стандартизации, сертификации и метрологии и их деятельности;

- об эталонах единиц физических величин и о государственной системе обеспечения единства измерений, сформированной на их основе;

об электро-, радиоизмерительной аппаратуре пятого поколения, разрабатываемой в настоящее время на основе достижений современной электроники, средств вычислительной техники и информационных технологий.

В результате изучения дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» у студентов формируются компетенции: СК-7 – применять методы и способы контроля параметров, стандартизации и сертификации радиоэлектронных средств и систем.

Базовыми дисциплинами по разделам курса (Основы метрологии. Электро-, радиоизмерения) являются: «Высшая математика», «Физика», «Теория вероятностей и математическая статистика», «Электротехника», «Техническая электроника», «Цифровая и вычислительная техника» и др.

**План учебной дисциплины для дневной формы получения  
высшего образования**

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Форма промежуточной аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары	
6-05-0713-02	Электронные системы и технологии	2	4	102	3	48	16	16	16		зачет
6-05-0611-05	Компьютерная инженерия (программируемые мобильные системы)	2	4	102	3	48	16	16	16		зачет
6-05-0611-05	Компьютерная инженерия (вычислительные машины, системы и сети)	2	4	102	3	48	16	16	16		зачет

**План учебной дисциплины для заочной формы получения  
высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием**

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Форма промежуточной аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары	
6-05-0713-02	Электронные системы и технологии	2	4	102	3	12	4	4	4		зачет

**1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА  
1.1 ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ**

**РАЗДЕЛ 1 ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ**

**Тема 1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Роль измерений в науке, технике, жизнедеятельности человека. Значение дисциплины в подготовке инженеров. Основные понятия дисциплины: метрология, физические величины, единицы величин, измерение, средства измерений и их общая характеристика, погрешности измерений и средств измерений. Стандартное представление результатов измерений. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая служба. Передача размеров физических величин. Эталоны. Поверочные схемы.

#### Тема 1.2 ПОГРЕШНОСТИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ И СЛУЧАЙНЫЕ. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Основы теории погрешностей. Оценка погрешностей. Систематические и случайные погрешности. Оценка случайных погрешностей прямых измерений. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений. Критерий грубых погрешностей. Приборные погрешности, погрешности округления. Классы точности приборов. Результирующая погрешность измерения.

## РАЗДЕЛ 2 ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

#### Тема 2.1 ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И МОЩНОСТИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Сведения о цифровых измерительных приборах, реализующих аналогово-цифровое преобразование. Измерение напряжений разных величин и разных частот. Измерение мощности. Понятия мгновенной, средней, импульсной, полной, активной и реактивной мощности. Измерение мощности на ВЧ и СВЧ диапазонах. Исследование формы электрических сигналов на основе осциллографа.

#### Тема 2.2 ОСЦИЛЛОГРАФ. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ВРЕМЕНИ

Универсальные осциллографы и их основные разновидности. Одноканальные, многоканальные, многолучевые, многофункциональные и цифровые осциллографы. Физическая модель и основные параметры осциллографов. Электронно-лучевые и цифровые осциллографы. Стандартные способы представления знаний электроники на основе структурной схемы осциллографа. Требования к функциональной и принципиальной электрическим схемам осциллографа.

Измерительный комплекс электро-, радиоэлектроники: генератор сигналов, объект исследований и осциллограф. Генератор качающей частоты. Осциллографические измерения и их автоматизация.

#### Тема 2.3 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Математическая и физическая модели генератора. Функциональная электрическая схема генератора с мостом Вина. Стандартизация в представлении знаний электроники на основе функциональной схемы генератора с мостом Вина. Особенности принципиальной электрической схемы генератора. Классификация и основные параметры измерительных генераторов. Генераторы гармонических сигналов НЧ, ВЧ и СВЧ диапазонов. Генераторы импульсов.

## Тема 2.4 ИЗМЕРЕНИЕ ЦЕПЕЙ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Математическое описание цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами. Модели R, L, C параметров, соответственно, резисторов, соленоидов и конденсаторов в цепях с распределенными элементами. Мостовые измерители параметров двухполюсников. Измерение параметров пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности) и активных (диоды, транзисторы, микросхемы) двухполюсников. Измерения в цепях с распределенными параметрами. Токи, напряжения и мощность в цепях с распределенными параметрами. Измерение КСВ, КБВ цепи с распределенными параметрами.

## Тема 2.5 АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Цифровые и аналоговые автоматизированные средства измерений. Применение процессоров в измерительных приборах. Физические модели математических операций на основе аналоговой электроники. Решение дифференциальных уравнений на основе автоматизированных средств измерений. Информационно-измерительные системы. Интерфейсы агрегатных комплексов средств измерений. Стандартизация интерфейсов последовательного и параллельного типа.

## РАЗДЕЛ 3 СТАНДАРТИЗАЦИЯ, НОРМИРОВАНИЕ И СЕРТИФИКАЦИЯ В СФЕРЕ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

### Тема 3.1 ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ (ТНиС), И СЕРТИФИКАЦИЯ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

Цели и задачи ТНиС. Государственный Комитет по стандартизации (Госстандарт) РБ, его структура, функции и правовое положение. Основные методы стандартизации: ограничение, типизация, унификация, агрегатирование. Система предпочтительных чисел. Единая система технической документации в электронике (ЕСКД). Виды технической документации. Разработка технической документации. Стандартизация ЕСКД на международном, региональном и национальном уровнях. Основы сертификации. Система подтверждения соответствия в РБ.

### 1.2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ НАЗВАНИЕ

Целью практических занятий является закрепление, расширение и углубление теоретического материала курса дисциплины, приобретение навыков и умений в решении расчетных задач, активизация самостоятельной работы студентов.

1. Основные параметры теории погрешностей. Классы точности измерительных приборов.
2. Обработка результатов многократных наблюдений при прямых равноточных измерениях.
3. Составные критерии для оценки распределения измерений на принадлежность его к нормальному.

4. Оценка погрешностей однократных измерений.
5. Определение математических ожиданий среднеквадратичных отклонений в электрических схемах.
6. Математическая обработка косвенных измерений.
7. Разработка математических моделей на основе измерений методом наименьших квадратов.
8. «Хи»-квадрат в создании математических моделей ВАХ. Математическое ожидание, СКО, ССКО математических моделей электрической схемы.

### 1.3 ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ, ИХ НАЗВАНИЕ

Цель проведения лабораторных работ: закрепление теоретического материала дисциплины, освоение современной измерительной техники в радиоэлектронике, использование компьютеров в обработке результатов измерений и, в деле автоматизации измерений. Многообразие тем лабораторных работ позволяет реализовывать дифференцированный подход в обучении студентов. Преподаватель, в соответствии с учебным планом дисциплины, определяет минимальный список лабораторных работ, которые должен выполнить студент.

Темы лабораторных работ:

1. Цифровой осциллограф. Осциллографические измерения.
2. Обработка результатов многократных наблюдений при косвенных измерениях в среде EXCEL.
3. Оценка полученного множества прямых измерений на предмет его принадлежности к нормальному распределению в среде EXCEL.
4. Гармонические токи и напряжения в R, L, C цепях.
5. Измерение частотных характеристик двухполюсников и четырехполюсников с использованием осциллографа.
6. Измерение характеристик и параметров полупроводниковых диодов.
7. Измерение характеристик и параметров полупроводниковых транзисторов.
8. Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов.
9. Измерение в резистивных цепях постоянного тока.
10. Измерение емкости конденсатора C на основе переходных процессов в цепи с использованием осциллографа.
11. Измерение индуктивности соленоида L с помощью осциллографа на основе резонансного метода.
12. Измерение емкости конденсатора методом сравнения с эталоном.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ (РАБОТЕ)

Выполнение курсового проекта по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» не предусмотрено типовой программой

**3.1. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ  
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

специальность 6-05-0611-05 Компьютерная инженерия  
(профилизация: Программируемые мобильные системы)  
для дневной формы получения высшего образования

Номер разде- ла, те- мы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самост. работы	Форма контроля знаний
		ЛК	ЛЗ	ПЗ	СЗ		
	4-й семестр						
1	Основы метрологии						
1.1	Общие сведения об метрологии и измерениях, понятия и определения	2	4	4		14	опрос, защита ЛР
1.2	Погрешности: систематические и случайные. Обработка результатов прямых и косвенных измерений	2	2	6		20	опрос, защита ЛР
2	Электрорадиоизмерения						
2.1	Измерение токов, напряжений и мощности в радиоэлектронике. Осциллограф	2	2	6		4	опрос, защита ЛР
2.2	Осциллографические измерения напряжений и времени	2	2				опрос, защита ЛР
2.3	Измерительные генераторы	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.4	Измерения в цепях со сосредоточенными и распределенными параметрами	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.5	Автоматизация измерений	2	2			6	
3	Стандартизация, нормирование и сертификация в сфере радиоэлектроники						
3.1	Техническое нормирование и стандартизация в радиоэлектронике. Методы стандартизации. Единая система технической документации. Основы сертификации	2				6	опрос
	Всего за семестр: 102	16	16	16		54	
	Промежуточная аттестация						зачет
	Всего по дисциплине: 102	16	16	16		54	



**3.2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ  
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

специальность 6-05-0611-05 Компьютерная инженерия  
(профилизация: Вычислительные машины, системы и сети)  
для дневной формы получения высшего образования

Номер разде- ла, те- мы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самост. работы	Форма контроля знаний
		ЛК	ЛЗ	ПЗ	СЗ		
4-й семестр							
1	Основы метрологии						
1.1	Общие сведения об метрологии и измерениях, понятия и определения	2	4	4		14	опрос, защита ЛР
1.2	Погрешности: систематические и случайные. Обработка результатов прямых и косвенных измерений	2	2	6		20	опрос, защита ЛР
2	Электрорадиоизмерения						
2.1	Измерение токов, напряжений и мощности в радиоэлектронике. Осциллограф	2	2	6		4	опрос, защита ЛР
2.2	Осциллографические измерения напряжений и времени	2	2				опрос, защита ЛР
2.3	Измерительные генераторы	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.4	Измерения в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.5	Автоматизация измерений	2	2			6	
3	Стандартизация, нормирование и сертификация в сфере радиоэлектроники						
3.1	Техническое нормирование и стандартизация в радиоэлектронике. Методы стандартизации. Единая система технической документации. Основы сертификации	2				6	опрос
	Всего за семестр: 102	16	16	16		54	
	Промежуточная аттестация						зачет
	Всего по дисциплине: 102	16	16	16		54	

**3.3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ  
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

специальность 6-05-0713-02 Электронные системы и технологии

для дневной формы получения высшего образования

Номер разде- ла, те- мы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самост. работы	Форма контроля знаний
		ЛК	ЛЗ	ПЗ	СЗ		
	4-й семестр						
1	Основы метрологии						
1.1	Общие сведения об метрологии и измерениях, понятия и определения	2	4	4		14	опрос, защита ЛР
1.2	Погрешности: систематические и случайные. Обработка результатов прямых и косвенных измерений	2	2	6		20	опрос, защита ЛР
2	Электрорадиоизмерения						
2.1	Измерение токов, напряжений и мощности в радиоэлектронике. Осциллограф	2	2	6		4	опрос, защита ЛР
2.2	Осциллографические измерения напряжений и времени	2	2			0	опрос, защита ЛР
2.3	Измерительные генераторы	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.4	Измерения в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами	2	2			2	опрос, защита ЛР
2.5	Автоматизация измерений	2	2			6	
3	Стандартизация, нормирование и сертификация в сфере радиоэлектроники						
3.1	Техническое нормирование и стандартизация в радиоэлектронике. Методы стандартизации. Единая система технической документации. Основы сертификации	2				6	опрос
	Всего за семестр: 102	16	16	16		54	
	Промежуточная аттестация						зачет
	Всего по дисциплине: 102	16	16	16		54	

**3.4. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ  
В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

специальность 6-05-0713-02 Электронные системы и технологии  
для заочной формы получения высшего образования, интегрированного со  
средним специальным образованием

Номер разде- ла, те- мы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самост. работы	Форма контроля знаний
		ЛК	ЛЗ	ПЗ	СЗ		
	4-й семестр						
1	Основы метрологии						
1.1	Основные понятия и определе- ния метрологии. Обработка ре- зультатов измерений	2		4		44	опрос,
2	Электрорадиоизмерения						
2.1	Осциллограф. Измерительные генераторы	2	4			40	опрос, защита ЛР
3.1	Сертификация					6	
	Всего за семестр: 102	4	4	4		90	
	Промежуточная аттестация						зачет
	Всего по дисциплине: 102	4	4	4		90	

## 4. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 4.1 Перечень литературы

#### Основная

1. Гончаров, А. А. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие для студ. высш. уч. зав-й / А. А. Гончаров, В. Д. Копытов. – М. : «Академия», 2012.
2. Пелевин, В. Ф. Метрология и средства измерений: уч. пособ. для вузов / В. Ф. Пелевин. – Минск : Новое знание, 2013. – 272 с. (гриф: МО РБ)
3. Нефедов, В. И. Электрорадиоизмерения / В. И. Нефедов, А. С. Сигов. – 2018. – Obuchalka.org.
4. Ляльков, С. В. Методы и средства в инфокоммуникационных системах: учеб. пособие (лабораторный практикум в 2-х частях) / С. В. Ляльков, А. В. Гусинский и др. – Минск : БГУИР, 2014. – 110 с. (гриф: УМО РБ)
5. Атамалян, Э. Г. Приборы и методы измерения электрических величин / Э. Г. Атамалян. – М. : Высшая школа, 2011. – 384 с.
6. Кириллов, В. И. Метрологическое обеспечение технических систем : уч. пособ. для вузов / В. И. Кириллов. – Минск : Новое знание, 2013. – 700 с. (гриф: МО РБ).
7. Шишмарев, В. Ю. Электроизмерения / В. Ю. Шишмарев, В. И. Шанин. – М. : Юрайт, 2019. – biblio-online.ru.
8. Закон Республики Беларусь "Об обеспечении единства измерений".

#### Дополнительная

9. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники Т. 1 / Г. И. Атабеков. – М. : Энергия, 2011.
10. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники Т. 2 / Г. И. Атабеков. – М. : Энергия, 2011.
11. Манаев, Е. И. Основы радиоэлектроники / Е. И. Манаев. – М. : Радио и связь, 2007.
12. Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М. : Высшая школа, 1999.
13. Горюнов, Н. Н. Полупроводниковые приборы: транзисторы / Н. Н. Горюнов. – М. : Энергоатомиздат, 2001.
14. Горюнов, Н. Н. Полупроводниковые приборы: диоды / Н. Н. Горюнов. – М. : Энергоатомиздат, 2000.

4.2. Перечень компьютерных программ, наглядных и других пособий, методических указаний и материалов, технических средств обучения, оборудования для выполнения лабораторных работ

Методические указания и материалы

15 Маркевич, К. М. Методические указания к проведению практических занятий по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация в информационных технологиях и электронике» / К. М. Маркевич. – Брест : БрГТУ, 2013. – 35 с.

16. Маркевич, К. М. Методические указания к выполнению лабораторных работ («Осциллографические измерения напряжения и временных интервалов» и «Измерение частотных характеристик четырехполюсника с использованием осциллографа») по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в информационных технологиях и электронике» / К. М. Маркевич, С. В. Чугунов. – Брест : БрГТУ, 2010. – 19 с.

17. Маркевич, К. М. Методические указания к выполнению лабораторных работ («Измерение физических характеристик и параметров полупроводниковых диодов» и «Измерение физических параметров выпрямленных переменных напряжений и токов») по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в информационных технологиях и электронике» / К. М. Маркевич, С. В. Чугунов. – Брест : БрГТУ, 2010. – 21 с.

18. Маркевич К. М. Методические указания к выполнению лабораторных работ («Измерение характеристик и параметров полупроводниковых транзисторов» и «Цепи с сосредоточенными и распределенными R, L, C элементами») по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в информационных технологиях и электронике» / К. М. Маркевич, С. С. Дереченик, С. В. Чугунов. – Брест : БрГТУ, 2011. – 19 с.

19. Маркевич, К. М. Осциллографические измерения: мет. пособ. для лаб. раб. Ч3 / К. М. Марквич, Л. А. Величко, Н. Н. Ворсин. - Брест: БрГТУ, 2021. – 34 с.

20. Маркевич, К. М. Гармонические токи и напряжения в электрических цепях: мет. пособ. для лаб. раб. Ч3 / К. М. Марквич, Л. А. Величко, Н. Н. Ворсин. – Брест : БрГТУ, 2021. – 34 с.

21. Ворсин, Н. Н. Измерение элементарного заряда. Вольт-амперная характеристика: мет. пособ. для лаб. раб. Ч3 / Н. Н. Ворсин Л. А. Величко, К. М. Маркевич. – Брест : БрГТУ, 2021. – 34 с.

22. Маркевич, К. М. Резистивные цепи постоянного тока: мет. пособ. для лаб. раб. Ч1 / К. М. Марквич, Л. А. Величко, Н. Н. Ворсин. – Брест : БрГТУ, 2018. – 34 с.

23. Маркевич, К. М. Определение емкости конденсатора на основе переходных процессов в электрической цепи: мет. пособ. для лаб. раб. Ч2 / К. М. Марквич, Л. А. Величко, Н. Н. Ворсин. – Брест : БрГТУ, 2018. – 22 с.

24. Маркевич, К. М. Резонанс в электрической цепи: мет. пособ. для лаб. раб. Ч2 / К. М. Марквич, Л. А. Величко, Н. Н. Ворсин. – Брест : БрГТУ, 2018. – 22 с.

25. Ворсин, Н. Н. Измерение емкости конденсатора методом сравнения с эталоном: мет. пособ. для лаб. раб. / Н. Н. Ворсин, Л. А. Величко. – Брест : БрГТУ, 2022. – 10 с.

### Оборудование для выполнения лабораторных работ

1. Лабораторный стенд для измерений АЧХ, ФЧХ характеристик измерительного комплекса: осциллограф – генератор.
2. Лабораторный стенд для измерений гармонических токов и напряжений в R, L, C цепях.
3. Лабораторный стенд для измерений параметров и характеристик полупроводниковых диодов.
4. Лабораторный стенд для измерений параметров и характеристик полупроводниковых транзисторов.
5. Лабораторный стенд для измерений параметров и характеристик выпрямленных переменных токов и напряжений.
6. Лабораторный стенд для измерения емкости конденсатора на основе переходных процессов.
7. Лабораторный стенд для измерения индуктивности соленоида на основе резонансного метода.
8. Автоматизированная компьютерная установка для снятия ВАХ элементной базы радиоэлектроники (резисторов, диодов, транзисторов) и определения заряда электрона.
9. Автоматизированная компьютерная установка для определения емкости конденсатора на основе метода сравнения.
10. Лабораторный стенд для измерений в цепях постоянного тока.
11. Компьютерная программа EXCEL для обработки сгенерированного результата измерений на принадлежность полученного массива к нормальному распределению данных.
12. Компьютерная программа EXCEL для обработки косвенных измерений параметров радиоэлектроники.

### Перечень контрольных работ, их содержание

№	Наименование контрольной работы	Содержание (согласно варианту задания)
1	Обработка результатов наблюдений при прямых равноточных измерениях	Сгенерировать массив измерений, рассчитать случайную и итоговую погрешности измерения. Определить относительную погрешность измерения
2	Составные критерии (их 2) для оценки распределения измерений на его принадлежность к нормальному	Найти квантили распределения статистики, установить уровень значимости, определить смещенную оценку СКО и оценить полученные результаты на выполнения критерия 1 Определить нормальность распределения измерений по таблице Лапласа (критерий 2)
3	Хи-квадрат в создании математических моделей измерений. Определение математических ожиданий, среднеквадратичных отклонений в оценке электрических схем	Получить математические модели для линейных и нелинейных участков ВАХ полупроводниковых элементов радиоэлектроники. Определить математическое ожидание, СКО, ССКО математических моделей электрической схемы

#### 4.3. Перечень средств диагностики результатов учебной деятельности

Для текущего контроля по учебной дисциплине и диагностике компетенций (знаний, умений, навыков) студентов используются следующие диагностические формы:

1. собеседование;
2. контрольные работы;
3. проведение текущих опросов по отдельным разделам (темам) учебной дисциплины;
4. оценивание самостоятельной индивидуальной работы студента на практических занятиях с их устной защитой;
5. письменные отчеты по лабораторным работам с их устной защитой;
6. оценивание успешной учебной деятельности обучаемых на основе рейтинговой системы контроля компетенций студентов.

В качестве формы промежуточной аттестации по учебной дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» предусмотрен зачет, для всех специальностей учебной программы.

#### 4.4 Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы обучающихся по учебной дисциплине

Самостоятельная работа студентов при изучении учебной дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» осуществляется самостоятельно вне аудитории (в библиотеке, научной лаборатории, в домашних условиях и т.д.) с использованием различных средств обучения и источников информации и призвана способствовать усилению практической направленности обучения.

Целями самостоятельной работы являются:

- активизация учебно-познавательной деятельности обучающихся;
- формирование у обучающихся умений и навыков самостоятельного приобретения и обобщения знаний и применение их на практике;
- саморазвитие и самосовершенствование.

При изучении учебной дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация в радиоэлектронике» используются следующие формы самостоятельной работы:

- управляемая самостоятельная работа, предусматривающая самостоятельное выполнение студентом учебного или исследовательского задания;
- самостоятельная работа, организуемая студентом вне аудитории (подготовка к зачету).

Время, отведенное на самостоятельную работу, может использоваться студентами на:

- проработку тем (вопросов), вынесенных на самостоятельное изучение;
- решение проблемно-ситуационных задач;
- выполнение исследовательских и творческих заданий;
- подготовку сообщений, тематических докладов, рефератов, презентаций;
- выполнение практических заданий;
- конспектирование учебной литературы;
- подготовку отчетов;
- составление обзора научной литературы по заданной теме;
- подготовку докладов и презентаций.

Контроль за самостоятельной работой студентов осуществляется преподавателем как во время аудиторных занятий, так и на основе использования дистанционных образовательных технологий в виде тестов, обсуждения и защиты типовых расчетов, экспресс-опросов и других мероприятий. Для эффективной организации самостоятельной работой обучаемых используется рейтинговая система оценки компетенций студентов по дисциплине.



Содержание учебного материала самостоятельной работы студентов

№ темы	Для дневной формы обучения
1.1-1.2	<p>Среднеквадратичное отклонение (СКО). Среднее значение среднеквадратичного отклонения (ССКО). Таблицы Стьюдента.</p> <p>Математическая обработка результатов косвенных измерений.</p> <p>Нормальное распределение данных результатов измерений, распределение Гаусса. Составные критерии для оценки распределения измерений на принадлежность его к нормальному распределению. Критерий 1. Критерий 2. Таблицы Лапласа.</p> <p>Оценка распределения массива измерений на принадлежность его к нормальному на основе критерия «хи-квадрат».</p> <p>Оценка погрешностей однократных измерений.</p> <p>«хи-квадрат» в построении математических моделей ВАХ полупроводниковых элементов радиоэлектроники.</p> <p>Рекомендуемая литература: [1]-[3], [5]- [7], [13]-[15].</p>
2.1-2.4	<p>Мгновенная, средняя, полная, активная, реактивная, импульсная мощности в радиоэлектронике. Формы электрических сигналов и их параметры.</p> <p>Стандартизация в представлении знаний в радиоэлектронике: блок-схема электронной системы, функциональная электрическая схема электронной системы, принципиальная электрическая схема электронной системы.</p> <p>Стандартизация интерфейсов последовательного и параллельного типа.</p> <p>МП техника в автоматизации измерений.</p> <p>Рекомендуемая литература: [3], [5], [7], [9]-[12][15]-[25].</p>
3.1	<p>Системы технической документации в сфере радиоэлектроники на республиканском и международном уровнях. Сертификация. Объекты и средства сертификации в радиоэлектронике. Подтверждение сертификации в РБ.</p> <p>Рекомендуемая литература: [6],[8].</p>

Содержание учебного материала самостоятельной работы студентов

№ темы	Для заочной формы обучения
1.1-1.2	<p>Метрологическая служба. Передача размеров физических величин. Эталоны. Поверочные схемы.</p> <p>Основы теории погрешностей. Оценка погрешностей. Систематические и случайные погрешности. Оценка случайных погрешностей прямых измерений. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений. Критерий грубых погрешностей. Приборные погрешности,</p>

	<p>погрешности округления. Классы точности приборов. Результирующая погрешность измерения.</p> <p>Среднеквадратичное отклонение (СКО). Среднее значение среднеквадратичного отклонения (ССКО). Таблицы Стьюдента.</p> <p>Математическая обработка результатов косвенных измерений.</p> <p>Нормальное распределение данных результатов измерений, распределение Гаусса. Составные критерии для оценки распределения измерений на принадлежность его к нормальному распределению. Критерий 1. Критерий 2. Таблицы Лапласа.</p> <p>Оценка распределения массива измерений на принадлежность его к нормальному на основе критерия «хи-квадрат».</p> <p>Оценка погрешностей однократных измерений.</p> <p>«хи-квадрат» в построении математических моделей ВАХ полупроводниковых элементов радиоэлектроники.</p> <p>Рекомендуемая литература: [1]-[3], [5], [7], [13]-[15].</p>
<p>2.1- 2.4</p>	<p>Измерения токов напряжений и мощности в радиоэлектронике.</p> <p>Мгновенная, средняя, полная, активная, реактивная, импульсная мощности в радиоэлектронике. Формы электрических сигналов и их параметры. Осциллографическое измерение электрических сигналов.</p> <p>Стандартизация в представлении знаний в радиоэлектронике: блок-схема электронной системы, функциональная электрическая схема электронной системы, принципиальная электрическая схема электронной системы (на примере блок-схемы осциллографа).</p> <p>Измерительный комплекс электро-, радиоэлектроники: генератор сигналов, объект исследований и осциллограф. Генератор качающей частоты. Осциллографические измерения и их автоматизация.</p> <p>Классификация и основные параметры измерительных генераторов. Генераторы гармонических сигналов НЧ, ВЧ и СВЧ диапазонов. Генераторы импульсов</p> <p>Математическое описание цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами. Физические модели R, L, C параметров, соответственно, резисторов, соленоидов и конденсаторов в цепях с распределенными элементами. Мостовые измерители параметров двухполюсников. Измерение параметров пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности) и активных (диоды, транзисторы, микросхемы) двухполюсников. Измерения в цепях с распределенными параметрами. Токи, напряжения и мощность в цепях с распределенными параметрами. Измерение КСВ, КБВ цепи с распределенными параметрами.</p> <p>Цифровые и аналоговые автоматизированные средства измерений. Применение процессоров в измерительных приборах.</p> <p>Физические модели математических операций на основе аналоговой электроники. Решение дифференциальных уравнений на основе автоматизированных средств измерений. Информационно-измерительные</p>

	<p>системы. Интерфейсы агрегатных комплексов средств измерений. Стандартизация интерфейсов последовательного и параллельного типа.</p> <p>Рекомендуемая литература: [3]-[5], [7], [9]-[12],[15]-[25].</p>
3.1	<p>Системы технической документации в сфере радиоэлектроники на республиканском и международном уровнях. Сертификация. Объекты и средства сертификации в радиоэлектронике. Подтверждение сертификации в РБ.</p> <p>Рекомендуемая литература: [6],[8].</p>

### ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Дисциплина, изучение которой связано с дисциплиной рабочей учебной программы	Кафедра, обеспечивающая изучение этой дисциплины	Предложения кафедры об изменениях в содержании программы	Принятое решение кафедрой, разработавшей рабочую учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Теория электрических цепей	Автоматизация технологических процессов и производств		
Электронные приборы	Автоматизация технологических процессов и производств		

Содержание учебной программы согласовано с кафедрой автоматизации технологических процессов и производств

Заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств,  
кандидат технических наук, доцент

О.Н.Прокопеня

