

Федеральное агентство по образованию

---

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»

---

**МЕТРОЛОГИЯ,  
СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ**

Методические указания  
к лабораторным работам

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
2008

УДК 621.317

Метрология, стандартизация и сертификация: Методические указания к лабораторным работам / Под ред. Б. Я. Авдеева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 64 с.

Даны описания лабораторных работ по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация», представлены методики исследования метрологических характеристик средств измерений, рассмотрены способы измерения ряда физических величин, а также методики оценки погрешностей результатов измерений.

Предназначены для студентов СПбГЭТУ всех специальностей.

Составители: 1 – Е. М. Антонюк, А. Л. Степанов; 2 – Б. Я. Авдеев, Е. Г. Бишард; 3 – Е. М. Антонюк, В. В. Поливанов; 4 – Б. Я. Авдеев, Е. Г. Бишард, Е. И. Семенов; 5 – Б. Я. Авдеев, И. А. Карабанов; 6 – Б. Я. Авдеев, Е. Г. Бишард; 7 – Б. Г. Комаров, А. Л. Степанов; 8 – Б. Я. Авдеев, Р. В. Долидзе; 9 – В. В. Поливанов, А. Л. Степанов; 10 – С. В. Виноградов, В. В. Поливанов; 11 – С. В. Виноградов, В. В. Поливанов.

Утверждено  
редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008

## Введение

**Рекомендации по сборке и включению схем.** Прежде чем приступить к сборке схемы, необходимо расставить всю аппаратуру на столе так, чтобы было удобно собирать схему, снимать показания приборов и пользоваться регулирующими устройствами. После этого необходимо мысленно выделить части схемы по функциональному назначению (например, параллельные и последовательные цепи) и собирать их отдельно. Провода, соединяющие схему с источником питания, следует подключать к источнику в последнюю очередь. Перед включением схемы необходимо все ручки регулировочных устройств (реостатов, автотрансформаторов и т. п.) установить в такое положение, при котором на элементах схемы выделялась бы минимальная мощность (минимальные напряжения и токи). Верхние пределы измерений используемых приборов должны быть установлены максимальными, кроме особо оговоренных в работах случаев. В дальнейшем, при выполнении лабораторных работ, значения физических величин устанавливаются и контролируются средствами измерений на уровне, необходимом для выполнения соответствующих пунктов исследований.

По окончании работы схемы должны быть разобраны, провода собраны и аккуратно уложены, а используемые средства расставлены на столе.

### Запись результатов измерений и оценка инструментальных погрешностей.

Результаты измерений, как правило, должны быть представлены в виде

$$x_i = x \pm \Delta x, \quad (B.1)$$

где  $x_i$  – истинное значение измеряемой величины;  $x$  – оценка измеряемой величины по результатам эксперимента: показание измерительного прибора, результат расчета измеряемой величины по показаниям приборов при косвенных измерениях и т. п.;  $\Delta x$  – абсолютная погрешность измерений.

Важной составляющей погрешности результата измерений является инструментальная погрешность средства измерений, которая определяется его классом точности [1]. Класс точности – это обобщенная метрологическая характеристика средства измерений, определяющая пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другие свойства этого средства, влияющие на точность результатов измерений. Пределы допускаемых погрешностей могут быть представлены в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей.

Для средств измерений, у которых погрешность нормируют в виде предела приведенной погрешности, класс точности численно равен этому пределу. В этом случае максимальные абсолютная и относительная (в процентах) погрешности средства измерений оцениваются по формулам соответственно:

$$\Delta x = \frac{\text{КЛ.Т.} \cdot x_N}{100}, \quad \delta = \frac{\text{КЛ.Т.} \cdot x_N}{x}, \quad (B.2)$$

где кл. т. – показатель класса точности прибора;  $x_N$  – нормирующее значение (условно принятное значение измеряемой величины для средства измерений). Часто в качестве нормирующего значения принимают:

- верхний предел измерений, если нижний предел равен нулю либо нуль находится вне диапазона измерений;
- сумму модулей верхнего и нижнего пределов измерений, если нуль находится внутри диапазона измерений.

Для некоторых приборов пределы показаний, но не измерений, могут находиться в диапазонах  $(\infty, 0)$  или  $(0, \infty)$  – например, у магнитоэлектрических омметров. Определять нормирующие значения приборов в соответствии с указанным выше правилом в этих случаях не имеет смысла. В таких приборах за нормирующее значение принимается длина шкалы  $L_N$ , выраженная, в частности, в делениях любой равномерной шкалы, обычно присутствующей в этих приборах, например для измерения токов или напряжений. Класс точности при этом

имеет особое обозначение,  $\frac{\text{КЛ.Т}}{\text{V}}$ , например  $\frac{2,5}{\text{V}}$ . Такой подход определяет и особую

процедуру оценки максимальной абсолютной погрешности измерений по указанному классу точности: сначала определяют максимальную абсолютную погрешность, выраженную в делениях шкалы:

$$\Delta L = \frac{\text{КЛ.Т} \cdot L_N}{100}, \quad (\text{B.3})$$

а затем – максимальную погрешность  $\Delta x$  в единицах измеряемой величины; для этого визуально или механически (изменением положения указателя прибора на  $\Delta L$ ) переносят  $\Delta L$  на шкалу измерений прибора и считывают погрешности  $\Delta x$ . Погрешности с разными знаками могут отличаться для нелинейных шкал (подробнее см. лаб. раб. 8).

Для ряда СИ класс точности записывается в виде двух чисел через косую черту:  $c/d$ , например  $0,05/0,02$ . При такой форме записи класса точности оценивается предельная относительная погрешность в процентах по формуле

$$\delta = \left[ c + d \left( \frac{x_N}{x} - 1 \right) \right], \quad (\text{B.4})$$

где  $x_N$  – нормирующее значение;  $x$  – показание прибора.

В некоторых цифровых СИ указываются пределы максимальных абсолютных погрешностей в виде формулы

$$\Delta x = \alpha x + 1 \text{ ед. мл.разр.}, \quad (\text{B.5})$$

где  $\alpha$  – постоянный коэффициент, например  $0,01, 0,05$  и т. п.; 1 ед. мл.разр. (единица младшего разряда) определяется пределом  $x_{\max}$ , на котором проводились измерения, и максимальным числом  $N_{\max}$  уровней квантования (максимальным индицируемым числом); 1 ед. мл. разр. =  $x_{\max} / N_{\max}$ . Так, для уни-

версального цифрового вольтметра GMD-8135 максимальное индицируемое число равно 2000 (указывается в описании). Тогда для предела измерений, равного 2 В, единица младшего разряда равна  $2/2000$  В, а для предела измерений 200 В –  $200/2000$  В, и т. д.

Для различных СИ заводы-изготовители используют и другие формулы оценки предельных погрешностей, что указывается в нормативно-технической документации.

При работе с многопредельными приборами необходимо обращать внимание на их пределы измерений, выбирая эти пределы так, чтобы отсчет производился по возможности ближе к конечному значению шкалы.

Число значащих цифр численных показателей точности (абсолютных, относительных и приведенных погрешностей) должно быть не более двух. При этом полученные значения показателей точности округляются так, чтобы погрешность округления не превышала 10 %. Например, при  $\Delta = 0,823$  В следует при записи результата оставить  $\Delta = 0,8$  В (погрешность округления  $2,5 \%$ ), а при  $\delta = 0,12 \%$  округлять до  $\delta = 0,1 \%$  не следует, так как погрешность округления в этом случае будет 20 %.

При окончательной записи результата измерения в соответствии с (В.1) необходимо иметь в виду, что числовое значение результата измерений должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности.

В то же время, промежуточные результаты вычислений округлять не следует, так как это может привести к накоплению погрешностей.

**Спецификация средств измерений, применяемых при эксперименте.** В отчете по лабораторной работе необходимо представить спецификацию

Наименование средства измерений	Диапазоны измерений, постоянные СИ	Характеристики точности СИ, классы точности	Рабочий диапазон частот	Параметры входа (выхода)
Милливольтметр GVT-417В	300 мкВ...100 В всего 12 пределов	Приведенная погрешность 3 %	20 Гц ... 200 кГц	$R_{\text{вх}} = 1 \text{ МОм}$ $C_{\text{вх}} = 50 \text{ пФ}$
Вольтметр универсальный цифровой GDM-8135	<i>Измерение на постоянном токе</i>			
	200 мВ, 2 В, 20 В, 200 В, 1200 В	Пределы максим. абсолют.погрешности 0,001 $U_{\text{изм}}$ +1 ед. мл.разр.	—	$R_{\text{вх}} \geq 10 \text{ МОм}$
<i>Измерение на переменном токе</i>				
	200 мВ, 2 В, 20 В, 200 В	0,005 $U_{\text{изм}}$ +1 ед. мл.разр. 0,01 $U_{\text{изм}}$ +1 ед. мл.разр. 0,02 $U_{\text{изм}}$ +1 ед. мл.разр. 0,05 $U_{\text{изм}}$ +1 ед. мл.разр.	40 Гц...1 кГц 1 ... 0 кГц 10...20 кГц 20...40 кГц	$R_{\text{вх}} \geq 10 \text{ МОм}$ $C_{\text{вх}} < 100 \text{ пФ}$
Осциллограф универсальный GOS-620	Коэф. откл. 5 мВ/дел ... 5 В/дел, всего 10 значений, Коэф. разв. 0,2 мкс/дел... 0,5 с/дел, всего 20 значений	3 % 3 %	0...20 МГц	$R_{\text{вх}} = 1 \text{ МОм}$ $C_{\text{вх}} = 25 \text{ пФ}$
Магазин сопротивлений Р33	0,1...99999,9 Ом	0,2/6·10 <sup>6</sup>	—	—

применяемых при эксперименте средств измерений; ее представляют в виде таблицы по приведенному образцу. При составлении спецификации следует придерживаться следующих правил:

- спецификация составляется для всех СИ, используемых в лабораторной работе;
- если прибор комбинированный (например, вольтметр универсальный цифровой GDM-8135), то спецификация проводится для используемого в эксперименте режима работы этого прибора;
- если прибор многопредельный, то при 3...5 верхних пределах измерений записываются все пределы, при большем числе пределов –наименьший и наибольший пределы и указывается общее число пределов; при необходимости записываются нижний и верхний пределы (например,  $-50^{\circ}\text{C}...+50^{\circ}\text{C}$ );
- обязательно указываются единицы измерений числовых характеристик.

**Требования к отчету.** Отчет по лабораторной работе должен выполняться на листе бумаги формата А4 ( $210 \times 297$  мм) чернилами (пастой) черного или синего цвета или быть отпечатан на принтере.

Отчет должен иметь титульный лист и включать следующие разделы:

1. Цель работы и краткое задание.
2. Спецификацию применяемых средств измерений.
3. Схемы экспериментов.
4. Таблицы результатов измерений и расчетов.
5. Расчетные формулы и примеры расчетов.
6. Графики зависимостей в соответствии с заданием к работе.
7. Выводы по работе.

Все схемы, таблицы и графики необходимо вычерчивать аккуратно на бумаге формата А4 (можно на миллиметровой бумаге того же формата). Допускается выполнять схемы и графики на миллиметровой бумаге другого формата, но при этом они должны быть вклеены в соответствующее место отчета. При построении графиков делительные штрихи на осях следует размещать на расстоянии друг от друга, кратном  $(1, 2, 5)10^n$ , где  $n$  – целое число (положительное или отрицательное). На осях графиков указываются величины и их единицы. Точки на графике, соответствующие экспериментально полученным значениям, соединяются плавной кривой, если наблюдается закономерная зависимость. Если же зависимость не является закономерной, то точки на графике соединяются прямыми линиями. Экспериментально полученные значения следует на графике выделять звездочкой или точкой. Все графики должны иметь наименование и пояснительный текст.

Отдельные листы отчета должны быть скреплены по левой стороне.

**Лабораторная работа 1.**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ**  
**ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ**  
**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

*Цель работы* – ознакомление с методикой поверки аналоговых электромеханических приборов и определение их основных метрологических характеристик.

**Задание**

1. Ознакомиться с имеющейся на рабочем месте аппаратурой и получить от преподавателя конкретное задание для выполнения лабораторной работы.
2. Определить основную погрешность комбинированного измерительного прибора (тестера) в следующих режимах работы:
  - вольтметра постоянного тока,
  - вольтметра переменного тока,
  - миллиамперметра постоянного тока.
3. Для каждого из проверяемых режимов построить на одном графике зависимости относительной и приведенной погрешностей прибора от показаний проверяемого прибора.
4. Определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) вольтметра переменного тока. Построить график АЧХ, определить рабочую полосу частот вольтметра.
5. На основе анализа полученных данных сделать вывод о соответствии проверяемого прибора его классу точности.

**Описание и порядок выполнения работы**

Проверкой называют определение погрешностей средства измерений и установление его пригодности к применению. Погрешности определяют по результатам конечного числа экспериментов при сравнении показаний проверяемого прибора и образцового средства измерений. При этом отношение пределов допускаемых абсолютных основных погрешностей образцовых средств измерений и проверяемых приборов для каждой проверяемой отметки шкалы должно быть не более 1:5 (в ряде случаев допускается 1:3).

**Проверка вольтметров и амперметров методом сличения.** В основе поверки методом сличения лежит одновременное измерение одной и той же величины проверяемым прибором и образцовым средством измерений и сравнение результатов измерений.

Перед началом поверки необходимо:

- а) установить проверяемый прибор в нормальное для него положение в соответствии с условным обозначением на шкале прибора,
- б) корректором установить указатель прибора на начальную отметку шкалы.

Для поверки вольтметра собрать поверочную схему (рис. 1.1), где  $V$  и  $V_0$  – проверяемый и образцовый вольтметры;  $R_2$  и  $R_3$  – регулировочные переменные резисторы;  $R_1$  –

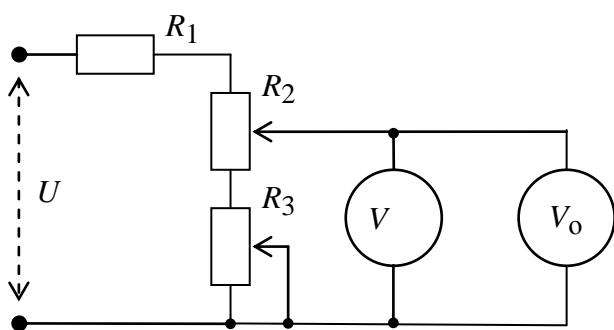


Рис. 1.1

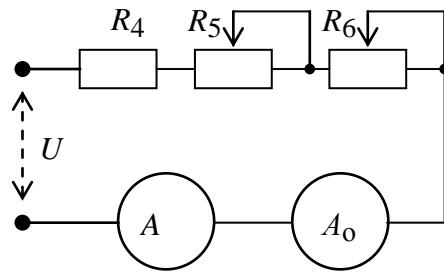


Рис. 1.2

токограничивающий резистор. Для поверки амперметра собрать поверочную схему (рис. 1.2), где  $A$ ,  $A_o$  – поверяемый и образцовый амперметры;  $R_5$  и  $R_6$  – регулировочные переменные резисторы;  $R_4$  – токограничивающий резистор.

В качестве источников питания следует использовать регулируемый источник постоянного тока и низкочастотный генератор переменного тока.

Проверка проводится для 5...10 точек шкалы прибора, равномерно распределенных по диапазону измерений. При определении основной погрешности указатель поверяемого прибора последовательно устанавливают на поверяемые отметки Хшкалы сначала при плавном увеличении измеряемой величины, а затем – на те же отметки при плавном уменьшении измеряемой величины. Для всех поверяемых отметок по образцовому средству измерений определяют действительные значения  $x_{o\text{ув}}$  и  $x_{o\text{ум}}$  измеряемой величины.

Абсолютную погрешность при увеличении и уменьшении показания определяют по формулам:  $\Delta x_{\text{ув}} = x - x_{o\text{ув}}$ ;  $\Delta x_{\text{ум}} = x - x_{o\text{ум}}$ , где  $x$  – показание поверяемого прибора;  $x_{o\text{ув}}$  – показание образцового средства измерений при увеличении показаний;  $x_{o\text{ум}}$  – показание образцового средства измерений при уменьшении показаний. Относительная погрешность (в процентах):

$$\delta = 100 \Delta x / x,$$

приведенная погрешность (в процентах)

$$\gamma = 100 \Delta x / x_N,$$

где  $x_N$  – нормирующее значение поверяемого прибора на выбранном диапазоне измерений.

Относительную и приведенную погрешности определяют для всех поверяемых отметок шкалы, выбирая наибольшее по модулю значение абсолютной погрешности. При этом знак погрешности во всех случаях учитывается и зависит от соотношения  $x$  и  $x_o$ .

**Вариацию показаний прибора на поверяемой отметке шкалы определяют как абсолютное значение разности действительных значений измеряемой величины при одном и том же показании прибора, полученном при плавном подходе указателя сначала со стороны меньших, а затем со стороны больших значений. Вариация может определяться также в процентах от нормирующего значения  $x_N$**

$$H = 100 |x_{o\text{ув}} - x_{o\text{ум}}| / x_N.$$

Результаты эксперимента и расчетов заносят в таблицу.

Показания поверяе-мого прибора, $x$	Показания образцового средства измерения		Погрешность				
	при увеличении $x_{0\text{ ув}}$	при уменьшении $x_{0\text{ ум}}$	абсолютная при увеличении $\Delta x_{\text{ув}}$	при уменьшении $\Delta x_{\text{ум}}$	относительная $\delta, \%$	приведённая $\gamma, \%$	вариация $H, \%$

Показания поверяемого и образцового приборов и абсолютная погрешность приводятся в единицах измеряемой величины.

**Определение амплитудно-частотной характеристики АЧХ вольтметра переменного тока** проводят по схеме, представленной на рис. 1.1. В качестве источника питания используется генератор переменного тока, работающий в режиме синусоидальных колебаний.

Сначала следует установить указатель вольтметра на оцифрованную отметку в диапазоне (0,5...0,8) от выбранного предела измерений. Затем, не меняя выходного напряжения генератора, уменьшить его частоту до нескольких герц (2...5 Гц). При этом будут наблюдаться колебания указателя. Плавно увеличивая частоту входного напряжения, определить ее минимальное значение  $f_1$ , при котором колебания прекратятся; снять 2-3 точки АЧХ до частоты  $f = 50$  Гц.

Результаты эксперимента и расчетов занести в таблицу, где  $f$  – устанавливаемые частоты,  $U(f)$  – показания поверяемого прибора на соответствующих частотах,  $K(f) = U(f) / U(f = 50 \text{ Гц})$  – относительные значения АЧХ.

$f, \text{ Гц}$	$f_1$	...	50	...	$f_m$
$U, \text{ В}$		...		...	
$K(f)$		...	1	...	

Далее, увеличивая частоту входного напряжения до 10...20 кГц, снять зависимость показания поверяемого вольтметра от частоты. При этом следует предварительно определить, при какой приблизительно частоте изменения показаний вольтметра будут заметными. До этой частоты достаточно снять показания в 3...4 точках, а после нее – не менее чем в 5...7 точках.

По полученным данным построить АЧХ вольтметра и определить нижнюю  $f_n$  и верхнюю  $f_v$  границы частотного диапазона в соответствии с требованиями по допустимому спаду АЧХ для поверяемого вольтметра.

## Лабораторная работа 2.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

*Цель работы* – исследование метрологических характеристик электронных вольтметров.

#### **Задание**

1. Ознакомиться с используемой аппаратурой и инструкциями по ее применению. Получить у преподавателя конкретное задание по выполнению работы.
2. Определить основную погрешность электронного вольтметра на диапазоне измерений, указанном преподавателем. Построить на одном графике зависимости относительной и приведенной погрешностей от показаний электронного вольтметра. Сделать вывод о соответствии поверяемого вольтметра его классу точности.
3. Определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) электронного вольтметра. Построить график АЧХ и определить рабочую полосу частот вольтметра на уровне затухания АЧХ, определяемом нормативно-технической документацией на поверяемый вольтметр.
4. Экспериментально оценить АЧХ цифрового вольтметра. Провести сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик электронного, цифрового и электромеханического<sup>11</sup> вольтметров. Построить графики АЧХ исследуемых приборов.
5. Измерить электронным вольтметром напряжения различной формы (синусоидальной, прямоугольной и треугольной) с одинаковой амплитудой на частотах, лежащих в рабочей полосе частот этого прибора. Объяснить и подтвердить расчетами полученные результаты. Сделать вывод о влиянии формы измеряемого напряжения на показания электронного вольтметра.

#### **Описание и порядок выполнения работы**

Для выполнения работы применяют схему, представленную на рис. 2.1, где ГС – генератор (синтезатор) сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы, ЦВ – цифровой вольтметр, ЭВ – электронный вольтметр, ЭЛО – электронно-лучевой осциллограф.

---

<sup>1</sup>Результаты исследований по электромеханическим вольтметрам взять из лабораторной работы 1, если она выполнялась ранее.

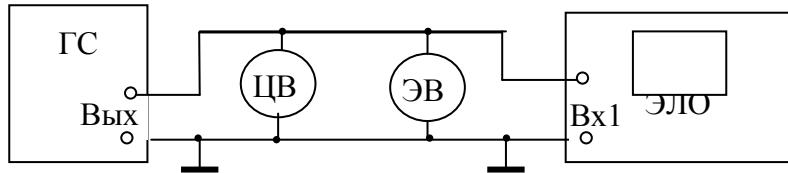


Рис. 2.1

**Основную погрешность электронного вольтметра** определяют методом сличения, т. е. сравнением его показаний с показаниями образцового, в данном случае цифрового вольтметра, при синусоидальном напряжении. Показания образцового вольтметра принимаются за действительные значения напряжения.

Проверку электронного вольтметра GVT-417B проводят при частоте  $f_0 = 1$  кГц на шкалах с верхними пределами 1 или 3 В, что обусловлено диапазоном регулирования выходного напряжения используемого генератора.

Проверку проводят для  $n = (6 \dots 10)$  отметок шкалы, равномерно распределенных по шкале прибора, при плавном увеличении и уменьшении его показаний. Проверяемые точки напряжения  $U$  устанавливают на электронном вольтметре, а действительные значения напряжений  $U_{0\text{ув}}$ ,  $U_{0\text{ум}}$  снимают с цифрового вольтметра при подходе к проверяемой отметке  $\mathcal{U}$  шкалы соответственно при увеличении и уменьшении показаний. Результаты измерений и расчетов представляют в виде таблицы.

Показания проверяемого электронного вольтметра, $U$ , В	Показания образцового цифрового вольтметра		Погрешность					
			абсолютная		относительная, $\Delta U_{\text{ум}}$ , В	$\delta$ , %	$\gamma$ , %	$H$ , %
	при увеличении $U_{0\text{ув}}$ , В	при уменьшении $U_{0\text{ум}}$ , В	при увелич. $\Delta U_{\text{ув}}$ , В	при уменьш. $\Delta U_{\text{ум}}$ , В				
$\gamma_{\max} = \dots$ , $H_{\max} = \dots$								

Абсолютные, относительные, приведенные погрешности и вариации показаний определяют по формулам, приведенным в лаб. раб. 1, во введении или в [1]; определяют также максимальную приведенную погрешность  $\gamma_{\max} = \text{Max}\{|\gamma|\}$  и максимальную вариацию  $H_{\max} = \text{Max}\{H\}$ , полученные в результате эксперимента.

По результатам испытаний и расчетов строят на одном графике зависимости относительной и приведенной погрешностей от показаний электронного вольтметра,  $\delta = F_{\delta}(U)$ ,  $\gamma = F_{\gamma}(U)$ ; на графике также проводят линии, определяющие границы предельно допустимой приведенной погрешности, соответствующей классу точности проверяемого прибора.

На основании анализа данных об основной погрешности и вариации показаний делают вывод о соответствии указанных характеристик требованиям, определяемым классом точности проверяемого прибора.

**Амплитудно-частотную характеристику электронного вольтметра определяют как зависимость показаний вольтметра от частоты входного синусоидального сигнала при постоянном значении его напряжения.**

На практике широко используют понятие рабочей полосы частот средства измерений. Под рабочей полосой частот вольтметра понимают диапазон частот  $\Delta f$ , для которого неравномерность АЧХ вольтметра не превосходит некоторой заранее установленной допустимой величины. Так, для электронного вольтметра GVT-417В в пределах рабочей полосы не допускается изменение АЧХ, превышающее 10 процентов от показания прибора на частоте  $f_0 = 1$  кГц. Крайние значения диапазона частот, удовлетворяющего указанному требованию, называются нижней  $f_n$  и верхней  $f_v$  граничными частотами рабочей полосы электронного вольтметра.

Определение АЧХ проводят также по схеме, представленной на рис. 2.1. В качестве источника сигналов используют генератор SFG-2000, который обеспечивает постоянство амплитуды выходного сигнала при изменении частоты в его рабочем диапазоне<sup>1</sup>.

На генераторе ГС устанавливают частоту  $f_0 = 1$  кГц при синусоидальной форме сигнала. С помощью регулятора выходного напряжения генератора ГС устанавливают показание электронного вольтметра на отметке шкалы в диапазоне (0,7...0,9) от верхнего предела измерений и записывают установленное значение напряжения  $U(f_0 = 1 \text{ кГц}) = \dots$ . В дальнейшем при определении АЧХ изменяют частоту генератора сигналов ГС, а его выходное напряжение поддерживают постоянным.

Для контроля уровня сигнала и его формы используют электронно-лучевой осциллограф. На экране осциллографа, с помощью подбора коэффициентов отклонения (VOLTS/DIV) и развертки (TIME/DIV), получают удобную для наблюдений и измерений осциллограмму – изображение нескольких периодов синусоиды с достаточно большой амплитудой; записывают амплитуду  $I_A$  (или двойную амплитуду  $I_{2A}$ ) изображения сигнала для последующего контроля уровня сигнала.

АЧХ электронного вольтметра удобно определять отдельно для области верхних и области нижних частот. В области верхних частот АЧХ начинают снимать с шагом 100 кГц: 1 кГц (начальная частота), 100 кГц, 200 кГц ..., до частоты, при которой показания электронного вольтметра упадут до величины порядка 0,8...0,9 от первоначально установленного показания  $U(f_0 = 1 \text{ кГц})$ . Для уточнения верхней частоты  $f_v$  рабочей полосы частот  $\Delta f$  электронного вольтметра в районе 10-процентного спада АЧХ необходимо дополнительно снять несколько точек АЧХ с меньшим шагом изменения частоты входного сигнала. В процессе проведения испытаний постоянный уровень выходного сигнала ГС контролируют электронным осциллографом.

---

<sup>1</sup>Это свойство ГС является весьма полезным для проведения экспериментов, поскольку рабочая полоса частот электронного вольтметра GVT-417В существенно шире рабочей полосы цифрового вольтметра GDM-8135 и, следовательно, цифровой вольтметр не может быть использован в качестве образцового.

Результаты испытаний и расчетов записать в таблицу, где  $U(f)$  – показания вольтметра на частоте  $f$ ;  $K(f)$  – АЧХ вольтметра, представленная в относительных единицах для соответствующих частот  $K(f) = U(f)/U(f_0 = 1 \text{ кГц})$ ;  $f_v$  – верхняя граничная частота рабочей частоты вольтметра, найденная в эксперименте.

Область верхних частот				
$f, \text{ кГц}$	1	100	200	.....
Электрон. вольтметр	$U(f), \text{ В}$			
	$K(f)$	1		
Цифровой вольтметр	$U(f), \text{ В}$			
	$K(f)$	1		
Для ЭВ $f_v = \dots$ ,		для ЦВ $f_v = \dots$		

При выполнении п. 4 задания аналогичным образом при тех же частотах оценивается АЧХ цифрового вольтметра. Результаты испытаний заносятся в ту же таблицу. При этом не обязательно уточнять АЧХ цифрового вольтметра в дополнительных точках по частоте. В этом случае значение граничной частоты цифрового вольтметра будет определено с меньшей точностью.

Нижняя граничная частота  $f_n$  рабочей полосы  $\Delta f$  для электронных вольтметров переменного тока обычно находится в области единиц и первых десятков герц. Поэтому процедура определения АЧХ в области низких частот может быть следующей: сначала уменьшают частоту от исходной  $f_0 = 1000 \text{ Гц}$  через 200 Гц, а затем от 50 Гц – через 10 Гц. При необходимости уточняют нижнюю частоту  $f_n$  рабочей полосы, при которой АЧХ падает до уровня 0,9 от ее значения при  $f_0 = 1000 \text{ Гц}$ , снятием дополнительных точек с шагом 1 Гц.

Оценка АЧХ цифрового вольтметра проводится при тех же частотах.

Результаты испытаний и расчетов представляют в виде таблицы.

Область низких частот									
$f, \text{ Гц}$	1000	800	.....	50	40	.....	10	8	.....
Электрон. вольтметр	$U(f), \text{ В}$								
	$K(f)$	1							
Цифровой вольтметр	$U(f), \text{ В}$								
	$K(f)$	1							
Для ЭВ $f_n = \dots \text{ Гц}$ ,					для ЦВ $f_n = \dots \text{ Гц}$				

По результатам проведенных исследований строятся графики АЧХ для верхних и низких частот. По оси частот графики удобно строить в логарифмическом масштабе.

**Определение влияния формы входного сигнала на показания вольтметров переменного тока.** В электронных вольтметрах переменного тока применяют преобразователи Пр переменного напряжения в постоянное, как, например, показано на рис. 2.2, где  $u_{\text{вх}}(t)$  – входное напряжение,  $Y_\sim$  – усилитель переменного тока, ИМ –

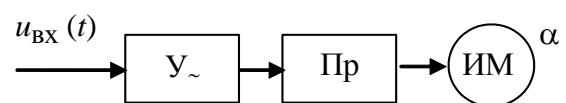


Рис. 2.2

магнитоэлектрический измерительный  
 механизм,  $\alpha$  – угол отклонения измерительного механизма. Применяют преобразователи амплитудного, средневыпрямленного или действующего значений переменного напряжения в постоянное. В то же время все электронные вольтметры переменного тока, независимо от вида преобразователя, *градуируются в действующих значениях синусоидального напряжения*. Это может привести к появлению дополнительных погрешностей при измерении несинусоидальных напряжений.

Электронный вольтметр GVT-417 имеет преобразователь средневыпрямленного значения. В таких вольтметрах угол  $\alpha$  отклонения указателя в соответствии с *принципом действия преобразователя* пропорционален средневыпрямленному значению  $U_{\text{ср}}$  входного напряжения

$$\alpha = k_v \frac{1}{T} \int_0^T |u_{\text{вх}}(t)| dt = k_v U_{\text{ср}},$$

где  $k_v$  – коэффициент преобразования вольтметра,  $u_{\text{вх}}(t)$  – входное переменное напряжение с периодом  $T$ .

Шкала вольтметра градуируется в действующих  $U$  значениях синусоидального напряжения, которое связано со средним значением напряжения постоянным коэффициентом (коэффициентом формы)

$$U_{\text{п}} = U = k_{\phi} U_{\text{ср}} = 1,11 U_{\text{ср}}, \quad (2.1)$$

где  $U_{\text{п}}$  – показания вольтметра по его шкале;  $k_{\phi} = U/U_{\text{ср}}$  – коэффициент формы напряжения, для синусоидального напряжения  $k_{\phi} = 1,11$ . Таким образом, при синусоидальном напряжении по показаниям вольтметра непосредственно считывают действующие значения напряжения.

Для другой формы напряжения ( $k_{\phi} \neq 1,11$ ) показания вольтметра могут значительно отличаться от его действующего значения, что приводит к появлению дополнительной погрешности измерений.

**Для экспериментальной оценки влияния формы напряжения на показания электронного вольтметра последовательно измеряют сигналы синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы при их одинаковой амплитуде.**

**Предварительно на синусоидальном сигнале устанавливают показания вольтметров в диапазоне 0,5...0,6 от верхнего предела измерений выбранной шкалы, а затем при той же амплитуде входных сигналов измеряют вольтметром напряжения при других формах сигнала.**

**По показаниям  $U_{\text{п}}$  вольтметра рассчитывают среднее  $U_{\text{ср}}$  и, если известна форма сигналов, действующее  $U$  значения напряжений и дополнительную погрешность влияния формы напряжения на показания вольтметра.**

Среднее значение напряжения при любой форме сигнала (в пределах АЧХ вольтметров) для вольтметров среднего значения рассчитывается по его градуировочной характеристике (2.1)

$$U_{\text{cp}} = U_{\text{n}} / 1,11.$$

При известной форме напряжения можно рассчитать действующее значение измеряемого напряжения

$$U = k_{\phi} U_{\text{cp}}. \quad (2.2)$$

В частности, коэффициенты формы  $k_{\phi}$  для используемых напряжений:

синусоидального – 1,11, прямоугольного – 1, треугольного – 1,15.

### **Дополнительная относительная погрешность влияния формы напряжения на показания вольтметра (в процентах)**

$$\delta = 100 (U_{\text{n}} - U) / U.$$

Результаты измерений и расчетов записывают в таблицу.

Исследуемые характеристики	Форма сигналов		
	синусоидальная	прямоугольная	треугольная
$U_{\text{n}}$ (показания вольтметра), В			
$U_{\text{cp}}$ (расчет), В			
$U$ (расчет), В			
$\delta$ , %			

Очевидно, что, если известна форма напряжения, следует рассчитывать действующее значение измеряемого напряжения по показаниям вольтметра по формулам (2.1), (2.2). Тогда дополнительная погрешность влияния формы кривой может быть сведена к минимуму (с точностью определения коэффициента формы).

По результатам исследований сделать вывод о влиянии формы кривой напряжения на результаты его измерения электронным вольтметром.

## **Лабораторная работа 3. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

*Цель работы* – изучение методов экспериментального определения метрологических характеристик цифровых приборов, а также их применения для измерения физических величин и оценка погрешностей результатов измерений.

### **Задание**

1. Ознакомиться с инструкцией по применению исследуемого цифрового измерительного прибора (ЦИП).
2. Определить шаг квантования (квант) исследуемого ЦИП в режиме омметра для различных (по указанию преподавателя) пределов измерения.
3. Экспериментально определить следующие метрологические характеристики цифрового измерительного прибора в режиме омметра:
  - статическую характеристику преобразования; построить график зависимости показания  $R_{\text{n}}$  прибора от значений  $R$  измеряемых сопротивлений  $R_{\text{n}} = F(R)$ ;

- погрешности квантования для начального участка статической характеристики преобразования; построить график погрешности квантования;
  - инструментальную погрешность по всему диапазону измерений для выбранного предела измерений; построить график инструментальной погрешности, определить аддитивную и мультипликативные составляющие инструментальной погрешности.
4. Измерить сопротивления ряда резисторов и оценить основную погрешность результатов измерения.

### **Описание и порядок выполнения работы**

В ЦИП результаты измерений представлены в цифровом виде; при этом, в отличие от аналоговых приборов, показания ЦИП меняются дискретно на единицу младшего разряда. Это приводит к ряду особенностей определения и представления метрологических характеристик цифровых измерительных приборов.

К основным метрологическим характеристикам ЦИП относятся: статическая характеристика преобразования, шаг квантования (квант) или единица младшего разряда, основная инструментальная погрешность.

*Статическая характеристика преобразования* устанавливает связь между преобразуемой входной величиной  $x$  и результатом преобразования  $x_{\text{п}}$  (показаниями ЦИП), который может принимать только квантованные значения  $x_{\text{п}} = Nq$ , где  $N$  – десятичное целое число,  $q$  – шаг квантования (квант) величины  $x$ . В этом отличие ЦИП от аналоговых средств измерений. Отсюда следует ступенчатая форма представления статической характеристики преобразования.

*Статическая характеристика преобразования идеального ЦИП* (рис. 3.1) получается при квантовании измеряемой величины путем отождествления её с ближайшим по значению уровнем квантования. Изменения показаний идеального ЦИП  $x_{\text{п}} = Nq$  на единицу младшего разряда  $q$  происходят при фиксированных значениях входной величины, равных  $(N - 0,5)q$ , где  $N = 1, 2, 3, \dots$  (целое число).

Статическая характеристика преобразования идеального ЦИП определяется значением единицы младшего разряда показаний (используется также термин *разрешение*), равным кванту  $q$ .

Значение кванта  $q$  для идеального ЦИП связано с пределом измерений  $x_{\text{max}}$  и максимальным числом  $N_{\text{max}}$  уровней квантования соотношением

$$q = x_{\text{max}}/N_{\text{max}}.$$

Например, для ЦИП GDM-8135  $q = x_{\text{max}}/(2 \cdot 10^n)$ , где  $x_{\text{max}}$  – предел измерений,  $n$  – число разрядов отсчётного устройства.

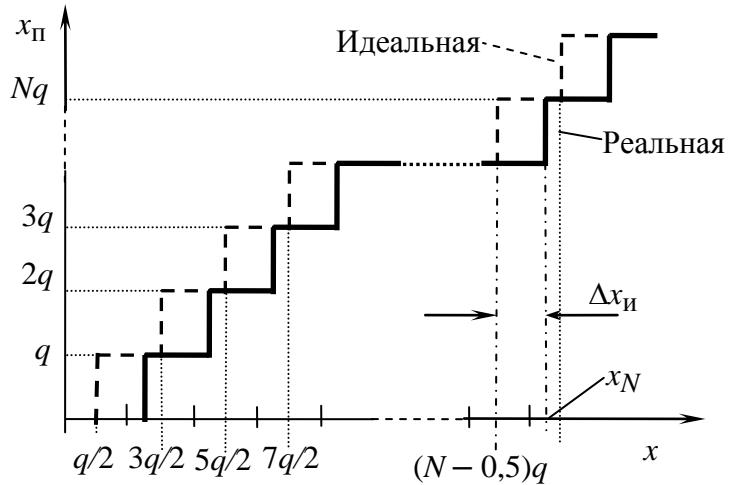


Рис. 3.1

*Статическая характеристика преобразования реального ЦИП отличается от статической характеристики идеального. Причина этого – наличие инструментальных погрешностей ЦИП. Различие проявляется в том, что смена показаний реального ЦИП происходит при значениях входной величины  $x_N$ , отличных от значений  $(N - 0,5)q$ . В общем случае абсолютная основная погрешность ЦИП равна*

$$\Delta x = x_{\text{п}} - x,$$

где  $x_{\text{п}}$  – показание ЦИП,  $x$  – действительное значение измеряемой величины.

Для реального ЦИП эта погрешность включает как методическую погрешность квантования, так и инструментальную погрешность.

*Абсолютная инструментальная погрешность определяется для конкретных показаний ЦИП  $x_{\text{п}} = Nq$  (рис. 3.1) по отлинию реальной характеристики ЦИП от идеальной*

$$\Delta x_{iN} = x_{\text{п}} - 0,5q - x_N, \quad (3.1)$$

где  $x_N$  – значение входной величины, при котором происходит смена показаний  $x_{\text{п}}$  ЦИП (показания меняются на единицу младшего разряда).

**Статическая характеристика преобразования ЦИП** определяется в режиме омметра; для этого на вход ЦИП необходимо подключить магазин сопротивлений. Предел измерения ЦИП выбрать по указанию преподавателя, определить для этого предела значение единицы младшего разряда  $q$ . Определить единицу младшего разряда магазина  $q_m$ , проверить выполнение условия  $q >> q_m$ , при этом условии можно пренебречь дискретным характером изменения сопротивления магазина.

Для определения начального участка статической характеристики (рис. 3.1) необходимо установить нулевое значение сопротивления магазина  $R$ , затем при плавном изменении сопротивления магазина (менять сопротивление магазина с минимально возможным шагом) следить за изменением показаний, фиксируя при

в этом конкретные значения сопротивления магазина  $R$ , при которых показания ЦИП  $R_{\text{п}}$  меняются на единицу младшего разряда.

Например, на пределе 2 кОм при появлении показаний  $R_{\text{п}} = 0,001; 0,002; 0,003 \dots$  кОм (всего 8-9 значений) фиксировать соответствующие значения сопротивлений магазина  $R$ .

Результаты измерений записать в таблицу.

Номер измерения	$R_{\text{п}}, \text{kOm}$	$R, \text{kOm}$

По этим значениям построить начальный участок графика статической характеристики ЦИП в режиме омметра  $R_{\text{п}} = F(R)$  и график абсолютной основной погрешности  $\Delta R(R) = F(R) - F_{\text{л}}(R)$ , где  $F_{\text{л}}(R) = R_{\text{пл}}$  – линейная характеристика идеального (без квантования) омметра в виде прямой линии  $R_{\text{пл}} = R$ .

**Абсолютную инструментальную погрешность** определяют для 8...10 точек, равномерно распределенных по выбранному диапазону измерений. Инструментальная погрешность определяется по формуле (3.1), при этом  $R_N$  – значение сопротивления магазина, при котором происходит смена показаний  $R_{\text{п}}$  ЦИП на единицу младшего разряда в выбранной точке, например на пределе 2 кОм, со значения 1,435 кОм на значение 1,436 кОм.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Номер измерения	$R_{\text{п}N}, \text{kOm}$	$R_N, \text{kOm}$	$\Delta R_{\text{и}N}, \text{kOm}$

#### Определение аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности.

В зависимости от характера изменения по диапазону измерения погрешности делятся на аддитивные и мультипликативные. *Аддитивные погрешности* не зависят от значения измеряемой величины  $x$ , *мультипликативные* растут с увеличением  $x$ . Обычно для ЦИП погрешность задается

в виде модели  $\Delta x = a + bx$ , где  $a$  и  $bx$  – аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности соответственно.

Постройте график зависимости  $\Delta R_{\text{и}N} = F(R_N)$  для выбранного диапазона ЦИП. По графику определите аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности ЦИП.

**Измерение сопротивлений.** Измерьте по заданию преподавателя сопротивления резисторов, вмонтированных в лабораторный стенд, при различных диапазонах измерения ЦИП.

Оцените основную погрешность измерения по формулам, приведенным в описании GDM-8135. Результаты представьте в таблице.

Ном ер рези стор а	Диапазон измерения	Значение кванта для диапазона измерения, Ом	Показания ЦИП $R_{\pi}$ , кОм	Абсолютная погрешность измерения $\Delta R, \text{кОм}$	Относительная погрешность измерения, %	Результат измерения $R_{\pi} \pm \Delta R,$ кОм

Сделайте выводы о характере изменения погрешности в зависимости от соотношения значений измеряемой величины и диапазона измерения, дайте рекомендации по выбору предела измерения.

## Лабораторная работа 4. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

*Цель работы* – исследование метрологических характеристик осциллографа и измерение амплитудных и временных параметров электрических сигналов различной формы.

### Задание

1. Ознакомиться с органами управления осциллографа и аппаратурой, применяемой для его исследования.
2. Определить основные погрешности коэффициентов отклонения и коэффициентов развёртки.
3. Определить характеристики нелинейных искажений изображения по осям  $Y$  и  $X$ .
4. Определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) канала вертикального отклонения.
5. Измерить амплитудные и временные параметры сигналов по указанию преподавателя.
6. Оценить погрешности измерений, используя результаты исследования осциллографа его метрологические характеристики, указанные в описании.

### Описание и порядок выполнения работы

**Включить осциллограф и подготовить его к работе** согласно инструкции. При включении осциллографа на его экране должно появиться изображение луча или двух лучей в зависимости от режима его работы (включен один канал или два); при «заземленных» входах осциллографа (переключатель AC-DC-GND находится в положении GND) на экране должны наблюдаться одна или две горизонтальные линии соответственно.

При отсутствии изображения необходимо установить ручки управления яркостью (INTER) и фокусом (FOCUS) в среднее положение и убедиться, что включен автоколебательный режим работы генератора развертки (переключатель MODE находится в положении AUTO). Затем регулировкой смещения лучей по вертикалам (POSITION $\downarrow$ ) и

горизонтали (POSITION↔) добиться появления их на экране. После этого сфокусировать изображение и установить необходимую для наблюдения яркость.

Для начальной установки лучей при «заземленных» входах (переключатель AC-DC-GND в положении GND) совместить (POSITION ↓) изображение каждого луча со средней линией сетки на экране и установить (POSITION↔) начало развертки луча у левого края экрана, отступив на 0,5...1 деления сетки от края.

Схема испытания осциллографа приведена на рис. 4.1, где ЭЛО – электронно-лучевой осциллограф, ГС – генератор сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы, V – электронный вольтметр; используемые средства соединены в соответствии со схемой коаксиальными кабелями.

**Основные погрешности коэффициентов  $k_o$  отклонений и коэффициентов  $k_p$  развёртки** определяются путем сравнения номинальных значений коэффициентов, устанавливаемых на осциллографе (переключателями VOLTS/DIV и TIME/DIV), с их действительными значениями, найденными экспериментально.

Погрешности коэффициентов отклонения определяют при 1-2 его номинальных значениях<sup>1</sup>, например при  $k_o = (0,5; 1)$  В/дел. Для этого на вход 1 канала вертикального отклонения с ГС подают синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и устанавливают такое его напряжение, при котором размер  $L_{2A}$  изображения двойной амплитуды синусоиды составлял бы 6 (больших) делений сетки (для осциллографа GOS-620). Напряжение, необходимое для получения такого изображения, измеряют электронным вольтметром. Коэффициент  $k_p$  развёртки в этом эксперименте может быть любым, при котором удобно наблюдать синусоидальный сигнал и измерять его амплитуду.

Действительный коэффициент  $k_o^*$  отклонений (В/дел; мВ/дел; мкВ/дел) определяется выражением:

$$k_o^* = U_{2A}/L_{2A},$$

где  $U_{2A}$  – напряжение, равное двойной амплитуде, рассчитываемое на основании показаний вольтметра (электронный вольтметр измеряет действующее значение синусоидального напряжения);  $L_{2A}$  – размер изображения двойной амплитуды сигнала.

Относительная погрешность коэффициента отклонения (в процентах)

$$\delta k_o = 100 \frac{k_o - k_o^*}{k_o^*},$$

где  $k_o$  – установленный номинальный коэффициент отклонения.

---

<sup>1</sup> При установке номинальных коэффициентов отклонения и развёртки необходимо следить, чтобы ручки плавной регулировки этих коэффициентов находились в крайнем правом (по часовой стрелке) положении.

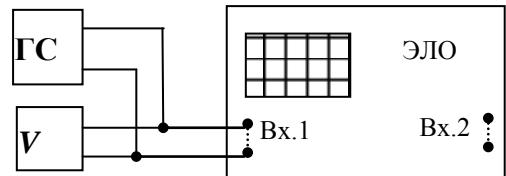


Рис. 4.1

Оценка погрешностей коэффициентов  $k_p$  развертки проводится также для 1-2 его номинальных значений. При этом коэффициент  $k_o$  отклонений устанавливается удобным для наблюдений сигналов на экране.

Для определения действительного значения коэффициента развертки на вход осциллографа подается сигнал прямоугольной (или синусоидальной) формы с известным периодом  $T$ . При установленном коэффициенте развертки  $k_p$  изменением частоты  $f$  генератора сигналов ГС добиваются изображения  $n = (1\dots3)$  целых периодов входного сигнала. На экране осциллографа определяют размер  $L_{nT}$  изображения  $n$  целых периодов, выраженный в больших делениях шкалы. Действительный коэффициент развертки (с/дел; мс/дел; мкс/дел) определяется выражением:

$$k_p^* = \frac{nT}{L_{nT}} = \frac{n}{f L_{nT}},$$

где  $f n T$  – частота и период входного сигнала, при котором на экране осциллографа наблюдались  $n$  его целых периодов.

Относительная погрешность коэффициента развертки (в процентах)

$$\delta_{k_p} = 100 \frac{k_p - k_p^*}{k_p^*},$$

где  $k_p$  – установленный номинальный коэффициент развертки.

**Определение характеристик нелинейных искажений изображения.** Эффекты искажения формы сигнала, вызванные нелинейностью функций преобразования

напряжений и интервалов времени в соответствующие им размеры изображения сигналов на экране осциллографа, характеризуются максимальной нелинейностью амплитудной характеристики канала и максимальной нелинейностью развертки. Оценить оба параметра можно с помощью сигнала прямоугольной формы скважностью  $q = 0,5$ . Для этого следует установить такое значение амплитуды сигнала, чтобы размер изображения по оси  $Y$  в центре экрана занимал не менее 6 делений, а также частоту генератора, при которой по оси  $X$  полностью разместились бы 5 полупериодов

сигнала (точную установку размера можно обеспечить изменением частоты генератора сигналов или регулятором плавного изменения коэффициента развертки осциллографа). Вариант наблюдаемой осциллограммы представлен рис. 4.2.

Нелинейность амплитудной характеристики канала вертикального отклонения (в процентах) оценивают отношением

$$\delta_{\text{на}} = \frac{\max\{|L_{Y1} - L_Y|, |L_{Y2} - L_Y|\}}{L_Y},$$

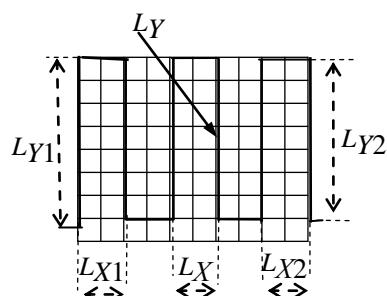


Рис. 4.2

где  $\max\{|L_{Y1} - L_Y|, |L_{Y2} - L_Y|\}$  – максимальная разность (по модулю) размеров изображения амплитуды сигнала по вертикали, в делениях,  $L_Y$  – размер амплитуды в центре экрана. Нелинейность развёртки (в процентах) определяют отношением

$$\delta_{\text{hp}} = \frac{\max\{|L_{X1} - L_X|, |L_{X2} - L_X|\}}{L_X},$$

где  $\max\{|L_{X1} - L_X|, |L_{X2} - L_X|\}$  – максимальная разность (по модулю) размеров изображений полупериодов сигнала,  $L_X$  – размер изображения полупериода в центре экрана.

**Определение амплитудно-частотной характеристики канала вертикального отклонения.** АЧХ канала вертикального отклонения определяют как зависимость размера  $L_Y$  изображения по оси  $Y$  амплитуды синусоидального сигнала на экране ЭЛТ от его частоты при *неизменном напряжении* сигнала на входе канала.

Рабочей полосой пропускания канала считают диапазон частот  $\Delta f$ , для которого неравномерность АЧХ не превосходит некоторой заранее установленной величины. Например, часто используется величина допустимого спада АЧХ при изменении частоты, равная 3 дБ, что соответствует уменьшению размера изображения сигнала до  $\approx 0,707$  от его значения на некоторой номинальной частоте, определенной для каждого типа осциллографа. Крайние значения диапазона частот, удовлетворяющего указанным требованиям, являются верхней  $f_v$  и нижней  $f_n$  граничными частотами рабочей полосы пропускания канала осциллографа.

Определение АЧХ проводят также по схеме, представленной на рис. 4.1. В качестве источника сигналов используется генератор SFG-2000, который обеспечивает постоянство амплитуды выходного сигнала при изменении частоты в его рабочем диапазоне. В этом эксперименте электронный вольтметр не является образцовым прибором, поскольку частотный диапазон его уже частотного диапазона осциллографа.

Сначала регулировкой выходного напряжения ГС устанавливают размер  $L_{2A} = 6$  делений изображения по вертикали двойной амплитуды сигнала на частоте  $f_0 = 1$  кГц для осциллографа GOS-620. В дальнейшем при определении АЧХ выходное напряжение генератора не изменяют.

АЧХ удобно определять отдельно для областей верхних и нижних частот. В области верхних частот АЧХ начинают снимать с шагом 2 МГц: 1 кГц (начальная точка АЧХ), 2 МГц, 4 МГц, ... до частоты, при которой амплитуда изображения сигнала упадет до величины порядка 0,5...0,7 от первоначально установленной при  $f_0 = 1$  кГц. Для уточнения верхней частоты  $f_v$  рабочей полосы частот  $\Delta f$  осциллографа необходимо в районе предположительного спада АЧХ до 0,707 (3 дБ) дополнительно снять АЧХ с меньшим шагом изменения частоты входного сигнала<sup>1</sup>. Результаты испытаний записать в таблицу, где  $L_{2A}(f)$  – размер изображения сигнала на частоте  $f$ ,  $K(f)$  – АЧХ,

---

<sup>1</sup> Поскольку верхняя частота  $f_v$  полосы пропускания осциллографа соизмерима с максимальной частотой генератора, то в случае, если не достигается требуемый спад АЧХ осциллографа, принять для данного эксперимента за верхнюю частоту  $f_v$  максимальную частоту генератора с указанием уровня спада АЧХ.

представленная в относительных единицах для соответствующих частот  $f$ ,  $K(f) = L_{2A}(f)/L(f_0 = 1 \text{ кГц})$ ,  $k_o$  – коэффициент отклонений, при котором проводился эксперимент,  $f_b$  – верхняя граничная частота рабочей полосы пропускания канала, найденная в эксперименте.

Область верхних частот				
$f$ , МГц	0,001	2	4	...
$L_{2A}(f)$ , дел.				
$K(f)$				
$k_o = \dots \text{ В/дел}$			$f_b = \dots \text{ МГц}$	

В области нижних частот АЧХ определяют отдельно для закрытого (AC) и открытого (DC) входов канала вертикального отклонения. Поскольку нижняя частота  $f_n$  рабочей полосы частот  $\Delta f$  для закрытого входа у осциллографов обычно находится в области единиц и первых десятков Гц, процедура определения АЧХ для закрытого входа может быть следующей: сначала уменьшают частоту от  $f_0 = 1000 \text{ Гц}$  через 200 Гц, а затем от 50 Гц – через 10 Гц. Если необходимо, можно уточнить нижнюю частоту  $f_n$  рабочей полосы, при которой АЧХ падает до 0,707, снятием дополнительных точек с шагом 1 Гц.

Определение АЧХ для открытого входа проводится при тех же частотах.

Результаты испытаний представляют в таблице.

Область нижних частот									
$f$ , Гц	1000	800	...	50	40	...	9	8	...
$L_{2A}(f)$ , закр. вх., дел.									
$K(f)$ , закр. вх									
$k_o = \dots \text{ В/дел}; \text{ для закрытого входа } f_n = \dots \text{ Гц}$									
$L_{2A}(f)$ , откр. вх., дел.									
$K(f)$ , откр. вх									
$k_o = \dots \text{ В/дел.}; \text{ для открытого входа } f_n = \dots \text{ Гц}$									

По результатам проведенных исследований строятся графики АЧХ для верхних и нижних частот.

**Применение осциллографа для измерения параметров сигналов.** Объекты измерений задаются преподавателем. Измеряемые сигналы подаются с помощью коаксиального кабеля на второй вход (CH2) осциллографа и устанавливается необходимый режим работы для визуального наблюдения сигналов (переключатель MODE находится в положении CH2; регуляторы POSITION « $\downarrow$ ,  $\leftrightarrow$ » – в положениях, обеспечивающих наблюдение луча по второму каналу; режим синхронизации: AUTO или NORM; CH2, LEVEL – в положении, обеспечивающем устойчивую синхронизацию). Для измерения параметров сигналов коэффициенты развертки и отклонения канала вертикального отклонения устанавливают такими, чтобы на экране ЭЛТ появилось изображение одного-двух периодов исследуемого сигнала с достаточно большой для измерения амплитудой.

Амплитуду сигнала (в вольтах) определяют из соотношения

$$U = k_o L_A ,$$

где  $k_o$  – коэффициент отклонения, В/дел.;  $L_A$  – размер амплитуды, в делениях,

Относительная погрешность  $\delta_A$  измерения амплитуды

$$\delta_A = \delta_{k_0} + \delta_{n_a} + \delta_{v_a},$$

где  $\delta_{k_0}$  – относительная погрешность коэффициента отклонения,  $\delta_{n_a}$  – относительная погрешность нелинейности вертикального отклонения,  $\delta_{v_a}$  – относительная визуальная погрешность.

Погрешности  $\delta_{k_0}$  и  $\delta_{n_a}$  выбираются из полученных при исследовании или, если они не определялись, из технических характеристик осциллографа.

Визуальную погрешность (в процентах) находят из соотношения

$$\delta_{v_a} = 100(b/L_A),$$

где  $L_A$  – размер изображения амплитуды, в делениях,  $b$  – абсолютная погрешность оценки  $L_A$ , зависящая от толщины линии изображения сигнала на экране (фокусировки) и от субъективной погрешности отсчитывания  $L_A$ , часто  $b$  принимают равной толщине линии изображения сигнала на экране луча, в делениях.

Длительность временных параметров (периода, длительности импульса и т. п.) сигнала вычисляют по формуле

$$t_T = k_p L_T,$$

где  $k_p$  – коэффициент развертки, С/дел.;  $L_T$  – размер измеряемого параметра, в делениях, на изображении сигнала по оси  $X$ .

Относительная погрешность  $\delta_t$  измерения временных параметров

$$\delta_t = \delta_{k_p} + \delta_{n_p} + \delta_{v_d},$$

где  $\delta_{k_p}$  – погрешность коэффициента развертки,  $\delta_{n_p}$  – погрешность нелинейности развертки,  $\delta_{v_d}$  – визуальная погрешность измерения длительности.

Погрешность  $\delta_{v_d}$  (в процентах) можно найти из формулы

$$\delta_{v_d} = 100(b / L_T),$$

где  $L_T$  – размера измеряемого параметра по горизонтали,  $b$  – абсолютная погрешность оценки  $L_T$  (см. оценку  $\delta_{v_a}$  ранее).

## Лабораторная работа 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*Цель работы* – ознакомление с методами обработки результатов прямых и косвенных измерений при однократных и многократных измерениях.

### Задание

1. Ознакомиться с лабораторным стендом и сменным модулем «Прямые, косвенные и совместные измерения».

2. **Прямые однократные измерения.** Измерить напряжение на выходе резистивного делителя (по указанию преподавателя). Результат однократного измерения напряжения записать в вид  $U_x = U \pm \Delta U$ .

3. **Косвенные однократные измерения.** Измерить ток, протекающий через резистивный делитель, путем измерения напряжения на образцовом сопротивлении. Результат однократного измерения тока записать в виде  $I_x = I \pm \Delta I$ .

Измерить мощность  $P_{mx}^2$ , выделяемую на участке резистивного делителя с помощью цифрового вольтметра и образцового резистора известного сопротивления. Результат однократного измерения мощности записать в виде  $P_{mx} = P_m \pm \Delta P_m$ .

4. **Прямые многократные измерения<sup>3</sup>.** Измерить несколько раз напряжение, указанное в п. 2, при наличии относительно больших случайных погрешностей (число измерений и уровень случайных погрешностей задаются преподавателем). Обработать полученные данные и результат измерений напряжения записать в виде  $U_x = \bar{U} \pm \Delta U, P = \dots$

5. **Косвенные многократные измерения.** При наличии относительно больших случайных погрешностей измерить несколько раз ток, определяемый в соответствии с п. 3. Обработать полученные данные и результат измерений тока записать в виде  $I_x = \bar{I} \pm \Delta I, P = \dots$

Измерить несколько раз мощность, определяемую в соответствии с п. 3, при наличии относительно больших случайных погрешностей. Обработать полученные данные и результат измерений мощности записать в виде  $P_{mx} = \bar{P}_m \pm \Delta P_m, P = \dots$

#### Описание и порядок выполнения работы

Сменный модуль, устанавливаемый на лабораторном стенде для выполнения работы, включает объекты испытаний (резистивные делители, линейные и нелинейные

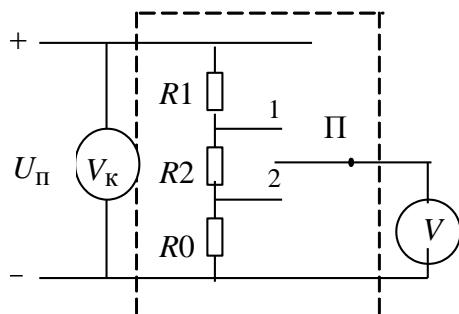


Рис. 5.1

преобразователи) и вспомогательные устройства (набор образцовых сопротивлений, генератор случайных сигналов – ГСС, двухходовой сумматор –  $\Sigma$ , блок выборки и хранения – БВХ, двухпозиционный переключатель –  $\Pi$ ).

Для выполнения лабораторной работы на вертикальном стенде используются источник постоянного напряжения, цифровые вольтметры и генератор сигналов ГС прямоугольной формы.

Для проведения однократных прямых и косвенных

<sup>2</sup> В обозначение мощности « $P$ » искусственно введен индекс « $m$ » с целью отличия от такого же общепринятого обозначения вероятности  $P$ .

<sup>3</sup> Для иллюстрации достоинств многократных измерений эксперименты пп. 4 и 5 по указанию преподавателя могут быть проведены дважды: при небольшом числе измерений (5...7) и числе измерений 20...25. Число измерений и количество экспериментов задаются преподавателем.

измерений используется схема, представленная на рис. 5.1, в которой пунктиром обведены ее элементы, расположенные на модуле, а источник питания и вольтметры находятся на вертикальном стенде.

**Обработка результатов однократных прямых измерений напряжения.** Объектом испытаний для прямых измерений является резистивный делитель напряжения, состоящий из нескольких последовательно соединенных резисторов, например  $R_1, R_2, R_0$  (указываются преподавателем);  $R_0$  – образцовое сопротивление. На вход делителя подают постоянное напряжение, контролируемое цифровым вольтметром  $V_k$ . Выходное напряжение на сумме сопротивлений  $R_2$  и  $R_0$  измеряют цифровым вольтметром  $V$ ; переключатель  $\Pi$  в этом случае устанавливается в положение 1. При отсутствии случайных погрешностей результат измерения находят по однократному показанию  $U$  вольтметра  $V$ .

Погрешность  $\Delta U$  результата измерений в данном случае определяется инструментальной погрешностью вольтметра, которую находят по его классу точности (см. введение). Результат однократного измерения следует представить в виде

$$U_x = U \pm \Delta U. \quad (5.1)$$

**Обработка результатов однократных косвенных измерений.** Результатами косвенных измерений по схеме на рис. 5.1 могут быть, например, ток, протекающий через резисторы, и мощность, выделяемая на резисторах  $R_2$  и  $R_0$ .

При косвенном измерении тока определяют напряжение  $U_0$  на известном образцовом сопротивлении  $R_0$ ; переключатель в этом случае ставится в положение 2. Ток, протекающий через резисторы,  $I = U_0/R_0$ . В этом случае относительная погрешность измерения тока

$$\delta I = \delta U_0 + \delta R_0,$$

где  $\delta U_0 = (\Delta U_0 / U_0)100\%$  – относительная погрешность измерения напряжения, %;  $\Delta U_0$  – абсолютная погрешность измерения напряжения, определяемая классом точности вольтметра, В;  $\delta R_0$  – относительная погрешность сопротивления образцового резистора, % (указывается в описании).

Абсолютная погрешность косвенного измерения тока  $\Delta I = I \cdot \delta I / 100$ , А.

**Результат однократного косвенного измерения тока представляют в виде**

$$I_x = I \pm \Delta I.$$

При измерении мощности, выделяемой на резисторах  $R_2$  и  $R_0$ , используется известное соотношение  $P_m = UI$ . Значения  $U$  и  $I$  были определены в предыдущих опытах. Относительная погрешность измерения мощности

$$\delta P = \delta U + \delta I,$$

где  $\delta U, \delta I$  – относительные погрешности измерения напряжения и тока, определены выше.

Абсолютная погрешность измерения мощности  $\Delta P_m = P_m \cdot \delta P_m / 100$ .

Результат измерения мощности представить в виде

$$P_{mx} = P_m \pm \Delta P_m$$

**Обработка многократных измерений.** Влияние случайных погрешностей на результаты измерений исследуется путем суммирования измеряемых напряжений со случайными сигналами. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 5.2, где штриховой линией обведены элементы схемы, расположенные на модуле; остальные элементы схемы находятся на вертикальном стенде. В этой схеме, по сравнению со схемой однократных измерений (рис. 5.1), введены:

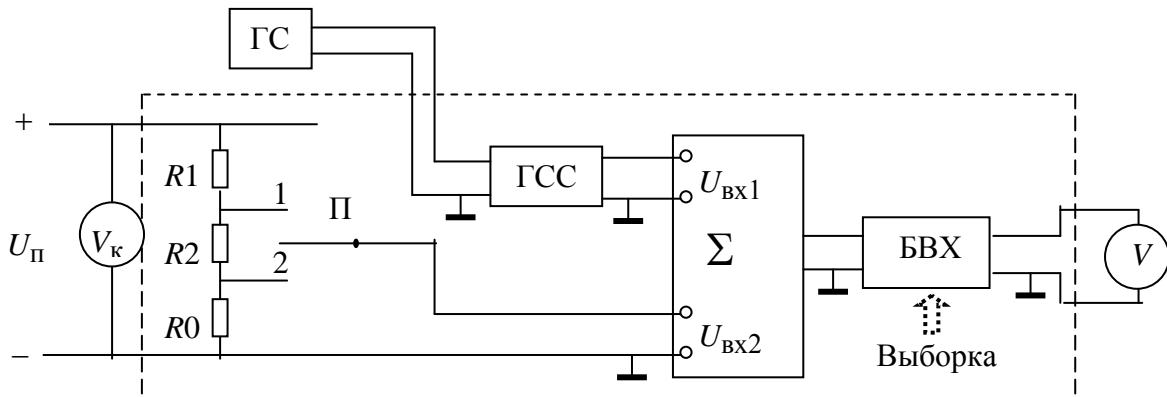


Рис. 5.2

- генератор случайных сигналов ГСС с задающим генератором сигналов ГС прямоугольной формы; дисперсия выходного сигнала ГСС регулируется внутренним переключателем (положения 1...5) и частотой задающего генератора ГС; выходной сигнал генератора ГСС имеет нормальное распределение;
- сумматор  $\Sigma$ , позволяющий суммировать напряжение с испытуемого резистивного делителя и напряжение случайного сигнала с ГСС;
- блок выборки и хранения БВХ, предназначенный для получения дискретных значений измеряемой величины, содержащих случайные погрешности.

При исследовании влияния случайных погрешностей измеряются те же величины, что и при однократных измерениях, – падение напряжения на выбранном участке резистивного делителя (прямые измерения), ток и мощность, выделяемая на этом участке (косвенные измерения).

**Обработка результатов многократных прямых измерений напряжения.** Для исследования влияния случайных погрешностей устанавливают на ГСС (по указанию преподавателя) определенный уровень дисперсии случайной погрешности и проводят  $n$  (по указанию преподавателя) прямых измерений выходного напряжения делителя. Каждое из измерений получают нажатием кнопки «Выборка» на УВХ.

Далее необходимо произвести обработку полученных результатов в такой последовательности:

- a) найти среднее арифметическое отдельных результатов наблюдений

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i,$$

где  $n$  – число наблюдений; принять  $\bar{U}$  за действительное значение измеряемой величины (результат измерения);

*б)* найти оценку дисперсии случайной погрешности измерений

$$S^2[U] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2;$$

*в)* найти оценку дисперсии погрешности результата измерения

$$S^2[\bar{U}] = \frac{S^2[U]}{n}.$$

Номер измерения	$U_i$ , В	$\bar{U}$ , В	$S^2[U]$ , В <sup>2</sup> ; $S[U]$ , В	$S^2[\bar{U}]$ , В <sup>2</sup> ; $S[\bar{U}]$ , В

Результаты измерений и вычислений свести в таблицу, где в 3–5-м столбцах представлены результаты обработки;

*г)* доверительный интервал погрешности результата измерений при нормальном законе распределения случайных погрешностей определяется выражением

$$\Delta U = t_p(f) S[\bar{U}],$$

где  $t_p(f)$  – коэффициент распределения Стьюдента, соответствующий задаваемой доверительной вероятности  $P$  и числу степеней свободы  $f$ . В рассматриваемом случае  $f = n - 1$ . Значение  $P$  задается преподавателем. Некоторые значения коэффициента Стьюдента приведены в таблице. Отсутствующие значения можно найти линейной интерполяцией соседних значений.

Доверительная вероятность $P$	Коэффициент Стьюдента при числе степеней свободы $f$								
	4	5	6	7	8	10	15	20	$\infty$
0,90	2,13	2,02	1,94	1,86	1,81	1,75	1,72	1,70	1,65
0,95	2,77	2,57	2,45	2,31	2,23	2,13	2,09	2,04	1,96
0,98	3,75	3,36	3,14	2,90	2,76	2,60	2,53	2,46	2,33

При числе степеней свободы более 30 можно пользоваться графикой  $\infty$ , соответствующей нормальному закону распределения;

*д)* результат измерения напряжения записать в виде

$$U_x = \bar{U} \pm t_p(f) S[\bar{U}] \quad P = \dots .$$

#### **Обработка результатов многократных косвенных измерений мощности.**

Методика определения мощности полностью совпадает с методикой при однократных измерениях.

Для исследования влияния случайных погрешностей устанавливают на ГСС (по указанию преподавателя) некоторый уровень дисперсии случайной погрешности и проводят (по указанию преподавателя) по  $n$  измерений выходного напряжения делителя в положениях 1 и 2 переключателя  $\Pi$  (рис. 5.2). Каждое измерение проводят нажатием кнопки «выборка» на БВХ. В результате получают два ряда значений напряжений  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$ ; индексы 1 и 2 соответствуют положению переключателя  $\Pi$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Обработка результатов каждого ряда измерения напряжений проводится аналогично указанной ранее обработке результатов многократных прямых измерений и заполняются такие же таблицы (пп. 2 и 3 не выполняются).

Результат измерения мощности при многократном косвенном измерении

$$\overline{P_m} = \overline{U_1} \overline{I_2} = \overline{U_1} \overline{U_2} / R_0, \quad (5.2)$$

где  $\overline{U_1}$  и  $\overline{U_2}$  – средние значение напряжений для двух рядов измерений,  $\overline{I_2} = \overline{U_2} / R_0$  – среднее значение тока, текущее через сопротивление образцового резистора. Предполагается, что случайные погрешности много больше погрешности образцового сопротивления, которой в данном расчете пренебрегаем.

Определим доверительный интервал результата измерений. Из формулы полного дифференциала  $dP_m = \frac{dP_m}{dU} \Delta U + \frac{dP_m}{dI} \Delta I$  и формулы (5.2) следует

$$S^2[\overline{P_m}] = \frac{1}{R_0^2} \left\{ \left( \frac{d\overline{P_m}}{d\overline{U_1}} \right)^2 S^2[\overline{U_1}] + \left( \frac{d\overline{P_m}}{d\overline{U_2}} \right)^2 S^2[\overline{U_2}] \right\} \quad (5.3)$$

Поскольку использовался один и тот же ГСС, можно определить уточненную дисперсию средних  $S^2[\overline{U}] = (S^2[\overline{U_1}] + S^2[\overline{U_2}]) / 2$  с числом степеней свободы  $f = 2n - 2$  и использовать ее в (5.3) вместо  $S^2[\overline{U_1}]$  и  $S^2[\overline{U_2}]$ . Результат измерения мощности следует записать в виде

$$P_{mx} = \overline{P_m} \pm k_p(f) S[\overline{P_m}], \quad P = \dots,$$

где  $k_p(f)$  – коэффициент Стьюдента, соответствующий числу степеней свободы  $f = 2n - 2$  и доверительной вероятности  $P$ .

## Лабораторная работа 6. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

*Цель работы* – изучение динамического режима средств измерений.

## Задание

1. Ознакомиться с лабораторной установкой. Собрать схему исследования динамического звена 2-го порядка. Получить у преподавателя задание на выполнение лабораторной работы. Записать частоту  $f_0$  собственных колебаний и коэффициент  $\beta$  демпфирования (степень успокоения) для заданных вариантов реализации динамического звена.
2. Исследовать динамический режим заданных средств измерений при ступенчатом изменении входного сигнала.
  - 2.1. Определить динамическую погрешность при заданных параметрах звена 2-го порядка и выбранных амплитуде и частоте входных сигналов – прямоугольных импульсов; погрешность определить в 6...10 точках на одном полупериоде входного сигнала. Построить графики входного и выходного сигналов исследуемого средства. Построить графики динамической погрешности. По результатам исследований сделать выводы о влиянии  $f_0$  и/или  $\beta$  на характер изменения выходного сигнала и динамическую погрешность.
  - 2.2. Определить время  $t_y$  установления выходного сигнала для различных частот  $f_{0i}$  собственных колебаний при заданном коэффициенте демпфирования  $\beta$ . Построить график зависимости  $t_y = F(f_{0i})$  при  $\beta = \text{const}$ . При определении времени установления принять погрешность асимптотического приближения переходного процесса, равную 5 % от установившегося значения.
  - 2.3. Определить время  $t_y$  установления выходного сигнала для различных коэффициентов  $\beta_i$  демпфирования при заданной частоте  $f_0$  собственных колебаний. Построить график зависимости  $t_y = F(\beta_i)$  при  $f_0 = \text{const}$ . По результатам пунктов 2.2, 2.3 сделать выводы о влиянии  $f_0$  и  $\beta$  на время установления  $t_y$ .
3. Исследовать динамический режим средств измерений при синусоидальном входном воздействии. Определить погрешности в динамическом режиме при указанных параметрах ( $f_0$ ,  $\beta$ ) звена 2-го порядка и заданной частоте входного сигнала; погрешности определить в 8...10 точках на одном периоде сигнала. Построить графики входного и выходного сигналов, график динамической погрешности. Сделать вывод о характере изменения динамической погрешности и оценить ее максимальное (амплитудное) значение.

## *Описание и порядок выполнения работы*

**Общие сведения.** Изменение входного сигнала во времени может значительно повлиять на результаты измерений. Важными при этом являются, во-первых, характер изменения сигнала, т. е. его динамические свойства, и, во-вторых, «скорость реакции» средства измерений на входное воздействие, определяемая динамическими характеристиками этого средства. В таких случаях говорят о динамическом режиме средства измерений.

При анализе динамического режима средств измерений оказывается весьма удобным рассматривать идеальные и реальные средства измерений, сопоставляя реакцию этих средств на одни и те же входные воздействия.

Идеальные в динамическом смысле средства измерений СИ<sub>и</sub>, иначе безынерционные, имеют, как правило, линейную зависимость выходного сигнала  $y_i(t)$  от входного  $x(t)$ :  $y_i(t) = k_h x(t)$ , где  $k_h$  – номинальный коэффициент преобразования. Очевидно, что в таких средствах измерений выходной сигнал во времени полностью повторяет входной с точностью до множителя  $k_h$ .

В реальных средствах измерений СИ<sub>р</sub> выходной сигнал  $y(t)$  в силу указанных причин будет иметь более сложную зависимость от входного сигнала, в частности, описываемую дифференциальными уравнениями соответствующего порядка.

Разность между выходным сигналом  $y(t)$  реального средства измерений и выходным сигналом  $y_i(t)$  (сигнал идеального средства измерений) при одном и том же входном

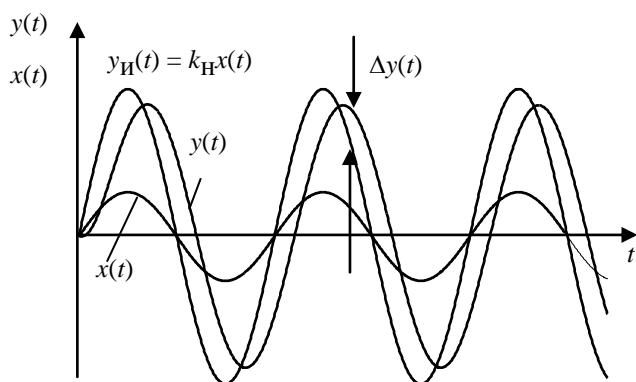


Рис. 6.1

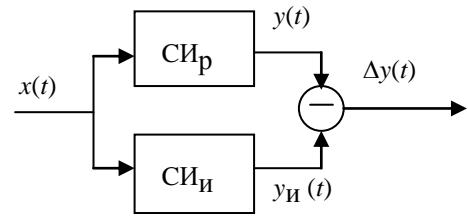


Рис. 6.2

сигналом  $x(t)$  определяет динамическую погрешность по выходу реального средства СИ<sub>р</sub> измерений:

$$\Delta y(t) = y(t) - y_i(t).^1 \quad (6.1)$$

Рисунок 6.1 иллюстрирует возможный вариант входного  $x(t)$  и выходных  $y_i(t)$ ,  $y(t)$  сигналов идеального и реального средств измерений и возникающую при этом динамическую погрешность  $\Delta y(t)$ . На рис. 6.2 показана структурная схема, удобная для интерпретации и оценки возникающей динамической погрешности.

**Структурная схема лабораторной установки.** Лабораторная установка состоит из трех основных блоков:

- унифицированной вертикальной стойки, включающей источники питания, генератор сигналов прямоугольной, синусоидальной и треугольной формы и измерительные приборы – цифровой частотомер и два цифровых вольтметра;

<sup>1</sup> В общем случае выражение (6.1) включает динамическую и статическую погрешности средств измерений. Однако в данной работе будем считать, что статическая погрешность пренебрежимо мала.

- двухканального электронно-лучевого осциллографа;
- специализированного горизонтального модуля, предназначенного для выполнения конкретной лабораторной работы – исследования динамического режима средств измерений.

В специализированном горизонтальном модуле находится объект исследования – фильтр нижних частот (ФНЧ) 2-го порядка, в котором предусмотрена возможность дискретного изменения частоты собственных колебаний – 4 положения, и коэффициента демпфирования (или степени успокоения) – так же 4 положения. Различным сочетанием этих параметров достигается широкий диапазон изменения динамических характеристик объекта исследования. Ручки переключения соответствующих параметров установлены на лицевой панели пульта в правой верхней его части.

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис. 6.3, где ЭЛО – двухканальный электронно-лучевой осциллограф, имеющий вход по оси Z; приборы, установленные на вертикальном стенде: ГС – генератор сигналов прямоугольной, синусоидальной и треугольной формы, ЦВ1 и ЦВ2 – цифровые вольтметры, ЦЧ – цифровой частотометр; устройства, встроенные в горизонтальный пульт (на схеме обведены штриховой линией): ФНЧ – фильтр нижних частот, УВХ1 и УВХ2 – устройства выборки и хранения мгновенных значений напряжений входного и выходного сигналов ФНЧ соответственно, блок синхронизации («Синхронизация»), блок управления выборкой («Управление выборкой»). Управление временем выборки осуществляется двумя потенциометрами, установленными в нижней правой части передней панели модуля.

*Рекомендации по сборке схемы.* При сборке принципиальной схемы, соответствующей структурной схеме (рис. 6.3), все связи реализуются двухпроводными линиями с соблюдением «земляных» зажимов. Входы Y1, Y2, Z осциллографа имеют коаксиальные кабели.

Перед проведением экспериментов необходимо совместить начальную установку лучей по обоим каналам осциллографа и установить одинаковые коэффициенты отклонений, удобные для визуального наблюдения. Установить коэффициент развертки, при котором на экране осциллографа наблюдается один период (или полупериод) входного сигнала.

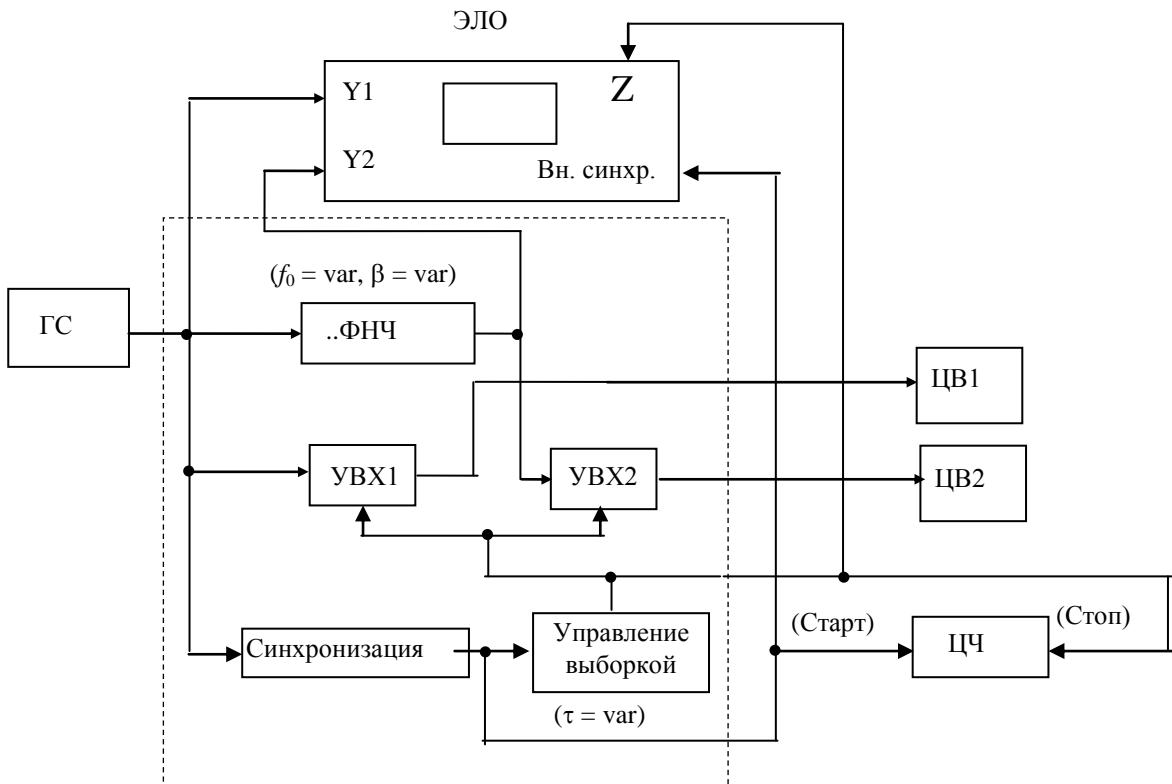


Рис. 6.3

**Принцип работы схемы и методические указания.** Лабораторная установка позволяет одновременно наблюдать входные и выходные сигналы объекта исследования – фильтра нижних частот на экране двухканального осциллографа и измерять мгновенные значения напряжения этих сигналов в определенные моменты времени, устанавливаемые в процессе измерений. Таким образом, на установке реализуются дискретные измерения переменных во времени сигналов.

Выходные сигналы генератора ГС используются как испытательные сигналы для ФНЧ, относительно которых реализуется общая синхронизация работы всей установки. Вид сигналов, их частота и амплитуда определяются заданием.

Для визуального наблюдения входного и выходного сигналов ФНЧ эти сигналы подаются соответственно на входы Y1 и Y2 двухканального осциллографа, работающего в режиме внешней синхронизации. Для запуска развертки блоком «Синхронизация» при положительном фронте входного сигнала

(см. также рис. 6.4) вырабатывается импульс синхронизации, который подается на вход «Вн. синхр» осциллографа и запускает генератор развертки. Этим достигается устойчивое изображение сигналов на экране при заданном моменте начала развертки, совпадающим с передним фронтом входного импульса. Фрагмент такого изображения, а также управляющие импульсы представлены на рис. 6.4.

Измерение сигналов проводят в некоторые дискретные моменты времени. Выбор точек измерений проводится из соображений возможности восстановления непрерывных

кривых сигналов, как, например, показано на рис. 6.4, где измерения проводятся в точках 1, 2, ..., 7, определяющих экстремумы и точки пересечения кривых изображения сигналов.

Момент времени измерений определяется *импульсом управления выборкой*, который вырабатывается блоком «Управление выборкой» с некоторой временной задержкой  $\tau$  относительно *импульса синхронизации*. Величина этой задержки ( $\tau = \text{var}$ ) регулируется вручную на пульте управления. Для визуального наблюдения положения импульса на осциллографе этот импульс подается на вход Z осциллографа и запирает электронный луч, что

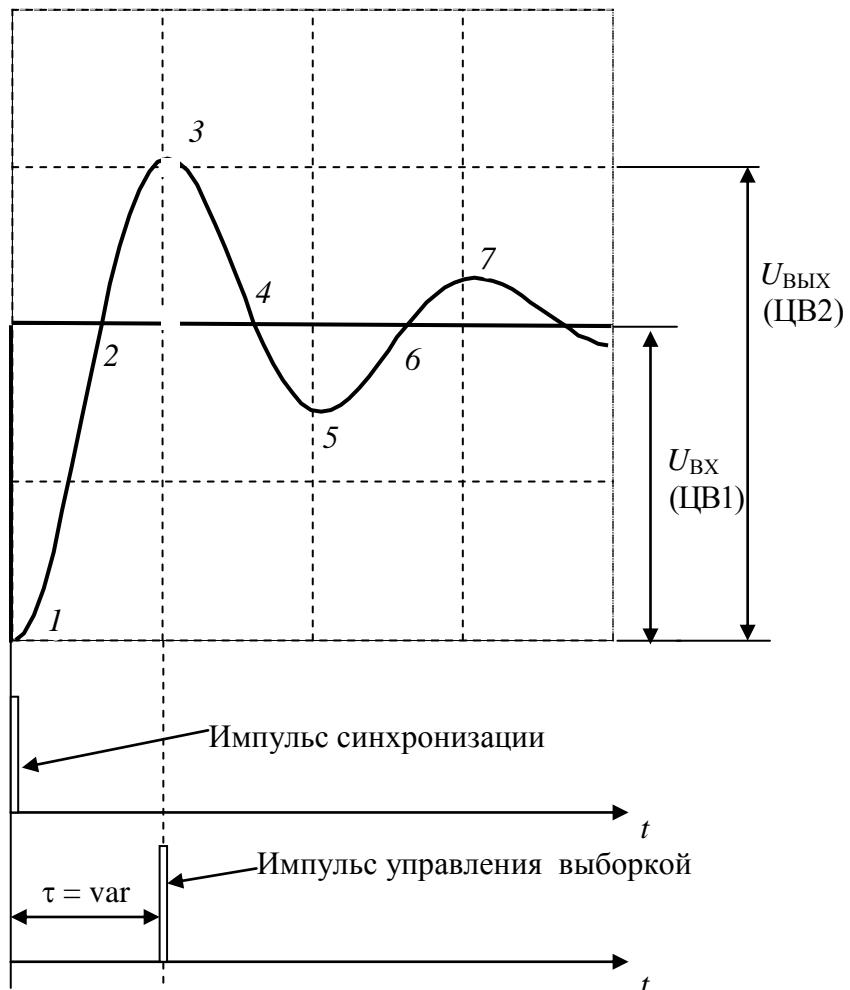


Рис. 6.4

наблюдаются в виде «пробела» на осциллографме (см. т. 3 на рис. 6.4). Установленное время задержки  $\tau$  измеряют цифровым частотомером ЦЧ в режиме измерения временного интервала при старт-стопном запуске.

Измерение мгновенных значений напряжений осуществляется с помощью устройств выборки и хранения УВХ и цифровых вольтметров ЦВ, установленных в цепях входа (УВХ1, ЦВ1) и выхода (УВХ2, ЦВ2) ФНЧ.

С приходом импульса управления выборкой в УВХ запоминается текущее мгновенное значение напряжения и сохраняется в течение достаточно большого времени, необходимого для измерения напряжения цифровым вольтметром ЦВ.

Таким образом проводятся измерения входных  $u_{\text{вх}i}$  и выходных  $u_{\text{вых}i}$  сигналов ФНЧ в выбранных дискретных точках  $t_i$ , где  $t_i$  – моменты времени измерения напряжений, отсчитываемые от импульса синхронизации. Результаты измерений по каждому эксперименту заносятся в таблицу.

$t_i$	$t_1$	$t_2$	...	$t_n$
$u_{\text{вх}i}$	$u_{\text{вх}1}$	$u_{\text{вх}2}$	...	$u_{\text{вх}n}$
$u_{\text{вых}i}$	$u_{\text{вых}1}$	$u_{\text{вых}2}$	...	$u_{\text{вых}n}$

По полученным дискретным точкам строятся требуемые по заданию графики. Приводятся выводы по работе.

## Лабораторная работа 7. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ

Цель работы – изучение способов и средств измерения амплитудных и временных параметров сигналов в электронных цепях.

### *Задание*

1. Ознакомиться с имеющейся на рабочем месте аппаратурой и получить у преподавателя конкретные пункты задания для выполнения.
2. Измерить режим работы усилителя на постоянном токе; оценить погрешности измерений.
3. Измерить коэффициент усиления усилителя.
4. Измерить коэффициенты формы и амплитуды сигналов специальной формы на двух (трех) частотах; оценить погрешности результатов.
5. Измерить постоянную времени интегратора. Оценить погрешность результата.

Описание и порядок выполнения работы

**Измерение режимов работы усилителя на постоянном токе.** Объектом исследования является усилитель переменного тока, схема которого представлена на рис. 7.1. Перед исследованием необходимо подать на усилитель питание напряжением  $U_{\text{п}} = 9 \dots 10$  В с источника постоянного напряжения стенда, обязательно соблюдая полярности указанные на схеме.

Режим усилителя по постоянному току относительно отрицательного потенциала питания; для удобства изложения все точки, имеющие в данном случае одинаковый с минусом питания потенциал, часто именуются *шиной* (или общей шиной).

Измерения напряжений проводят вольтметром постоянного тока, находящимся на стенде, или электроннолучевым осциллографом, работающим в режиме с открытым входом.

Результаты измерений должны быть представлены в виде

$$U_{KT\ i} = U_{KT\ i}^* \pm \Delta U_{KT\ i},$$

где  $U_{KT\ i}^*$  – значения напряжений, измеренные

вольтметром или осциллографом в соответствующих контрольных точках,  $\Delta U_{KT\ i}$  – абсолютные погрешности измерения напряжений (измерение напряжений соответствующими средствами и способы оценки погрешностей представлены в инструкциях пользователей к соответствующим приборам; в разделе «Применение осциллографа для измерения параметров сигналов» лаб. раб. 4 и во введении).

Прямые измерения напряжений в контролируемых точках возможны, если входное сопротивление вольтметра/осциллографа существенно больше сопротивлений участков цепи, где проводятся измерения; в этом случае шунтирующим влиянием средств измерений можно пренебречь.

Особое внимание необходимо уделять измерению напряжений во входных цепях усилителей, которые часто делают высокоомными. В этом случае прямые измерения напряжения в контрольной точке КТ2 могут привести к большой погрешности измерений из-за шунтирующего влияния самих средств измерений.

Для уменьшения этой погрешности возможно, в частности, применение косвенных измерений напряжения в точке КТ2. В этом случае последовательно измеряют одним вольтметром постоянного тока сначала напряжение  $U_1$  на сопротивлении  $R_1$ , а затем напряжение  $U_2$  на сопротивлении  $R_2$ . Тогда в достаточно широком диапазоне входных сопротивлений усилителя и средств измерений напряжение в контрольной точке КТ2 будет определяться выражением

$$U_{KT2} = U_{\pi} \frac{U_2}{U_1 + U_2},$$

относительная погрешность измерения этого напряжения

$$\delta_{KT2} \leq \delta_{\pi} + \delta_1 + \delta_2,$$

где  $\delta_{\pi}, \delta_1, \delta_2$  – относительные погрешности измерения напряжений  $U_{\pi}, U_1, U_2$ .

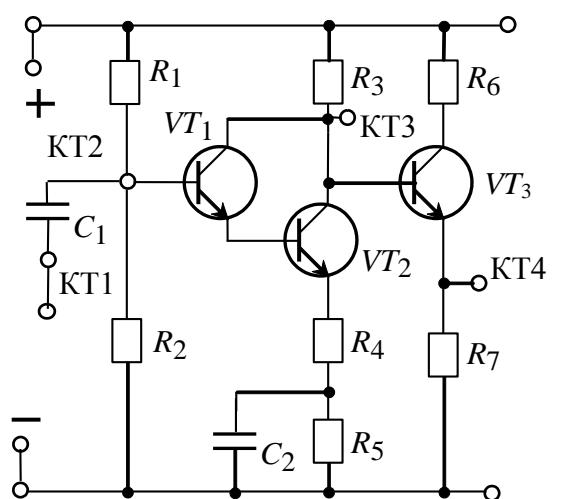


Рис. 7.1

Сравните результаты прямых и косвенных измерений напряжения в контрольной точке КТ2.

**Определение коэффициента усиления** по переменному току проводится для двух выходов (контрольные точки КТ3 или КТ4 на рис. 7.1) с помощью генератора ГС и осциллографа. Для этого следует подключить к входу усилителя источник сигнала, а выбранный выход усилителя подключить к входу CH1 (CH2) осциллографа. Установив частоту синусоидального сигнала равной 1 кГц, следует отрегулировать амплитуду сигнала таким образом, чтобы изображение сигнала на экране осциллографа визуально было бы неискажённым. После определения размера изображения двойной амплитуды  $L_{\text{вых}}$  (в делениях сетки экрана) оценивают значение выходного сигнала:  $U_{\text{вых}} = k_{01}L_{\text{вых}}$ , где  $k_{01}$  – коэффициент отклонения осциллографа. Затем, подключив осциллограф к входу усилителя, подбирают значение коэффициента отклонения  $k_{02}$ , обеспечивающее удобное наблюдение входного сигнала. Значение входного сигнала:  $U_{\text{вх}} = k_{02} \cdot L_{\text{вх}}$ , где  $L_{\text{вх}}$  – размер изображения двойной амплитуды входного сигнала, в делениях. Коэффициент усиления оценивается по формуле:

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}.$$

Относительная погрешность результата (в процентах):

$$\delta_K = \delta_{U_{\text{вых}}} + \delta_{U_{\text{вх}}},$$

где  $\delta_{U_{\text{вых}}}$ ,  $\delta_{U_{\text{вх}}}$  – относительные погрешности измерения напряжений осциллографом (см. лаб. раб. 4, разд. «Применение осциллографа для измерения параметров сигналов»).

**Измерение коэффициентов формы и амплитуды сигналов.** Одним из способов измерения коэффициентов является сравнение действующих, средневыпрямленных и амплитудных оценок одного и того же сигнала, полученных с помощью вольтметров переменного тока с соответствующими способами преобразования входного переменного сигнала.

Источником испытательных сигналов является генератор сигналов специальной формы (синусоидальной, прямоугольной, треугольной), входящий в вертикальный стенд лабораторной установки.

Измерение коэффициентов формы и амплитуды в лабораторной работе проводится с помощью встроенных в стенд преобразователей переменного напряжения в постоянное и вольтметров постоянного тока. Чтобы собрать вольтметр, показания которого пропорциональны действующему, средневыпрямленному или амплитудному значению сигнала, следует выход соответствующего преобразователя соединить с входом вольтметра постоянного тока; вход преобразователя при этом становится входом соответствующего вольтметра переменного тока. Следует отметить, что в отличие от промышленных вольтметров в данном случае показания прибора не градуируются в действующих значениях синусоидального напряжения. Это упрощает решение поставленной задачи.

Каждый из преобразователей передаёт значение параметра входного сигнала с коэффициентом преобразования  $k=0,1$  при диапазоне входных напряжений  $|U_{\text{max}}| \leq 10$  В и

предельной допускаемой приведённой (к  $U_{\max} = 10$  В) погрешностью  $\gamma$ ; для соответствующих преобразователей  $\gamma_A = 1,5$ ,  $\gamma_{cp} = 1,5$ ,  $\gamma_d = 2,5$  в диапазоне частот от 20 Гц до 50 кГц.

Относительная погрешность преобразования (в процентах)

$$\delta = \frac{\gamma U_{\max} k}{U_{\Pi}},$$

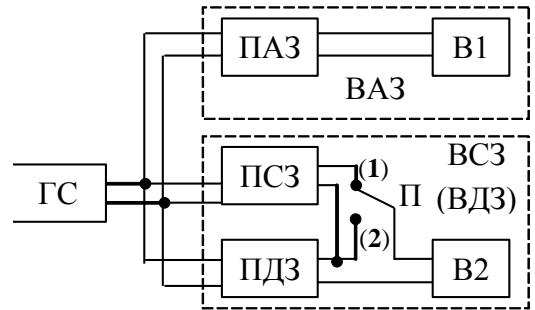


Рис. 7.2

(7.1)

где  $U_{\Pi}$  – показание вольтметра, подключенного к выходу преобразователя.

Для измерения коэффициентов формы и амплитуды собрать схему, представленную на рис. 7.2, где ГС – генератор сигналов; ПАЗ, ПСЗ, ПДЗ – преобразователи амплитудного, средневыпрямленного и действующего значений; П – переключатель преобразователей; В1, В2 – вольтметры постоянного тока; ВАЗ, ВС3, ВДЗ – вольтметры амплитудного, средневыпрямленного и действующего значений.

Коэффициенты формы  $k_f$  и амплитуды  $k_A$  определяются отношениями:  $k_f = U/U_{cp}, k_A = U_m/U$ , где  $U, U_{cp}, U_m$  – действующее, средневыпрямленное и амплитудное значения измеряемого напряжения. Относительная погрешность измерения любого из коэффициентов (в процентах):

$$\delta_k = \delta_{A(cp)} + \delta_d + \delta_{V1(V2)} + \delta_{V2},$$

где  $\delta_{A(cp)}$  – относительная погрешность амплитудного (или средневыпрямленного) преобразователя;  $\delta_d$  – относительная погрешность преобразователя действующего значения;  $\delta_{V1(V2)}$ ,  $\delta_{V2}$  – относительные погрешности измерений напряжения соответствующими вольтметрами.

Погрешности  $\delta_{A(cp)}, \delta_d$  определяются по формуле (7.1) для каждого преобразователя, а погрешности вольтметров – по двучленной формуле (см. введение) с коэффициентами  $c/d$ ;  $c = 0,5$ ,  $d = 0,2$  для предела измерений 2 В.

Рекомендуемые частоты сигнала генератора: 50, 400 и 1000 Гц. Выбранные значения устанавливаются с помощью частотомера стенда.

Рекомендуемый диапазон амплитуд входного сигнала преобразователей: 5...10 В.

При проведении экспериментов следует с помощью осциллографа контролировать форму выходного сигнала генератора.

Теоретические значения коэффициентов формы и амплитуды приведены в таблице.

Коэффициент	Значения коэффициентов для видов периодического сигнала		
	синусоидального	прямоугольного	треугольного
амплитуды	$\sqrt{2} \approx 1,41$	1	$\sqrt{3} \approx 1,73$
формы	$\pi \cdot \sqrt{2}/4 \approx 1,11$	1	$2/\sqrt{3} \approx 1,15$

**Постоянныe времени интегратора**, рис. 7.3, *a*, измеряют косвенно на основании зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(t)$  интегратора от постоянного напряжения  $U_{\text{вх}}$  на его входе

$$U_{\text{вых}}(t) = -U_{\text{вх}}t/\tau_{1(2)}, \quad (7.2)$$

где  $\tau_{1(2)} = R_{1(2)}C$  – постоянные времена интегратора по входу 1 (2). Приведённое соотношение на практике сохраняет хорошую линейность при малых значениях  $t/\tau_{1(2)}$ .

При скачкообразном изменении входного напряжения на величину  $\Delta U_{\text{вх}}$  выходное напряжение будет меняться согласно (7.2) и в конце интервала времени  $\Delta t$  достигать максимального значения  $\Delta U_{\text{вых}}$ , рис. 7.3, *б*. Отсюда постоянные времена интегратора определяются соотношением

$$\tau_{1(2)} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}} \Delta t. \quad (7.3)$$

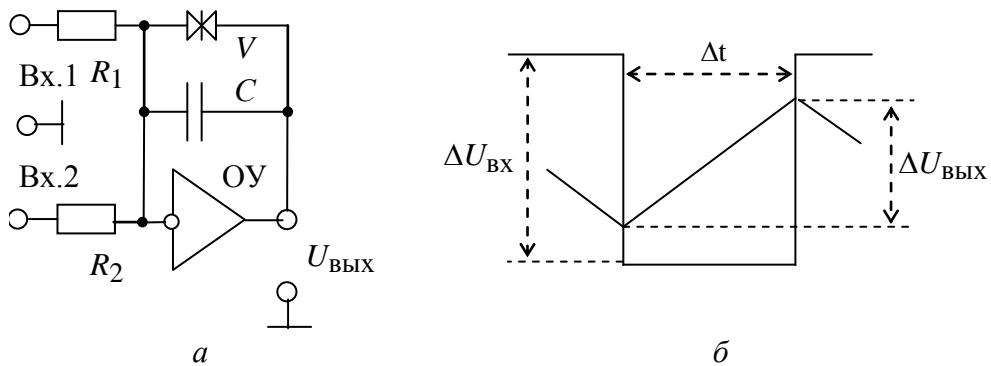


Рис. 7.3

Экспериментально определить постоянные  $\tau_{1(2)}$  можно с помощью генератора прямоугольных импульсов и осциллографа. Для этого необходимо сигнал генератора прямоугольной формы подать на один из входов интегратора и вход СН1 канала осциллографа, а на второй вход СН2 осциллографа подать выходной сигнал интегратора. Регулировками осциллографа добиться устойчивого изображения, аналогичного рис. 7.3, *б*. По осциллограмме находят

$$\Delta U_{\text{вх}} = k_o L_{\Delta U_{\text{вх}}}, \Delta U_{\text{вых}} = k_o L_{\Delta U_{\text{вых}}}, \Delta t = k_p L_{\Delta t},$$

где  $k_o$ ,  $k_p$  – коэффициенты отклонения и развёртки осциллографа,  $L_{\Delta U_{\text{вх}}}$ ,  $L_{\Delta U_{\text{вых}}}$ ,  $L_{\Delta t}$  – размеры изображений входного и выходного напряжений и интервала интегрирования.

Постоянная времени  $\tau$  определяется в соответствии с формулой (7.3). Относительная погрешность  $\delta_\tau$  экспериментального определения постоянной времени

$$\delta_\tau = \delta_{\Delta U_{\text{вх}}} + \delta_{\Delta U_{\text{вых}}} + \delta_{\Delta t},$$

где  $\delta_{\Delta U_{\text{вх}}}$ ,  $\delta_{\Delta U_{\text{вых}}}$ ,  $\delta_{\Delta t}$  – относительные погрешности измерения соответствующих напряжений и интервала времени (см. лаб. раб. 4, разд. «Применение осциллографа для измерения параметров сигналов»).

## Лабораторная работа 8.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

*Цель работы* – изучение средств и методов измерения параметров электрических цепей; оценка результатов и погрешностей измерений.

#### Задание

1. Ознакомиться со средствами измерений параметров электрических цепей в лабораторной работе и соответствующими инструкциями пользователей. Получить у преподавателя конкретное задание по используемым средствам измерений и объектам измерений.
2. Измерить и оценить погрешности результатов измерений сопротивления резисторов, встроенных в лабораторный модуль, следующими приборами:
  - измерителем импеданса («измерителем иммитанса»),
  - универсальным электронным вольтметром в режиме измерения сопротивления,
  - универсальным цифровым вольтметром в режиме измерения сопротивления,
  - комбинированным магнитоэлектрическим измерительным прибором (тестером) в режиме измерения сопротивления (режиме омметра).

Погрешности результатов измерений оценить непосредственно при выполнении работы по имеющимся в лаборатории метрологическим характеристикам используемых средств измерений. Провести сравнительный анализ полученных результатов.

3. Измерить емкость  $C$  и тангенс угла потерь  $\operatorname{tg}\delta$  конденсатора, индуктивность  $L$  и добротность  $Q$  катушки измерителем импеданса по параллельной и последовательной схемам замещения; оценить погрешности результатов измерений.

#### *Описание и порядок выполнения работы*

**Измерение сопротивлений.** Объекты измерений – резисторы и используемые средства измерений указываются преподавателем.

Измерение сопротивлений проводится по методике, представленной в инструкциях пользователя соответствующих приборов. Результаты измерений должны быть представлены в виде:

$$R_x = R_{\text{пр}} \pm \Delta R, \quad (8.1)$$

где  $R_{\text{пр}}$  – сопротивление измеряемого резистора, определяемое по шкале прибора,  $\Delta R$  – абсолютная погрешность измерения сопротивления.

Погрешности результатов измерений определяются непосредственно при выполнении работы в лаборатории на основании указанных в инструкциях классов точности или предельных значений инструментальных погрешностей средств измерений; см. также введение и [1].

Дополнительно поясним оценку погрешностей для ряда омметров, имеющих неравномерную шкалу с диапазонами показаний  $0 - \infty$ ,  $\infty - 0$ . В таких приборах традиционное понятие «нормирующее значение шкалы», выраженное в единицах измерений – омах, не имеет смысла. За нормирующее значение  $L_N$  принимают геометрическую длину шкалы, выраженную в делениях любой равномерной шкалы, имеющейся у данного прибора, например шкалы для измерения напряжения или тока (рис. 8.1).

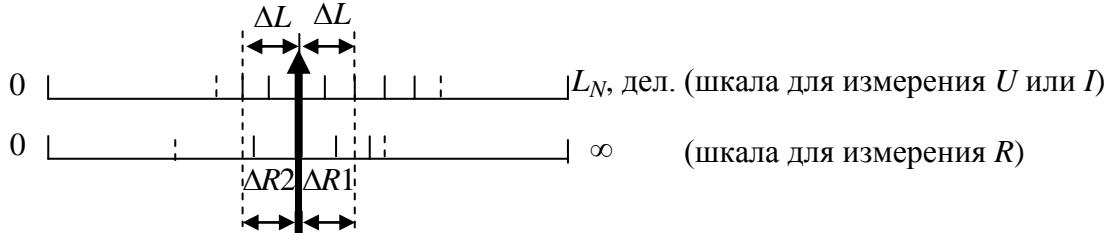


Рис. 8.1

В таких приборах класс точности имеет особое обозначение  $\text{кл.т}_v^{2,5,4,0}$ , например  $v^{2,5}, v^{4,0}$ . Численное значение класса точности при таком его

представлении означает максимальную допустимую приведенную погрешность омметра, в данном случае определяемую как отношение максимально допустимой абсолютной погрешности прибора, выраженную в делениях, к длине  $L_N$  шкалы омметра в тех же делениях.

Отсюда следует двухступенчатая процедура оценки погрешности результата измерений сопротивления омметрами по его классу точности. Сначала определяют предельную абсолютную погрешность прибора, выраженную в делениях любой равномерной шкалы:

$$\Delta L = \frac{\text{кл.т} \cdot L_N}{100}, \quad (8.2)$$

где  $L_N$  – нормирующее значение равномерной шкалы, выраженное в делениях шкалы, например  $L_N = 30$  делений.

На рисунке показаны «выпрямленные шкалы» и некоторое положение указателя – стрелки при измерении сопротивления, а также интервалы  $\pm\Delta L$  предельной абсолютной погрешности измерений, в делениях шкалы, определяемые в соответствии с (8.2). Для определения погрешностей в единицах измерения сопротивления – Омах, границы этого интервала переносятся (визуально или с помощью магазина сопротивлений) на неравномерную шкалу измерения  $R_x$  по этой шкале определяются в общем случае неравные погрешности  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_2$ .

В этом случае результат измерения следует записать в виде:

$$R_x = R_{\text{пр}} \begin{matrix} +\Delta R_1 \\ -\Delta R_2 \end{matrix}.$$

**Измерение емкости и тангенса угла потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек.** Объекты измерений указываются преподавателем; для измерений применяют измеритель импеданса («измеритель иммитанса»). Результаты измерений по каждому параметру представляют в виде, аналогичном (8.1). Оценку погрешностей проводят в лаборатории по методике, указанной в описании прибора.

## Лабораторная работа 9. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ, ПЕРИОДА И ФАЗЫ

*Цель работы* – ознакомление с методами и средствами измерения частоты, временных интервалов, фазового сдвига и с методикой оценки погрешностей результатов измерений.

### Задание

1. Ознакомиться с инструкцией по применению цифрового частотомера для измерения частоты и периода.
2. Измерить частоту и период периодического сигнала по заданию преподавателя с помощью универсального частотомера и оценить погрешность измерения.
3. Измерить частоту и период тех же сигналов осциллографом. Оценить погрешности результатов измерения.
4. Сравнить результаты измерений предыдущих пунктов.
5. Измерить фазовый сдвиг между напряжениями на входе и выходе устройства двумя способами с помощью электронно-лучевого осциллографа. Оценить погрешности результатов измерения. Сравнить точность измерений этими способами.

### Описание и порядок выполнения работы

**Измерение частоты и периода сигналов универсальным частотомером.** Соединить кабелем вход цифрового частотомера ЦЧ с выходом генератора сигналов ГС, как показано на рис. 9.1 сплошными линиями.

Цифровой частотомер позволяет измерять частоту и период периодических сигналов в диапазоне частот от 0,1 Гц до 120 МГц, уровень входного сигнала – от 20 мВ до 150 В.

Абсолютная погрешность измерения частоты или периода  $\Delta = \pm [5 \times X_{\text{изм}} + k]$ , где  $X_{\text{изм}}$  – показания частотомера,  $k$  – шаг квантования измеряемой величины (определяется весом единицы младшего разряда частотомера).

Разрядность показаний (число цифр в показаниях частотомера) определяется временем измерения (счёта), выбираемым из ряда: 0,1; 1; 10 с.

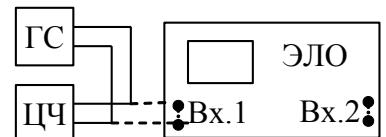


Рис. 9.1

Установить по заданию преподавателя значение частоты генератора в диапазоне 1 Гц ... 10 МГц, задать время счета 0,1 с для частотомера, измерить частоту, а затем период сигнала генератора. Не меняя частоты генератора, повторить измерения для времён счёта 1 и 10 с.

Повторить действия по измерению частоты и периода для других значений частоты генератора (всего 5-6 значений).

Результаты измерения частоты и периода, а также оценки погрешностей измерения свести в таблицу.

Номер измерения	Время счета, с	Показания прибора, $f_x$ (или $T_x$ )	Абсолютная погрешность, $\Delta$ , Гц (или с)	Относительная погрешность, $\delta$ , %	Результат измерения, $f_x \pm \Delta$ , Гц (или $T_x \pm \Delta$ , с)
1	0,1				
2	1				
...	10				
	...				

Сделать выводы о влиянии времени счета на погрешность измерения частоты и периода.

**Измерение частоты и периода сигналов осциллографом.** Подготовить осциллограф к работе в соответствии с инструкцией по применению.

Для измерения периода (рис. 9.1) сигнал с выхода генератора ГС следует подать на вход 1 канала CH1 осциллографа ЭЛО (на рисунке соединение изображено штриховой линией). Включить режим непрерывной синхронизации AUTO по каналу CH1. Переключатель AC-GND-DC (закрытый вход – заземление – открытый вход) установить в среднее положение и регулировкой положения луча по вертикали POSITION↓ установить луч в середину экрана; затем переключатель установить в положение AC (закрытый вход). Дискретно меняя коэффициент отклонения VOLTS/DIV, установить размер видимого изображения сигнала по оси Y в пределах экрана. Регулировкой LEVEL (уровень синхронизации) добиться устойчивого изображения на экране. Дискретным переключателем TIME/DIV коэффициента развёртки  $k_p$  установить такое его значение, при котором в пределах экрана по оси X укладывается от 1 до 2,5 периодов сигнала (рис. 9.2, a, сигнал  $U_1$ ). Положение ручки плавного изменения коэффициента развёртки должно находиться в крайнем по часовой стрелке положении.

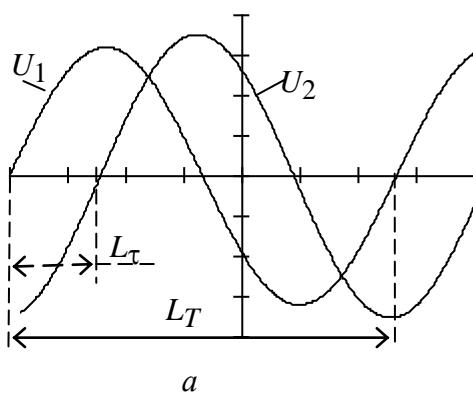


Рис. 9.2

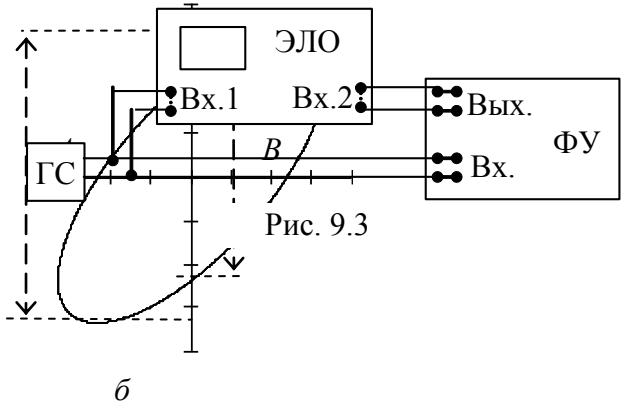


Рис. 9.3

По размеру  $L_T$  изображения периода  $T_x$  определить его значение (в секундах):

$$T_x = k_p L_T. \quad (9.1)$$

Относительная погрешность (в процентах) измерения периода:

$$\delta_T = \delta_{k_p} + \delta_{\text{нр}} + \delta_{\text{вд}}, \quad (9.2)$$

где  $\delta_{k_p}$  – относительная погрешность коэффициента развёртки;  $\delta_{\text{нр}}$  – относительная погрешность нелинейности развёртки,  $\delta_{\text{вд}}$  – визуальная погрешность измерения длительности (см. лаб. раб. 4).

Частоту определяют из отношения:  $f_x = 1/T_x$ . Относительная погрешность измерения частоты  $\delta_f = \delta_T$ .

Для измерения фазового сдвига требуется соединить кабелями осциллограф ЭЛО, генератор ГС и фазосдвигающее устройство ФУ пульта согласно рис. 9.3; «земляные» вилки кабелей следует вставлять в гнёзда общей шины пульта.

Управлением синхронизацией по одному из каналов добиться устойчивого изображения входного  $U_1$  и выходного  $U_2$  напряжений на экране (см. рис. 9.2, а). (Предварительно требуется совместить изображения обоих лучей в одну линию при положениях переключателей АС-GND-DC в позиции GND.)

Измерить фазовый сдвиг с помощью двухканального осциллографа можно двумя способами. Простое применение любого из них возможно при пренебрежении влиянием входных цепей осциллографа на исследуемую цепь. Для предлагаемых объектов (кроме третьего) до частоты 10 кГц это допустимо.

Первый способ основан на сравнении изображений самих сигналов.

Фазовый сдвиг (в градусах) определяется отношением:

$$\phi = 360\tau / T, \quad (9.3)$$

где  $\tau = k_p L_\tau$  – значение временного запаздывания напряжения  $U_2$  по отношению к  $U_1$ ;  $T = k_p L_T$  – значение периода;  $k_p$  – установленный коэффициент развёртки;  $L_\tau$ ,  $L_T$  – размеры изображения временного запаздывания и периода, в делениях. Относительная погрешность результата измерений фазового сдвига  $\delta_\phi = \delta_\tau + \delta_T$ ,

где  $\delta_\tau$ ,  $\delta_T$  – относительные погрешности измерения  $\tau$  и  $T$ , вычисляемые по формуле (9.2); предельное значение абсолютной погрешности  $\Delta\varphi = \varphi\delta_\varphi/100$ .

Результат измерения записывают в виде  $\varphi_x = \varphi \pm \Delta\varphi$ .

Второй способ измерения фазового сдвига основан на применении фигуры Лиссажу. В этом случае надо установить переключатель коэффициента развёртки TIME/DIV в положение X–Y. Выбором значений коэффициентов отклонений и регулировкой уровня выходного сигнала генератора получить изображение сходное с рис. 9.2, б.

Фазовый сдвиг определяется выражением

$$\varphi = \arcsin(B/A), \quad (9.4)$$

где А – максимальный размер эллипса по оси ординат, В – расстояние между пересечениями эллипса с осью ординат, в дел. (Если эллипс на экране подобен зеркальному отражению эллипса, изображённого на рис. 9.2, б, то к расчётному значению фазового сдвига надо прибавить угол  $90^\circ$ , предварительно убедившись, что режим инверсии сигнала по каналу CH2 не включён, кнопка INV отжата.)

Погрешность определения фазового сдвига определяется погрешностями считывания размеров отрезков А и В. Примем абсолютную погрешность определения этих размеров равной толщине  $b$  луча,  $\Delta A = \Delta B = b$ .

Диапазон, в котором находится истинное значение  $\varphi$ , ограничен нижней  $\varphi_h$  и верхней  $\varphi_v$  границами:

$$\varphi_h = \varphi - \Delta\varphi_1 = \arcsin \frac{B - \Delta B}{A + \Delta A}, \quad \varphi_v = \varphi + \Delta\varphi_2 = \arcsin \frac{B + \Delta B}{A - \Delta A}, \quad (9.5)$$

где  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$  – погрешности определения фазового сдвига, в общем случае неравные из-за нелинейности функции  $\arcsin(x)$ . Из (9.5) следует:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi - \varphi_h, \quad \Delta\varphi_2 = \varphi_v - \varphi.$$

Тогда результат измерений записывают в виде:

$$\varphi_x = \varphi_{-\Delta\varphi_1}^{+\Delta\varphi_2}.$$

При малых погрешностях можно считать  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \max[\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2]$ ; при отношении  $\frac{B + \Delta B}{A - \Delta A} > 1$  допустимо принять  $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1$ .

Следует обратить внимание, что фигуры Лиссажу чувствительны к форме сигнала: если эллипс или прямая линия (вариант эллипса) плохо узнаваемы, то это говорит о сильном отличии формы сигнала генератора от синусоидальной.

## Лабораторная работа 10.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Цель работы* – изучение характеристик термочувствительных приборов (терморезисторов и термисторов), схем их включения и вторичных приборов отображения результатов измерений температуры.

## **Задание**

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки, записать технические данные измерительных приборов и термопреобразователей.
2. Измерить изменение температуры в термоблоке в диапазоне 0...50°C шагом 5 °C по показаниям логометра, в цепь которого включен медный терморезистор T1 ( $R_{t1}$ ).
3. Построить реальные основные статические (градуировочные) характеристики (ГР)  $R = f(t)$  преобразователей: алмазного T2 ( $R_{t2}$ ) и полупроводниковых T3 ( $R_{t3}$ ) и T5 ( $R_{t5}$ ). Определить абсолютные погрешности измерения температуры полупроводниковыми термисторами.
4. Определить абсолютные погрешности измерения температуры комплектом «медный терморезистор T1 ( $R_{t1}$ ) и логометр» в сравнении с номинальной характеристикой T5 ( $R_{t5}$ ).
5. По значениям ГР преобразования терморезисторов определить их чувствительность для ряда точек диапазона измерения температуры. Сделать выводы по результатам определения чувствительности.

## **Описание и порядок выполнения работы**

Наиболее распространёнными и освоенными промышленностью в области низких и средних температур являются контактные параметрические методы измерения, использующие терморезисторы и термопары. В этих приборах выходной величиной, определяющей измеряемую температуру среды, являются: электрический ток, сопротивление или ЭДС.

Принцип действия параметрических термометров основан на зависимости электрического сопротивления проводника от температуры окружающей среды. В диапазоне положительных температур  $T$  такая зависимость имеет вид

$$R_T = R_0(1+AT+BT^2). \quad (10.1)$$

Изготавливают терморезисторы из платины и её сплавов или из меди: платиновые терморезисторы применяют для измерения температур до 1000°C, медные – до 200 °C, причём для меди зависимость (10.1) ограничивается двумя членами.

Кроме металлов и сплавов используются и полупроводниковые материалы. Приборы из полупроводников, именуемые термисторами, отличаются большой чувствительностью (на порядок выше, чем у металлов), но одновременно обладают плохой воспроизводимостью и нелинейной характеристикой

$$R_T = R_0 \exp[\alpha(T - T_0)].$$

Эта характеристика может быть разбита на несколько участков, для каждого из которых устанавливается свой температурный коэффициент  $\alpha_i$ . Границы участков являются точками перегиба характеристики и задаются в виде градуировочных точек (начального  $R_0$  и конечного  $R_k$  значений сопротивления прибора).

**Чувствительность преобразователя** определяется следующим образом:

$$S = \Delta R / \Delta T \text{ (Ом/ } ^\circ\text{C}),$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta R$  – изменение температуры и соответствующее ему изменение сопротивления терморезистора. В данной работе при экспериментальном определении чувствительности можно принять  $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ .

При линейной ГР во всем диапазоне температур чувствительность  $S$  постоянна, при нелинейной – является переменной величиной. Чем больше величина  $S$ , тем меньшие изменения температуры можно обнаружить при измерении.

Термисторы имеют выраженно нелинейную ГР, но их чувствительность гораздо выше, чем у медных или платиновых терморезисторов.

Для измерения температуры такими преобразователями используются любые электрические цепи, предназначенные для измерения сопротивлений. Наибольшее распространение получили автоматические уравновешивающие мосты и неравновесные мосты с логометрами.

В данной лабораторной работе исследуются характеристики двух терморезисторов: медного Т1 ( $Rt1$ ) и алмазного Т2 ( $Rt2$ ), а также двух полупроводниковых термисторов Т3 ( $Rt3$ ) и Т5 ( $Rt5$ ).

Медный терморезистор Т1 ( $Rt1$ ) включён по трёхпроводной схеме в неравновесный мост с логометром. Такая схема включения позволяет практически исключить из результата измерения погрешность, обусловленную изменением сопротивления подводящих проводов под влиянием внешней среды.

**Оборудование, используемое при выполнении работы.** Схема лабораторного стенда приведена на рис. 10.1:

- Лабораторный стенд в составе:

$PV2$  – неравновесный мост с логометром типа Щ69000;

$PV1$  – вольтметр М265;

ИВ1 – лабораторная установка, состоящая из встроенного в стенд термоблока с контрольным и исследуемыми термометрами и автономного пульта управления нагревом;

$PV3$  – универсальный цифровой прибор В7-16;

$SB1$  – переключатель каналов измерения.

- Исследуемые термометры:

Т1 ( $Rt1$ ) – терморезистор медный ТМ293-01;

Т2 ( $Rt2$ ) – терморезистор алмазный ТРА-1;

Т3 ( $Rt3$ ) – термистор полупроводниковый ТЭ255;

Т5 ( $Rt5$ ) – термометр полупроводниковый ТЭ233;

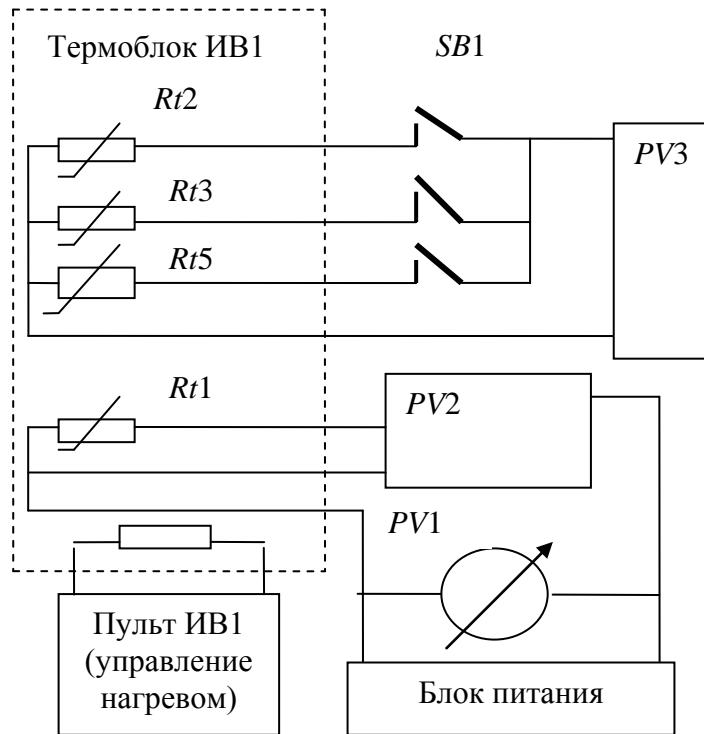


Рис. 10.1

- ГР термистора ТЭ 233 ( $Rt5$ ):

- температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_i$ :

при  $t = 10 \dots 20^\circ\text{C}$   $\alpha = 3,920 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,  
 при  $t = 20 \dots 30^\circ\text{C}$   $\alpha = 3,824 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,  
 при  $t = 30 \dots 40^\circ\text{C}$   $\alpha = 3,229 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;

- градуировочные точки:

температура $t_{\text{тр}}$ , $^\circ\text{C}$	сопротивление $R_{\text{тр}}$ , Ом
10,01	758,0,
20,11	510,0,
29,89	351,0,
40,03	253,0,
49,60	195,0.

- ГР термистора ТЭ255 ( $Rt3$ ):

температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,00148 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  
 сопротивление при  $0^\circ\text{C}$   $R_0 = 614,47 \text{ Ом}$ .

- ГР терморезистора ТРА-1 ( $Rt2$ ) неизвестна подлежит исследованию.

- ГР терморезистора ТМ293 ( $Rt1$ ):

температурный коэффициент сопротивления  $A = 0,004112 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  
 сопротивление при  $0^\circ\text{C}$   $R_0 = 49,99 \text{ Ом}$ .

**Методика выполнения эксперимента.** Включить питание стенда от сети 220 В и установить питание логометра равным 4 В. Установить переключатель управления термоблоком в положение «Ручн», а переключатель «Режимы» в положение «Охлаждение» и контролировать изменение температуры в термоизолированной камере по показаниям логометра. При достижении температуры  $t < 0^\circ\text{C}$  установить переключатель «Режимы» в

положение «Откл» и записать показания логометра и прибора В7-16 (в режиме измерения сопротивлений), поочерёдно подключая к нему терморезисторы T2 ( $R_{t2}$ ), T3 ( $R_{t3}$ ) и T5 ( $R_{t5}$ ) с помощью 3-клавишного переключателя на стенде.

Установить переключатель «Режимы» в положение «Нагрев» и, контролируя изменение температуры в термоизолированной камере по показаниям логометра, производить регистрацию показаний прибора В7-16 в точках: 0; +5; +10; +15; +20; +25; +30; +35; +40; +45; +50 °C.

Результаты измерений свести в таблицу.

Контрол. точки, °C	T1( $R_{t1}$ )	T2( $R_{t2}$ )	T3( $R_{t3}$ )			T5( $R_{t5}$ )		
	$t_{изм}$ , °C	$R_{изм}$ , Ом	$R_{изм}$ , Ом	$t_{расч}$ , °C	$\Delta$ , Ом	$R_{изм}$ , Ом	$t_{расч}$ , °C	$\Delta$ , °C
0								
....								
50								
....								
0								

Повторить измерения при охлаждении термоблока – переключатель «Режим» перевести в положение «Охлаждение».

При вычислении абсолютных погрешностей измерения температуры термометрами Т3 и Т5 использовать в качестве действительных значений температуры показания логометра, а расчётные значения получать с помощью функции связи «температура – сопротивление»:  $t = t_0 + \ln(R_{изм}/R_0) / \alpha$ , где  $t_0$  и  $R_0$  соответствуют нижним точкам перегиба температурной характеристики (градуировочным точкам температурной характеристики). По окончании измерений перевести переключатель «Режим» в положение «Откл».

## Лабораторная работа 11

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ЗАМКНУТОЙ ПНЕВМОСИСТЕМЕ

*Цель работы*—изучение приборов для измерения избыточного давления в замкнутой пневмосистеме.

#### Задание

1. Ознакомиться с устройством лабораторной установки и цифрового вольтметра. Записать технические данные приборов.
2. Измерить с помощью вольтметра выходные сигналы образцового и рабочего датчиков давления, соответствующие избыточному давлению в замкнутой пневмосистеме в диапазоне 0,05...0,25 МПа.
3. Вычислить чувствительность датчиков (В/МПа) и построить нагрузочные характеристики.
4. Определить погрешности измерений давления испытуемым датчиком.

5. Оценить гистерезис характеристик датчиков давления.

### **Описание и порядок выполнения работы**

В работе исследуются характеристики деформационных манометров, основу которых составляют первый преобразователь давления в перемещение (мембрана) и преобразователь перемещения в электрический сигнал.

Основу конструкции испытуемых датчиков давления составляет кремниевая пластина, на которой формируются диффузией два полупроводниковых тензорезистора. Под одним из тензорезисторов травится выемка до образования чувствительной мембранны. Оба тензорезистора соединены последовательно: один воспринимает деформации мембранны, второй служит для термокомпенсации. Кремниевая пластина разделяет внутреннюю полость датчика на две части.

Контролируемое давление подаётся к датчику с верхней стороны мембранны, а нижняя часть полости датчика соединена с окружающей средой и находится под барометрическим (атмосферным) давлением. Под действием разности давлений мембрана изгибается и на тензорезистор действует деформирующее (сжимающее или растягивающее) усилие, вызывая изменение сопротивления резистора пропорционально разностному (избыточному) давлению.

На цепочку тензорезисторов подается постоянное напряжение от стабилизированного источника, а падение напряжения на измерительном тензорезисторе фиксируется вольтметром.

**Оборудование, используемое при выполнении работы.** Схема установки ИВ2 представлена на рис. 11.1:

- Лабораторный стенд в составе:
  - установка лабораторная ИВ2,
  - универсальный цифровой прибор GDM-8135 (мультиметр).

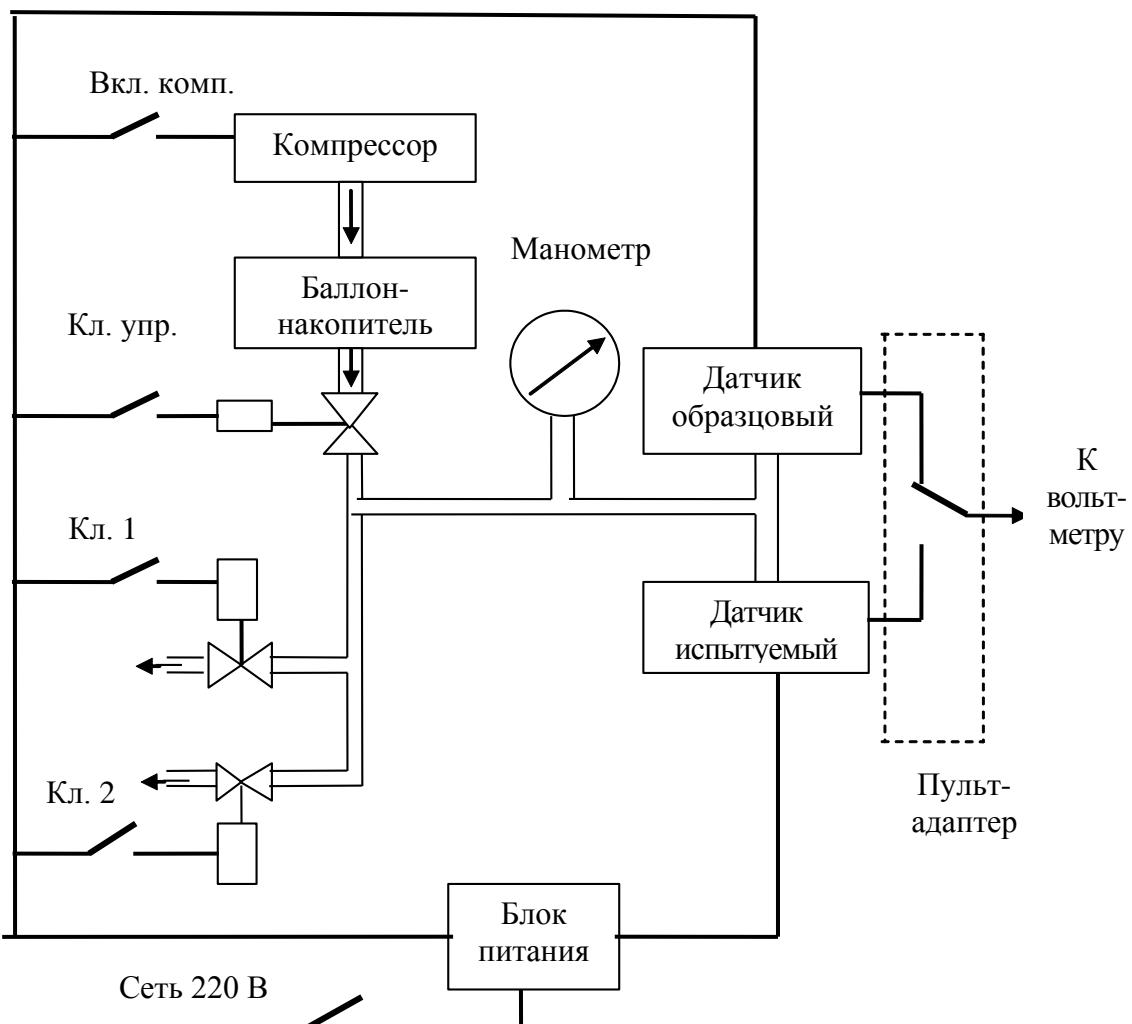


Рис. 11.1

- Исследуемые датчики давления:

изготовитель – фирма MOTOROLA,  
номинальный диапазон измерений 0,01...0,50, МПа.

- Основная погрешность:

образового MPX42500P/KO525AL – не более 0,5 %;  
испытуемого MPX425001/KO525AK – не более 2,0 %.

- Контрольный стрелочный манометр, модель 11202, класс точности 0,4.

- Назначение клапанов:

Клапан управления – включение подачи давления к датчикам;  
Клапан 1 – быстрый (аварийный) сброс давления;  
Клапан 2 – медленный сброс давления.

**Методика выполнения эксперимента:**

1. Предварительно установить переключатель режимов в положение «Ручн» и включить питание установки ИВ2 от сети ~220 В. Включить переключатели «Компрессор» и «Клапан управления» и контролировать нагнетание давления в пневмосистеме установки по

контрольному стрелочному манометру. При достижении давления в системе 0,255...0,260 МПа (*не более!*) выключить компрессор.

**ВНИМАНИЕ!** Нагнетание давления выше 0,27 МПа *ОПАСНО*.

2. Кратковременно включая переключатель «Клапан 2», медленно сбрасывать давление и, останавливая стрелку манометра на значениях 0,25...0,05 МПа (с шагом 0,01 МПа), регистрировать с помощью вольтметра выходные сигналы датчиков давления, подключая поочередно вольтметр к образцовому и испытуемому датчикам с помощью переключателя на пульте-адапторе. По окончании измерений включить «Клапан 1» и полностью сбросить давление в пневмосистеме. *Выключить питание установки ИВ 2.*

3. Вычислить чувствительность датчиков давления (В/МПа)

$$S_{dd} = (U_{0,16} - U_{0,14}) / 0,02,$$

где  $U_{0,16}$ ,  $U_{0,14}$ — показания вольтметра в контрольных точках 0,16 и 0,14 МПа.

4. Построить нагрузочные характеристики обоих датчиков давления  $P_{\text{расч}} = f(P_k)$ , где  $P_{\text{расч}} = U_{dd} / S_{dd}$ — расчетное значение давления по показанию датчика,  $P_k$ — точки измерения давления по контролльному манометру.

5. Вычислить относительные погрешности измерений давления испытуемым датчиком, используя в качестве действительных значений давления расчетные значения показаний образцового датчика:  $\gamma = 100 (P_o - P_i) / 0,25 \%$ .

#### Результаты измерений и вычислений свести в таблицу.

Контрольные точки по манометру $P_k$ , МПа	ДД образцовый $P_o$ , МПа	ДД испытуемый $P_i$ , МПа	Погрешность измерения, %
0,25			
0,24			
.....			
0,05			

Сравнить полученные результаты с паспортными данными датчиков.

6. Оценку гистерезиса характеристик датчиков произвести в трёх точках шкалы:  $X=0,06$ ; 0,12; 0,18 МПа. Для подхода к каждой из заданных точек «снизу» следует нагнетать давление компрессором до попадания в интервал ( $X-0,01$ ) МПа. Записать показания датчиков  $U_{\text{нап}}$  (по вольтметру).

Результаты измерений и вычислений свести в таблицу.

Контр. точки, МПа	Фактические показания манометра, МПа	ДД образцовый $U_o$ , В		ДД испытуемый $U_i$ , В	
		Показания	Гистерез., %	Показания	Гистерез., %
0,06	Нарастание				
	Спад				
0,12	Нарастание				
	Спад				
0,18	Нарастание				
	Спад				

Поднять давление в пневмосистеме на 0,01 МПа выше контролируемой точки, затем, кратковременно включая клапан 2, снизить давление до ранее достигнутого значения и записать показания датчиков  $U_{\text{спад}}$  (по вольтметру).

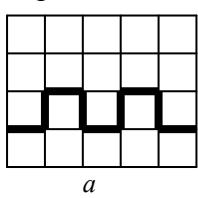
Вычислить  $b = 100 (U_{\text{спад}} - U_{\text{нап}}) / U_{0,25}$ , %.

Провести анализ полученных результатов.

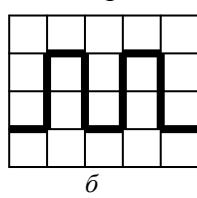
## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое из указанных средств измерений является измерительным прибором?
  - а) Измерительный усилитель;
  - б) электронный осциллограф;
  - в) аналого-цифровой преобразователь (АЦП).
2. Класс точности прибора это:
  - а) обобщенная метрологическая характеристика, определяющая основные и дополнительные погрешности средства измерений;
  - б) обобщенный показатель средства измерений, определяющий его метрологические и не метрологические характеристики;
  - в) обобщенная метрологическая характеристика результата измерений.
3. Какой из трех приборов, имеющих одинаковые пределы измерений, но разные классы точности, позволяет с большей точностью получить результат измерений?
  - а) Прибор с классом точности 1,0;
  - б) прибор с классом точности 0,5;
  - в) прибор с классом точности 0,5/0,2.
4. Каким из указанных соотношений определяется статическая характеристика преобразования  $F(\dots)$  средства измерений (СИ), если  $x$  – входной сигнал (измеряемая величина),  $y$  – выходной сигнал (показания измерительного прибора)?
  - а)  $F(y) = x$ ;
  - б)  $F(x) = y$ ;
  - в)  $F(x) = dy/dx$ ;
  - г)  $F(y) = dx/dy$ .
5. Каким из трех вольтметров, имеющих одинаковые классы точности, но разные пределы измерений, можно с меньшей погрешностью измерить напряжение 1 В?
  - а) Вольтметром с пределом измерений – 1 В;
  - б) вольтметром с пределом измерений – 10 В;
  - в) вольтметром с пределом измерений – 100 В.
6. Какой из перечисленных вольтметров может иметь наиболее высокую точность измерений?
  - а) Цифровой вольтметр;
  - б) электронный аналоговый вольтметр;
  - в) магнитоэлектрический вольтметр.
7. Какой из перечисленных вольтметров может иметь наиболее высокую чувствительность измерений?
  - а) Электродинамический вольтметр;
  - б) электростатический вольтметр;
  - в) магнитоэлектрический вольтметр.
8. Время установления (время реакции) аналогового средства измерений непосредственно определяется:
  - а) по импульсной переходной характеристике;
  - б) по переходной характеристике;
  - в) по амплитудно-частотной характеристике.
9. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) средства измерений является:

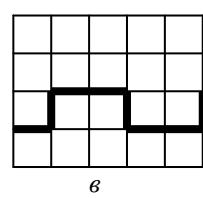
- а) статической характеристикой СИ;  
 б) полной динамической характеристикой СИ;  
 в) частной динамической характеристикой СИ.
10. С какой целью проводят многократные измерения?
- а) Для уменьшения систематической погрешности результата измерений;  
 б) для уменьшения случайной погрешности результата измерений;  
 в) для уменьшения методической погрешности результата измерений.
11. С какой абсолютной погрешностью измерено напряжение  $U = 50$  В, если для его измерения использовался вольтметр с пределом измерений 150 В и классом точности 1.0?
- а)  $\Delta U_x = 0,5$  В;    б)  $\Delta U_x = 1,0$  В;    в)  $\Delta U_x = 1,5$  В.
12. Каким способом можно воспользоваться для измерения нелинейных сопротивлений?
- а) Способом амперметра и вольтметра, косвенно определяя сопротивление по показаниям приборов;  
 б) измерением нелинейных сопротивлений измерительным мостом;  
 в) непосредственным измерением нелинейных сопротивлений магнитоэлектрическим омметром.
13. Электронные вольтметры переменного тока градуируются:
- а) в амплитудных значениях синусоидального напряжения;  
 б) в средневыпрямленных значениях синусоидального напряжения;  
 в) в действующих значениях синусоидального напряжения.
14. Коэффициенты отклонения, указанные на передней панели осциллографа, имеют размерность:
- а) дел/В, дел/мВ, дел/мкВ, где дел. – деления сетки на экране осциллографа, например:  
     2 дел/В, 5 дел/мВ, 1 дел/мкВ;  
 б) В/дел, мВ/дел, мкВ/дел, например: 2 В/дел, 5 мВ/дел, 1 мкВ/дел;  
 в) с/дел, мс/дел, мкс/дел, например: 2 с/дел, 5 мс/дел, 1 мкс/дел.
15. Калибраторы электронно-лучевого осциллографа предназначены:
- а) для проверки соответствия коэффициентов отклонения и развертки их номинальным значениям;  
 б) для оценки погрешностей коэффициентов отклонения и развертки;  
 в) для установления изображения сигнала (осциллограммы) заданного размера.
16. Какая из представленных осциллограмм правильная, если на вход осциллографа поданы однополярные прямоугольные импульсы с амплитудой 1 В и частотой 100 Гц? Установленные коэффициенты отклонений и развертки равны  $k_o = 1$  В/дел,  $k_p = 5$  мс/дел.
17. На входы вертикального «Y» и горизонтального «X» отклонений осциллографа



*a*

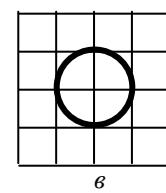
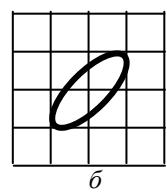
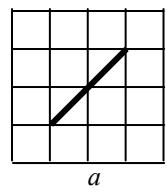


*б*



*в*

(генератор развертки выключен) подается одно и то же синусоидальное напряжение  $u(t) = U_m \sin \omega t$ . Какое изображение будет на экране осциллографа?



## **Список литературы**

1. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб.для студ. высш. учеб. заведений / Б. Я. Авдеев, В. В. Алексеев, Е. М. Антонюк и др.; Под ред. В. В. Алексеева. – М.: Изд. центр «Академия», 2007.

## **Содержание**

Введение.....	3
Лабораторная работа 1.Исследование основных метрологических характеристик электромеханических измерительных приборов .....	7
Лабораторная работа 2.Электронные аналоговые вольтметры .....	10
Лабораторная работа 3. Цифровые измерительные приборы.....	15
Лабораторная работа 4. Электронно-лучевой осциллограф .....	19
Лабораторная работа 5. Обработка результатов прямых и косвенных измерений .....	24
Лабораторная работа 6. Динамический режим средств измерений .....	29
Лабораторная работа 7. Измерение параметров сигналов в электронных схемах.....	35
Лабораторная работа 8. Измерение параметров электрических цепей.....	40
Лабораторная работа 9. Измерение частоты, периода и фазы.....	42
Лабораторная работа 10. Измерение температуры с помощью термочувствительных преобразователей .....	45
Лабораторная работа 11. Измерение давления в замкнутойпневмосистеме.....	49
Контрольные вопросы .....	54
Список литературы .....	57

Редактор Н. В. Лукина

---

Подписано в печать 30.12.08. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,0.

Гарнитура «TimesNewRoman». Тираж 1200 экз. Заказ .

---

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5