

**ИССЫК-КУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. К. ТЫНЫСТАНОВА**

Клименко О.И., Орозбек уулу Аскар

МЕТРОЛОГИЯ И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Каракол, 2011

УДК 006
ББК 30.10
М 54

Методическое пособие рекомендовано к изданию решением Учебно-методического объединения (протокол № 7 от 26.03.2010г.) и Ученого Совета (протокол № 11 от 25.06.2010г.) ИГУ им. К.Тыныстанова

Рецензент: кандидат техн. наук, профессор Кадыркулов С.С.

Составители: канд. физ.-мат. наук Клименко О.И.,
канд. физ.-мат. наук Орозбек уулу Аскар

М 54 Метрология и радиоизмерения: Метод. указания по выполнению лабораторных работ /О.И.Клименко, Орозбек уулу А. – Каракол: ИГУ, 2011. – 80 с.

ISBN 978-9967-441-25-5

В лабораторных работах изучаются принцип работы и применение основных приборов используемых для измерений параметров основных элементов радиотехнических устройств. Даются методики измерения параметров электрических сигналов разной формы. Изучаются методы измерения фазового сдвига двух гармонических сигналов с помощью осциллографа и фазометра. Исследуются методы измерения частоты и периода сигналов, в том числе с использованием цифрового частотомера. Изучаются принципы действия вольтметров различных типов, их погрешности, особенности измерения параметров электрических сигналов различной формы.

Цель настоящих лабораторных работ – ознакомление студентов с методами и приборами для измерений параметров основных пассивных элементов радиотехнических устройств: резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности.

Лабораторные работы предназначены для студентов специальности 552501.03 Бытовая радиоэлектронная аппаратура.

М 2004010000-10

ISBN 978-9967-441-25-5

УДК 006
ББК 30.10

© составители Клименко О.,
Орозбек у. А., 2011.

@: ИГУ им. К.Тыныстанова, 2011.

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 цепи по функциональному назначению (например, параллельные и последовательные цепи) и собирать их отдельно. Провода, соединяющие схему с источником питания, следует подключать к источнику последними. Перед включением схемы необходимо все ручки регулировочных устройств (реостатов, автотрансформаторов) 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.

По окончании работы схемы должны быть разобраны, провода собраны в специальные папки, а используемые средства аккуратно расставлены на столе.

Запись результатов измерений и оценка инструментальных погрешностей.

Результаты измерений должны быть представлены в виде

$$X_{\text{н}} = x \pm \Delta x,$$

где $x_{\text{н}}$ - 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. д.; Δx - абсолютная погрешность измерений.

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

Инструментальная составляющая погрешности измерений определяется классом точности средства измерений (СИ). 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.

Для средств измерений, у которых погрешность нормируют в виде предела приведенной погрешности, класс точности численно равен этому пределу. При этом максимальная абсолютная и относительная погрешности средства измерений, для которых нормируются пределы допускаемых приведенных погрешностей, оцениваются по формулам соответственно:

$$\Delta x = \frac{Kx_N}{100}; \quad (1)$$

$$\delta = \frac{Kx_N}{x},$$

где K - показатель класса точности прибора; x_N - нормирующее значение, которое принимается равным:

а) верхнему пределу измерений, если нижний предел равен нулю либо нуль находится вне диапазона измерений;

б) сумме модулей пределов измерений, если нуль находится внутри диапазона измерений.

У некоторых приборов пределы показаний могут быть $(\infty, 0)$ или $(0, \infty)$, например у магнитоэлектрических омметров. В этом случае за нормирующее значение принимается длина шкалы l_N , выраженная, в частности, в делениях равномерной шкалы. Класс точности при этом имеет особое обозначение, например $2,5$.

Для таких приборов сначала определяют максимальную абсолютную погрешность, выраженную в единицах длины шкалы:

$$\Delta l = \frac{Kl_N}{100}$$

а затем - максимальную погрешность в единицах измеряемой величины путем механического (визуального) переноса Δl на шкалу измерений прибора, при этом погрешности с разными знаками могут отличаться из-за нелинейного характера шкалы.

Для ряда СИ класс точности записывается в виде двух чисел через косую черту - c/d , например $0,05/0,02$. В этом случае предельная относительная погрешность в процентах оценивается по формуле

$$\delta = \left[c + d \left(\frac{x_K}{x} - 1 \right) \right]$$

где x_K - верхний предел измерений; x - показание прибора. Тогда предельная абсолютная погрешность

$$\Delta x = \frac{\delta x}{100}$$

Для некоторых СИ заводы-изготовители используют несколько иные формулы, что отражается в нормативно-технической документации.

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 $\delta = 0,12$ % округления до $\delta = 0,1$

% производить не следует, так как погрешность округления в этом случае будет 20 %.

При окончательной записи результата измерения в соответствии с (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 спецификацию применяемых при эксперименте средств измерений необходимо представить в виде таблицы, по приведенному образцу.

При составлении спецификации следует придерживаться следующих правил:

1) спецификация составляется для всех СИ, используемых в лабораторной работе;

2) если прибор комбинированный, предназначенный для измерения нескольких физических величин (например, мультиметр), то спецификация проводится для используемого в эксперименте режима работы этого прибора:

3) если прибор многопредельный, то при 3-5 верхних пределах измерений записываются все пределы, при большем числе пределов записываются наименьший и наибольший пределы и указывается общее число пределов; при необходимости, в частности, когда нижний предел измерений отличается от нуля, записываются нижний и верхний пределы (например, $-50^{\circ}\text{C} \dots + 50^{\circ}\text{C}$),

4) обязательно указываются размерности записываемых числовых характеристик.

Требования к отчету. Отчет по лабораторной работе 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 (можно на миллиметровой бумаге, но при этом они должны быть вклеены в соответствующее место отчета). При построении графиков делительные штрихи на осях следует размещать друг от друга на расстоянии, 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 крестиком или точкой. Все графики должны иметь наименование и пояснительный текст.

Образец спецификации применяемых СИ

Наименование средства измерений, тип, заводской номер	Диапазоны измерений, постоянные приборов, значения устанавливаемых величин	Характеристики точности СИ, классы точности	Входной (выходной) импеданс (сопротивление, емкость), номинальный ток, номинальное падение напряжения	Рабочий диапазон частот, временные постоянные
Вольтметр магнитоэлектрический М-105	0,15; 0,3; 0,75; 1,5; 3 В	0,5	3 мА	
Прибор комбинированный Ц4324	х 1...5 кОм х 10...50 кОм х 100...500кОм хЮ00...5МОм 0,6...600 В	2,5 V 2,5	20 кОм/В	
Осциллограф электронный С1-83	1 мВ/дел ... 20 В/дел, всего 10 значений $K_{от}$	5%	$R_{вх} > 1 \text{ МОм}$ $C_{вх} < 20 \text{ пФ}$	0...10 МГц 5 с/дел ... 0,1 мкс/дел всего 44 значения K_p
Магазин сопротивлений РЗЗ	0,1...99999,9 Ом	0,2/6-10 ⁶		
Генератор сигналов ГЗ-33	20 Гц...200 кГц	3% для /; 4 % для V	50... 600 Ом	—

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.

Цель работы – ознакомление с методикой поверки электромеханических приборов и определение некоторых метрологических характеристик.

Задание

1. Произвести поверку вольтметра:

а) определить основную погрешность и вариацию показаний испытуемого вольтметра методом сличения с показаниями образцового вольтметра на постоянном и переменном токах для 5-10 числовых отметок шкалы по указанию преподавателя;

б) определить дополнительную погрешность вольтметра для одной (двух) числовой отметки шкалы при отклонении частоты измеряемого напряжения от номинального значения.

2. Произвести поверку миллиамперметра.

Определить основную погрешность и вариацию показаний миллиамперметра косвенным методом с помощью потенциометра постоянного тока.

3. Построить графики зависимости относительной и приведенной погрешностей поверяемого прибора от его показаний.

4. Сделать вывод о соответствии основной погрешности требованиям, определяемым классом точности поверяемого прибора.

Описание и порядок выполнения работы

Поверкой средств измерений называют определение погрешностей средства и установление его пригодности к применению. В основе поверки методом сличения лежит одновременное измерение одной и той же величины поверяемым прибором и образцовым средством измерений. Отношение пределов допускаемых абсолютных основных погрешностей образцовых средств измерений и поверяемых приборов для каждой поверяемой отметки шкалы должно быть не более 1:5 при поверке приборов всех классов точности.

Перед началом поверки необходимо:

а) установить прибор в нормальное для него положение в соответствии с условным обозначением на шкале прибора;

б) с помощью корректоров установить указатели приборов на начальную отметку шкалы.

Для поверки вольтметра путем сличения собрать и включить цепь (рис. 1), где PV_1 и PV_2 - соответственно, поверяемый и образцовый вольтметры; R_1 и R_2 - регулировочные переменные резисторы.

Для проверки миллиамперметра косвенным методом собрать и включить цепь (рис. 2), где PA - поверяемый миллиамперметр; R_3 -

образцовая измерительная катушка сопротивления; ППТ - потенциометр постоянного тока; НЭ – нормальный элемент; ВБ - вспомогательная батарея; Г - гальванометр.

При определении основной погрешности указатель поверяемого прибора последовательно устанавливают на поверяемые отметки шкалы 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 измеряемой величины.

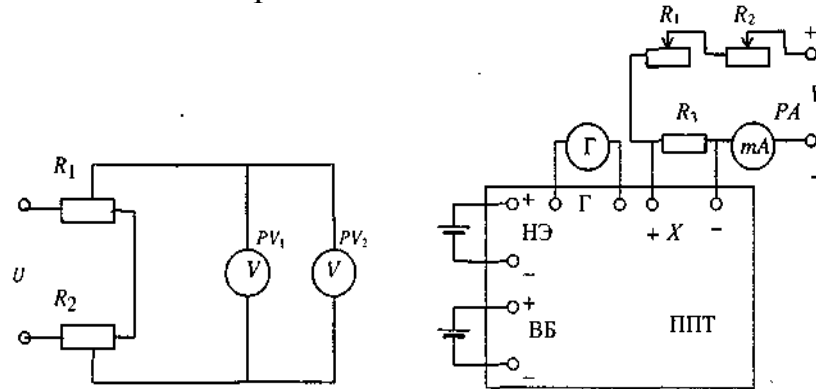


Рисунок 1.

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 подводе указателя сначала со стороны меньших, а затем со стороны больших значений. Вариация может определяться также в процентах от нормирующего значения измеряемой величины.

Результаты поверки и расчетов заносят в таблицу 1.

Абсолютную погрешность при увеличении и уменьшении показания определяют по формулам

$$\Delta x_{ув} = x - x_{о.ув}; \Delta x_{ум} = x - x_{о.ум},$$

где x – показание поверяемого прибора; $x_{о.ув}$ - показание образцового средства измерений при увеличении показаний; $x_{о.ум}$ - 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.

Таблица 1

Показания поверяемого прибора X	Показания образцового средства измерения*		Погрешность				
			Абсолютная*		Относительная	Приведенная	Вариация
			при увеличении $X_{0.ув}$	при уменьшении $X_{0.ум}$			

Примечание. Значения в графах, отмеченных *, определяются в единицах измеряемой величины.

Относительную и приведенную погрешности определяют для всех поверяемых отметок шкалы, выбирая наибольшее по модулю значение абсолютной погрешности. Во всех случаях знак погрешности зависит от соотношения x и x_0 .

Вариацию показаний (в процентах) определяют по формуле

$$v = 100 \left(\frac{|x_{0.ув} - x_{0.ум}|}{x_N} \right)$$

Поверку вольтметра на переменном токе производят при номинальном значении частоты с помощью схемы (рис. 1). Источником напряжения U служит генератор синусоидальных сигналов. Если для прибора указана номинальная область частот, то его поверяют при двух частотах $f_1 = \sqrt{f_H f_K}$ и $f_2 = f_H$, где f_H , f_K - соответственно, нижняя (начальная) и верхняя (конечная) границы номинальной области частот. Если диапазон номинальных значений включает частоту 50 Гц, то f_1 , выбирается равной 50 Гц.

Результаты поверки и расчетов заносят в таблицу, форма которой указана ранее. Расчеты погрешностей проводятся по приведенным формулам.

Определение дополнительной погрешности вольтметра от изменения частоты измеряемого напряжения на одной (двух) отметке шкалы производится по той же схеме (рис. 1). При этом для номинального значения частоты (в исследуемых в лаборатории приборах номинальное значение частоты равно 50 Гц) можно использовать результаты

предыдущих испытаний. Далее изменяют частоту измеряемого напряжения, устанавливают указатель испытываемого прибора на поверяемую отметку шкалы сперва при увеличении измеряемой величины от нуля, а затем при уменьшении ее от максимального значения, отсчитывая при этом показания образцового прибора $U_{ув f}$ и $U_{ум f}$ соответствующие одному и тому же показанию поверяемого прибора. Дополнительная приведенная погрешность (в процентах) от изменения частоты рассчитывается по формуле

$$\gamma_f = 100(U_f - U)/U_N$$

где $U = (U_{ув} + U_{ум})/2$ — среднеарифметическое значение показаний образцового прибора при номинальной частоте; $U_f = (U_{ув f} + U_{ум f})/2$ — среднеарифметическое значение показаний образцового прибора при частоте, отличной от номинальной; U_N — нормирующее значение напряжения для испытываемого вольтметра.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ

Цель работы - ознакомление с методами обработки результатов наблюдений при прямых и косвенных измерениях; оценка результата измерений и его погрешности.

Задание

1. Измерить несколько раз постоянное напряжение заданного источника, используя прямой метод. Обработать полученные данные и результат измерения напряжения записать в виде

$$U_x = \bar{U} \pm \Delta U_x; P = \dots$$

2. Измерить сопротивление резистора, используя косвенный метод. Произвести многократные измерения аргументов. Получить оценку случайной составляющей погрешности измерения. Результат измерения сопротивления резистора записать в виде

$$R_x = \bar{R}_x \pm \Delta R_x; P = \dots$$

3. Для иллюстрации достоинств многократных измерений каждый эксперимент по указанию преподавателя может быть проведен дважды: при небольшом числе измерений (5-7) и числе измерений порядка 20-25. Число измерений и количество экспериментов задаются преподавателем.

Описание и порядок выполнения работы

Обработка результатов прямых измерений напряжения. Схема для измерения напряжения приведена на рис. 1. Объектом исследования является источник стабилизированного постоянного напряжения ИСН. Для

имитации случайных погрешностей используется генератор шума ГШ. Измерения мгновенных значений напряжения производятся цифровым вольтметром ЦВ. ЭР - элемент развязки генератора шума от цепи измерения.

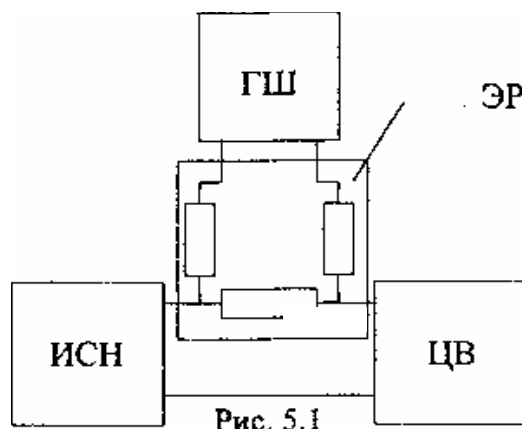


Рисунок. 1. Схема измерения напряжения

Для работы необходимо:

1. Ознакомиться с описанием и правилами пользования цифровым вольтметром и генератором шума.

2. Собрать цепь для измерений согласно схеме (рис. 1).

3. Установить заданные преподавателем уровень и частоту шума на ГШ и напряжение на ИСН.

4. Используя цифровой вольтметр в режиме одиночных измерений, получить значений измеряемого напряжения ИСН.

5. Произвести обработку полученных результатов измерений в следующей последовательности:

а) 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 остаточные погрешности $\rho_i = U_i - \bar{U}$

убедиться, что $\sum_{i=1}^n \rho_i = 0$;

в) найти оценку дисперсии шума

$$S_{\text{ш}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \rho_i^2;$$

г) найти оценку дисперсии погрешности результата измерения

$$S_{\bar{U}}^2 = S_{\text{ш}}^2 / n.$$

Результаты измерений и вычислений свести в таблицу

Номер измерения	$U_i, \text{В}$	$\bar{U}, \text{В}$	$\rho_i, \text{В}$	$S_{\text{ш}}^2, \text{В}$	$S_{\bar{U}}^2, \text{В}$
1					
2					
...					
n					
	$\sum_{i=1}^n U_i =$		$\sum_{i=1}^n \rho_i =$		

д) считая, что случайные погрешности, имитируемые генератором шума, имеют нормальный закон распределения, найти доверительное значение погрешности результата измерения по выражению

$$\Delta U = t_P(f) S_{\bar{U}}$$

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	∞
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 больше 30 можно пользоваться графой ∞ , соответствующей нормальному закону распределения;

е) в соответствии с методическими указаниями результат измерения напряжения записать в виде

$$U = \bar{U} \pm \Delta U; P = \dots$$

Количество значащих цифр погрешности результата измерения ΔU должно быть не более двух. Количество цифр при записи действительного значения измеряемой величины U должно быть таким, чтобы наименьшие разряды U и ΔU были одинаковыми.

Обработка результатов измерений при косвенном измерении сопротивления. Схема для измерения сопротивления резистора R_x представлена на рис. 2, где R_x и R_0 - резисторы, образующие делитель напряжения (R_0 - резистор с известным сопротивлением); SA - переключатель.

Собрав цепь согласно схеме (рис. 2), установить заданные преподавателем уровень шума на ГШ и значение напряжения ИСН. Поставить переключатель SA в положение 1 и получить n_1 значений входного напряжения U , поступающего на делитель от ИСН. Уменьшить уровень шума на ГШ на 20...30 %. Перевести SA в положение 2 и получить n_2 значений выходного напряжения U_0 делителя.

Произвести обработку полученных результатов наблюдений U и U_0 в соответствии с подпунктами 5а-г обработки результатов прямых измерений.

Результаты измерений и вычислений для каждого аргумента свести в таблицу, аналогичную приведенной в подпункте 5 г.

Сопротивление цепи делителя можно найти по закону Ома $R = U/I$, где $I = U_0/R_0$. Значение измеряемого сопротивления R_x связано с измеряемыми величинами функциональной зависимостью вида

$$R_x = R - R_0 = R_0 (U/U_0 - 1)$$

Подставляя в это выражение средние арифметические значения U и U_0 , получим результат измерения R_x .

Общее выражение для оценки дисперсии результата измерения сопротивления имеет вид

$$S_x^2 = \left(\frac{\partial R_x}{\partial U} \right)^2 S_U^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial U_0} \right)^2 S_{U_0}^2 = \left(\frac{\partial R_x}{\partial U} \right)^2 \frac{S_{ш1}^2}{n_1} + \left(\frac{\partial R_x}{\partial U_0} \right)^2 \frac{S_{ш2}^2}{n_2},$$

где $S_{ш1}^2$ и $S_{ш2}^2$ - оценки дисперсии шума при измерении напряжений U и U_0 соответственно; S_U^2 и $S_{U_0}^2$ - оценки дисперсии результатов измерений напряжений U и U_0

Доверительное значение погрешности результата измерения R_x можно найти по выражению $\Delta R_x = t_p(f) S_x$. Если n_1 и n_2 больше или равны 30, то f определяется из графы ∞ приведенной выше таблицы.

Следует иметь в виду, что погрешность ΔR_x будет в этом случае оценена не точно, а приближенно.

Найдя ΔR_x результат измерения сопротивления нужно записать в виде

$$R_x = \bar{R}_x \pm \Delta R_x; P = \dots$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.

Цель работы - ознакомление с методами и средствами измерений параметров электрических цепей и методикой оценки погрешностей результатов измерений.

Задание

1. Определить погрешности комбинированного магнитоэлектрического измерительного прибора (тестера) в режиме омметра в 4 - 6 числовых отметках шкалы (по указанию преподавателя). Сделать вывод о соответствии омметра своему классу точности.

2. Измерить сопротивления двух резисторов (по указанию преподавателя) и оценить погрешности результатов измерений, используя комбинированный прибор (тестер) в режиме омметра, способ амперметра и вольтметра по выбранной схеме включения, универсальный мост.

3. Провести сравнительный анализ результатов, полученных в п. 2.

4. Измерить емкость и тангенс угла потерь указанного преподавателем конденсатора универсальным мостом и оценить погрешности результатов измерений.

5. Измерить индуктивность и добротность указанной преподавателем катушки универсальным мостом и оценить погрешности результатов измерений.

Методические указания:

Проверка комбинированного прибора (тестера) в режиме омметра.

Перед началом работы убедиться, что при отключенном питании указатель прибора стоит на начальной отметке шкалы, и при необходимости установить начальную отметку с помощью корректора. Включить источник питания. Для шкал с диапазоном показаний ($\infty \dots 0$) закоротить входные зажимы тестера и с помощью ручки "Установка 0" установить указатель в положение "0"; для шкал с диапазоном показаний ($0 \dots \infty$) при разомкнутых входных зажимах той же ручкой установить указатель в положение " ∞ ".

Входные зажимы поверяемого омметра подключают к образцовой мере - магазину сопротивлений. Изменяя сопротивление R_0 магазина, устанавливают указатель омметра на выбранные числовые отметки R шкалы прибора. Результаты испытаний и расчетов заносят в таблицу.

Таблица 1.

R, Ом	R_0 , Ом	ΔR , Ом	$\Delta \alpha$, дел	γ , %

В таблице $\Delta R = R - R_0$ - абсолютная погрешность омметра в омах; $\Delta \alpha$ - та же погрешность омметра, но выраженная в делениях равномерной шкалы комбинированного прибора, эквивалентная ΔR .

Необходимость определения погрешности $\Delta\alpha$ обусловлена тем, что в омметрах со шкалами $(0, \infty)$ и $(\infty, 0)$ отсутствует понятие нормирующего значения шкалы, выраженное в омах, и, следовательно, не может быть определена приведенная погрешность по ΔR . Выход из такого положения - оценка абсолютной погрешности в делениях равномерной шкалы и определение отношения этой погрешности к длине шкалы, также выраженной в делениях.

Погрешность $\Delta\alpha$ можно оценить, используя следующий подход.

Комбинированный прибор имеет равномерную шкалу для измерения постоянных токов и напряжений и неравномерную шкалу для измерения сопротивлений. Из-за неравномерности шкалы чувствительность $S(R)$ омметра является величиной переменной, нелинейно зависящей от измеряемого сопротивления R :

$$S(R) = \frac{d\alpha(R)}{dR}$$

При показании омметра, равном R_n , можно определить оценку чувствительности для данной точки шкалы:

$$S^*(R_n) = \left. \frac{\Delta\alpha}{\Delta R} \right|_{R_n}$$

где ΔR - разность между двумя соседними отметками шкалы омметра в окрестности точки R_n , Ом; $\Delta\alpha$ - изменение угла поворота указателя, соответствующее ΔR , выраженное в делениях равномерной шкалы (рис. 1).

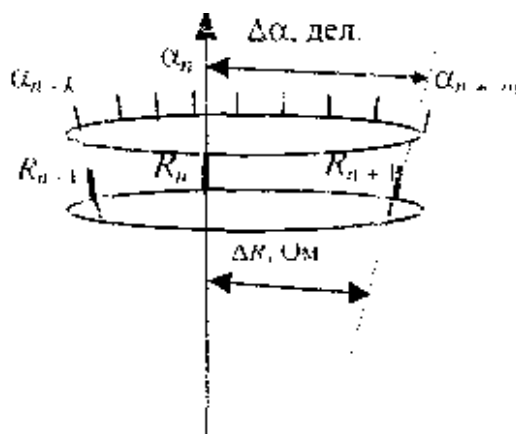


Рисунок 1.

Значение $\Delta\alpha$ можно определить либо визуальным переносом отметок шкалы омметра на равномерную шкалу, либо последовательным изменением входного сопротивления так, чтобы показания поочередно совпадали с выбранными отметками шкалы омметра; при этом по равномерной шкале с помощью указателя определяется соответствующее $\Delta\alpha$.

Полученная оценка чувствительности позволяет найти изменение угла $\Delta\alpha$ поворота указателя, соответствующее погрешности ΔR в каждой конкретной точке R_n шкалы омметра:

$$\Delta\alpha = S^*(R_n)\Delta R$$

Заметим, что значения чувствительности, определяемые по отметкам шкалы слева или справа от R_n , будут отличаться. Для оценки класса точности омметра следует выбрать наибольшую из них, что приведет к определению наибольшего возможного отклонения

$$\Delta\alpha = \max\{\Delta\alpha_{\text{сл}}, \Delta\alpha_{\text{спр}}\},$$

Это значение $\Delta\alpha$ записывается в таблицу.

При таком подходе приведенная погрешность определяется по формуле $\gamma = \Delta\alpha / \alpha_N \cdot 100\%$, где α_N - длина равномерной шкалы, выраженная в делениях.

Омметр соответствует своему классу точности, если приведенные погрешности по модулю во всех точках меньше указанного для прибора класса.

Измерение тестером (омметром) сопротивления постоянному току.

Неизвестное сопротивление подключают к входу омметра. Изменяя положение множителя $\times 1, \dots, \times 1000$, подбирают такое значение, при котором положение указателя будет наиболее близко к середине шкалы. С учетом выбранного множителя снимаются показания R омметра. Результат измерений записывают в виде $R_x = R \pm \Delta R$, где ΔR определяют по классу точности. При этом сначала определяется максимальная погрешность омметра, выраженная в делениях равномерной шкалы: $\Delta\alpha_{\text{max}} = K\alpha_N / 100$, где K - класс точности омметра, а затем либо визуально погрешности $\pm \Delta\alpha_{\text{max}}$ переносятся на шкалу омметра в окрестности показаний прибора и определяются погрешности $\pm \Delta R$, либо по указанной выше методике оценивается погрешность по формуле

$$\Delta R = \Delta\alpha_{\text{max}} / S^*(R),$$

где R - показание омметра.

Измерение сопротивления способом амперметра и вольтметра. Схемы измерения сопротивления с помощью амперметра и вольтметра приведены на рис. 2.

Для схемы на рис. 2, а неизвестное сопротивление определяется по формуле

$$R_x = U/I_x = U/(I - I_V) = U/(I - U/R_V)$$

где U, I - показания вольтметра и амперметра; I_x - ток, протекающий через неизвестное сопротивление; I_V - ток, протекающий через вольтметр;

R_V - сопротивление вольтметра.

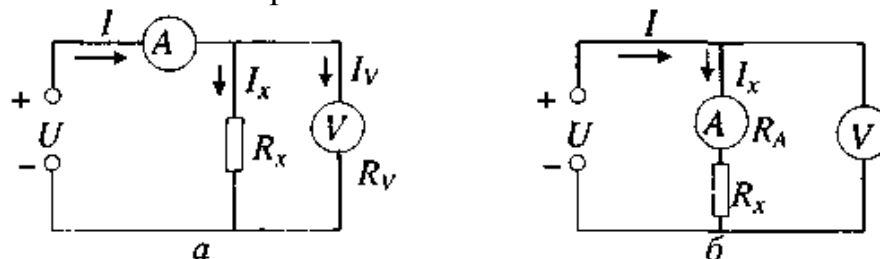


Рисунок 2.

Относительная погрешность измерения R_x вычисляется по формуле

$$\delta R_x = \frac{I}{I - U/R_V} (\delta U + \delta I) = \frac{1}{1 - R_x/(R_V + R_x)} (\delta U + \delta I)$$

где $\delta U, \delta I$ - предельные относительные погрешности измерения напряжения и тока, определяемые классами точности и показаниями приборов.

Для схемы, представленной на рис. 2, б, применяют следующие формулы:

$$R_x = U/I - R_A$$

$$\delta R_x = \frac{U}{U - IR_A} (\delta U + \delta I) = \frac{1}{1 - R_A/(R_A + R_x)} (\delta U + \delta I)$$

где R_A - сопротивление амперметра.

Формулы для δR_x приведены в предположении, что погрешности определения R_A и R_V пренебрежимо малы.

Из приведенных формул видно, что для уменьшения погрешностей измерений схему, представленную на рис. 2, а, следует применять для измерения относительно малых сопротивлений, а схему, представленную на рис. 2, б, - для измерения относительно больших сопротивлений.

Если $R_x < R_V / 10$ для схемы на рис. 2, а или $R_x > 10 R_A$ для схемы на рис. 2, б, то с достаточной для практики точностью (погрешность определения δR_x не превысит 10 %) можно использовать упрощенные соотношения

$$R_x = U/I, \quad \delta R_x = \delta U + \delta I$$

Во всех случаях для уменьшения $\delta U, \delta I$ следует выбирать такие пределы измерений приборов и устанавливать такое напряжение питания, при которых отклонения указателей приборов были бы максимально возможными.

Результаты измерений необходимо записывать в виде

$$R = R_x \pm \Delta R_x$$

где $\Delta R_x = R_x \delta R_x / 100$.

Измерения универсальным мостом. Измерения сопротивления постоянному току, емкости и тангенса угла потерь конденсаторов, индуктивности и добротности катушек проводят в соответствии с прилагаемой инструкцией; в ней же приводятся формулы для оценки погрешностей измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ.

Цель работы – ознакомление с методами и средствами измерения мощности электрического тока, получение навыков работы с измерительными приборами и обработки результатов измерений.

Содержание работы.

1. Измерение мощности постоянного тока косвенным методом при помощи вольтметра и амперметра выполняют по схеме, приведенной на рис. 1. Питание схемы производят от блока питания БП типа В5-9, а в качестве нагрузки используют магазин сопротивлений R_H типа МСР. Измерение мощности выполняют при помощи вольтметра V_1 и амперметра A типа Э59. Напряжение на амперметре измеряют вольтметром V_2 типа В7-16А.

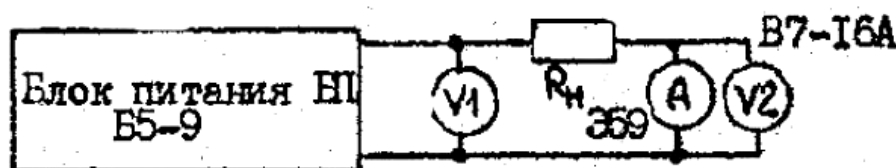


Рис.1. Измерение мощности постоянного тока косвенным методом.

При измерении мощности напряжение источника БП устанавливают равным 20 В и контролируют по вольтметру V_1 . После этого изменяют сопротивление нагрузки и регистрируют показания приборов. Результаты измерений заносят в таблицу 1.

Таблица 1.

Напряжение U_{v1} , В				
Сопротивление нагрузки R_H , Ом				
Ток нагрузки I_A , А				
Напряжение U_{v2} , В				
Поправка - P_A , Вт				
Мощность нагрузки P_H , Вт				
Относительная погрешность δ , %				

Расчет мощности выполняют по формулам: измеренное значение мощности определяют по показаниям приборов V_1 и A , $P_{и} = U_{v1} I_A$ мощность, потребляемую амперметром, рассчитывают по формуле $P_A = U_{v2} I_A$, мощность, рассеиваемую в нагрузке, определяют с учетом поправки - P_A по формуле $P_H = P_{и} - P_A$.

Относительная погрешность измерения мощности определяют по формуле

$$\delta_p = \sqrt{\delta_{v1}^2 + \delta_A^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{ном} k_A}{I_A}\right)^2 + \left(\frac{U_{ном} k_{v1}}{U_{v1}}\right)^2}$$

где $I_{ном}$ и $U_{ном}$ – пределы измерения амперметра A и вольтметра V_1 , соответственно, k_A и k_{v1} – классы точности амперметра и вольтметра.

2. Измерение мощности постоянного тока с помощью электродинамического ваттметра типа Д535 выполняют по схеме, изображенной на рис. 2. Питание схемы производят от блока питания БП типа Б5-9. Напряжение на нагрузке измеряют вольтметром V типа В7-16А. В качестве нагрузки используют магазин сопротивлений типа МСР.

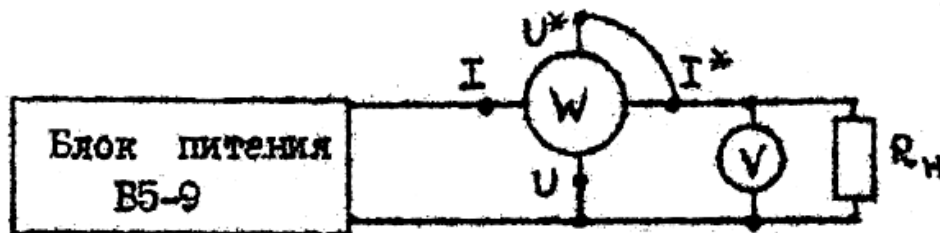


Рис. 2. Схема измерения мощности.

При измерении мощности устанавливают на нагрузке напряжение $U_H = 40$ В, которое измеряют вольтметром V . После этого изменяют сопротивление нагрузки R_H и регистрируют показания ваттметра W . Результат измерения заносят в таблицу 2.

Таблица 2.

Напряжение U_H , В	40	40	40	40
Сопротивление R_H , Ом	500	1000	1500	2000
Показание ваттметра P_w , Вт	3.55	1.75	1.15	0.85
Поправка - ΔP , Вт	0.1	0.1	0.1	0.1
Мощность нагрузки P_H , Вт	3.45	1.65	1.05	0.75
Погрешность δ_p , %	1.05	2.1	3.3	4.4

Для определения поправки - ΔP измеряют мощность, потребляемую обмоткой напряжения ваттметра W . Для этого в схеме, изображенной на рис. 2. отключают нагрузку и регистрируют показания ваттметра W при отключенной нагрузке.

Примечание. При измерении ΔP допускается нагрузку не отключать, а устанавливать ее сопротивление $R_H=100$ кОм.

Мощность P_H , потребляемую нагрузкой, вычисляют по формуле $P_H = P_w - \Delta P$. Относительную погрешность измерения мощности рассчитывают по формуле

$$\delta_p = (U_{ном} I_{ном} k_w / P_w) 100\%$$

где $U_{ном}$ и $I_{ном}$ установленные пределы измерения ваттметра по напряжению и току; k_w - класс точности ваттметра, P_w -показания ваттметра.

5. Измерение импульсной мощности с помощью осциллографа выполняют по схеме, изображенной на рис. 3.

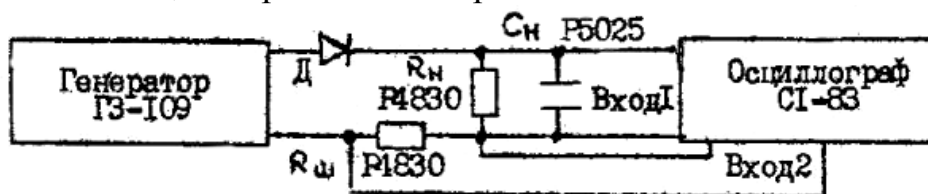


Рис. 3. Измерение импульсной мощности с помощью осциллографа.

Импульсные сигналы создаются при помощи выпрямления синусоидального напряжения генератора ГЗ-109 посредством диода Д. В качестве нагрузки используют параллельное соединение магазинов сопротивления R_H типа P4830 и емкости C_H типа P5025. Для регистрации формы тока в нагрузке последовательно с ней включен датчик тока $R_{ш}$, напряжение на котором пропорционально току нагрузки. Напряжение с датчика тока и напряжение нагрузки подводят к двухканальному электронному осциллографу типа С1-83.

Для наблюдения двух кривых - напряжения и тока в нагрузке осциллограф устанавливают в режим, при котором на экране поочередно получают изображения подводимых сигналов. Кривые тока и напряжения с экрана осциллографа регистрируют на кальку с учетом масштабов по координатным осям.

На выходе генератора ГЗ-109 устанавливают напряжение 10 В и частоту 400 Гц. Сопротивление нагрузки устанавливают равным $R_H=500$ Ом, а емкость нагрузки $C_H =0,5$ мкФ. Для построения кривой мгновенной мощности в нагрузке кривые напряжения и тока графически перемножают, как показано на рис. 4.

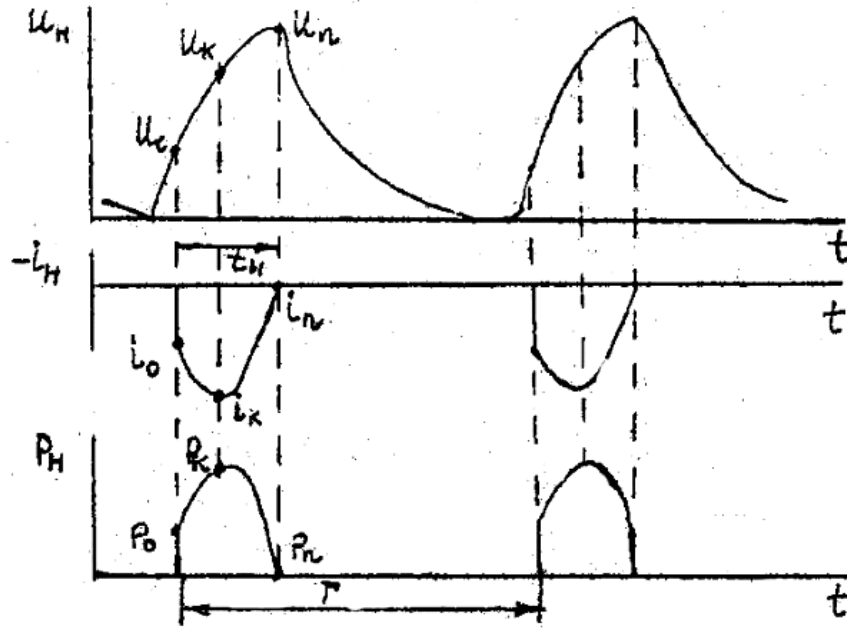


Рис.4

Кривую напряжения разбивают на восемь равных интервалов по времени и ординаты кривой напряжения перемножают на соответствующие ординаты кривой тока. По результатам измерений и вычислений заполняют таблицу 3. Расчет мгновенной мощности выполняют по формуле $p_k = u_k i_k$, где u_k и i_k -мгновенные значения напряжения и тока.

Импульсную мощность выделяют путем графического интегрирования по формуле Симпсона (для $n=8$)

$$P_{\text{и}} = \frac{1}{3n} [P_0 + 4(P_1 + P_3 + P_5 + P_7) + 2(P_2 + P_4 + P_6) + P_8]$$

Среднюю мощность определяют путем деления импульсной мощности на скважность $P = P_{\text{и}} / \xi$, где $\xi = T/t_n$.

Таблица 3.

Номер ординаты k	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Напряжение $u_k, \text{В}$									
Ток $i_k, \text{А}$									
Мощность $P_k, \text{Вт}$									

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКОВ.

Цель работы - ознакомление с принципом действия и устройством приборов для измерения напряжения и тока, исследование их основных метрологических характеристик и приобретение практических навыков работы с измерительными приборами.

Содержание работы.

1. Определение основной погрешности, вариация показаний и поправки вольтметра выполняют по схеме, изображенной на рис. 1. В качестве поверяемого прибора используют вольтметр типа МПЛ-46, а образцовый служит цифровой вольтметр типа В2-23. Перед проведением измерений прибор В2-23 включить в сеть и выждать 10...15 мин. Затем произвести установку нуля и калибровку вольтметра В2-23 в соответствии с инструкцией по пользованию прибором. Кроме того, необходимо выполнить установку нуля вольтметра МПЛ-46, пользуясь корректором.

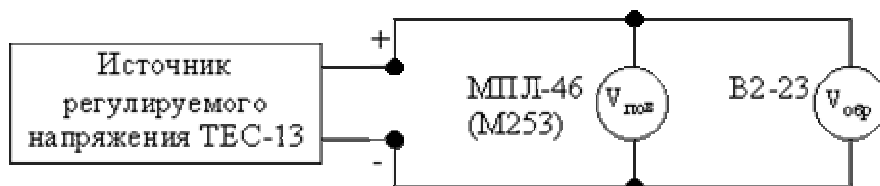


Рис.1. Определение основной погрешности.

Для выполнения п. 1 программы поверяемый вольтметр МПЛ-46 устанавливают на диапазон 15 В и измеряют напряжение на всех оцифрованных делениях шкалы, изменяя входное напряжение регулируемого источника ТЕС-13. Измерение напряжения на каждом оцифрованном делении шкалы МПЛ-46 производят дважды: один раз при возрастании напряжения (показание образцового вольтметра $U'_{обр}$), а второй раз при убывании напряжения (показание образцового вольтметра $U''_{обр}$). При этом на образцовом вольтметре В2-23 необходимо выбрать поддиапазон, обеспечивающий не менее трех значащих цифр. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

Показания поверяемого прибора	$U_{пов}, В$
Показание образцового прибора	$U'_{обр}, В$
	$U''_{обр}, В$
Действительное значение напряжения	$U_{ср}, В$
	$\Delta U, В$
Погрешность градуировки	$\delta, \%$
	$\gamma_{п}, \%$
Поправка	$\Pi, В$
	$\Delta U_{обр}, В$
Вариация показаний	$\gamma_{в}, \%$

Действительные значения на оцифрованных делениях шкалы поверяемого вольтметра определяют как среднее значение двух измерений $U_{\text{ср}}=(U'_{\text{обр}}+U''_{\text{обр}})/2$.

Расчет погрешности измерений выполняют по формулам:

Абсолютная погрешность $\Delta U=U_{\text{пов}}-U_{\text{ср}}$,

Относительная погрешность $\delta=(\Delta U/U_{\text{пов}})*100\%$,

Приведенная погрешность $\gamma_{\text{п}}=(\Delta U/U_{\text{ном}})*100\%$,

где $U_{\text{ном}}=150$ В – номинальное значение напряжения поверяемого вольтметра.

Вариацию показаний вольтметра определяют по формулам:

Абсолютное значение вариации $\Delta U=U'_{\text{обр}}-U''_{\text{обр}}$,

Приведенное значение вариации $\gamma_{\text{в}}=(\Delta U_{\text{обр}}/U_{\text{ном}})*100\%$,

Поправку вольтметра вычисляют по формуле $\Pi=-\Delta U$.

Из полученных значений $\gamma_{\text{п}}$ и $\gamma_{\text{в}}$ необходимо выбрать наибольшее и сравнить их с классом точности $K_{\text{ц}}$ поверяемого вольтметра. Если $\gamma_{\text{п макс}}$ и $\gamma_{\text{в макс}}$ окажутся больше $K_{\text{ц}}$, то поверяемый вольтметр нельзя использовать с указанным классом точности.

Использование табличных значений поправки позволяет существенно уменьшить погрешность измерения напряжения поверяемым вольтметром. Вводя поправку в результат измерения, получаем действительное значение напряжения $U=U_{\text{пов}}-\Delta U=U_{\text{пов}}+\Pi$.

4. Определение частотного диапазона, вольтметров выполняют по схеме, изображенной на рис. 2, Для определения частотного диапазона снимают зависимость показаний вольтметров от частоты переменного напряжения, подаваемого от генератора типа ГЗ-109. Исследования выполняют для электромеханических вольтметров типов АМВ, Д566 и электронного вольтметра типа ВЗ-38

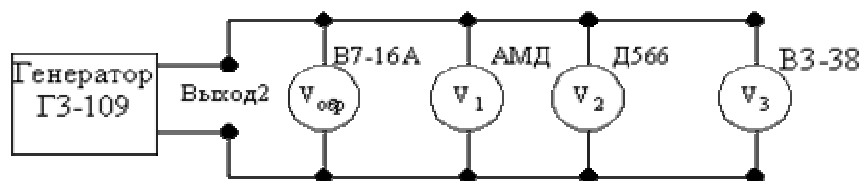


Рис 2. Определение частотного диапазона, вольтметров.

При измерениях на выходе генератора ГЗ-109 устанавливают напряжение, равное 60 В, которое контролируют при помощи образцового вольтметра типа В7-16А. Частоту генератора изменяют в пределах от 50 Гц до 200кГц, напряжение, равным 60 В. Результаты измерений заносят в таблицу 2.

По результатам измерений построить частичные характеристики в полулогарифмическом масштабе для всех испытуемых вольтметров. При определении диапазона рабочих частот вольтметра полагают, что дополнительная частотная погрешность равна основной погрешности, т.е $\Delta U_{\text{доп}}=K_{\text{ц}} U_{\text{ном}}/100$.

Верхнюю частоту f_v рабочего диапазона вольтметра определяют по уменьшению показаний вольтметра на значения погрешности $\Delta U_{\text{доп}}$. Нижнюю частоту f_n рабочего диапазона для электромеханического измерительного механизма прибора принимают равной 15...20 Гц. Пример определения диапазона рабочих частот приведен на рис. 4. Диапазон рабочих частот рассчитывают по формуле $\Delta f = f_v - f_n$.

Таблица 2

Частота f , Гц	50	100	200	500	10^3	$5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$
U_{AMB} , В										
$U_{Д566}$, В										
$U_{В3-38}$, В										

5. Исследование влияния формы измеряемого напряжения на показания прибора выполняют по схеме, изображенной на рис. 3. В качестве источника напряжения сложной формы используют генератор Гб-15. Измерения производят при трех формах выходного напряжения: синусоидальной, прямоугольной и треугольной. Для наблюдения формы выходного напряжения используют электронный осциллограф С1-83.

Зависимость показаний приборов от формы напряжения следуют для вольтметров трёх типов: электронного вольтметра средневыпрямленного напряжения типа ВЗ-38, электронного вольтметра действующего напряжения типа ВЗ-40 и цифрового вольтметра В7-16А. Перед началом измерений все приборы необходимо включить в сеть и выждать 10...15 мин. После того произвести калибровку шкалы приборов и установку нуля.

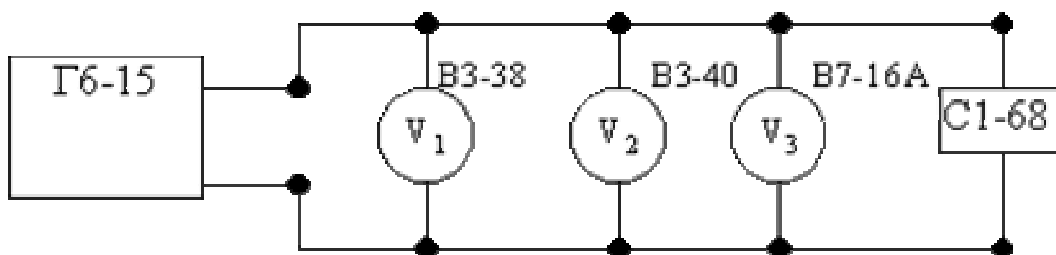


Рис 3. Исследование влияния формы измеряемого напряжения на показания прибора.

При измерениях все приборы установить на предел измерения, равный 10 В. На выход генератора Гб-15 установить напряжение амплитудой 10 В и частотой 1 кГц. Переключатель «ОСЛАБЛЕНИЕ СИГНАЛА» установить в положение «0 дБ». Напряжение на схему подать с основного выхода генератора Гб-15. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3

Форма напряжения	Показание вольтметра								
	В3-38			В3-40			В7-16А		
	$U_{изм}, В$	$U_p, В$	$\Delta U, В$	$U_{изм}, В$	$U_p, В$	$\Delta U, В$	$U_{изм}, В$	$U_p, В$	$\Delta U, В$
Синусоидальная									
Прямоугольная									
Треугольная									

Примечание. Амплитуду напряжения, равную 10 В с погрешностью не более 3%, устанавливают по шкале генератора Г6-15. Более точно амплитуду напряжения устанавливают с помощью цифрового вольтметра В7-16А на частоте 0,01...0,1 Гц при прямоугольной форме выходного напряжения

Так как вольтметры средневыпрямленных значений В3-38 и В7-16А градуируют в действующих значения при синусоидальной форме напряжения, то при измерении синусоидального напряжения действующее значение рассчитывают по формуле $U_p = U_m / K_{a.син} = U_m / 1.41$.

Если форма напряжения отличается от синусоидального, то в соответствии с выражением (22) действующее значение напряжения рассчитывают по формуле $U_p = K_f U_m / K_{ф.син}$ $K_{a.син} = K_f U_m / K_{у.син} = K_f U_m / 1.57$ где K_f - коэффициент формы измеряемого напряжения, $K_{ф.син}$, $K_{a.син}$, $K_{у.син}$ - коэффициенты формы, амплитуды и усреднения синусоидального напряжения.

Вольтметр В3-40 показывает действующее значение напряжения любой формы, поэтому для него $U_p = U_m / K_a$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с принципом действия и основными техническими возможностями универсального электронно-лучевого осциллографа.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Осциллограф предназначен для наблюдения формы электрических сигналов и для определения их параметров по изображению. Отображение процесса во времени осуществляется на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Электронно-лучевая трубка представляет собой вакуумный прибор, имеющий люминесцентный экран, изображение на котором формируется электронным лучом. Основным узлом ЭЛТ является система из двух пар отклоняющих пластин X и Y. Одна пара пластин (пластины Y) позволяет осуществить вертикальное отклонение электронного луча. На нее подается напряжение исследуемого сигнала.

На вторую пару пластин (пластины X) подается линейно-изменяющееся во времени напряжение, называемое напряжением развертки. Это напряжение создает горизонтальное отклонение электронного луча пропорционально времени. Устройство, вырабатывающее напряжение развертки, называется генератором развертки.

Пример изображения, получающегося на экране ЭЛТ, показан на рис. 1. Гармонический исследуемый сигнал U_y подан на пластины Y. Под воздействием этого сигнала луч перемещается вверх-вниз. Если при этом на пластины X подать линейно-изменяющееся (пилообразное) напряжение U_x , как показано на рис.1, то луч прочертит на экране осциллографа кривую, отображающую форму исследуемого сигнала.

Для получения устойчивого изображения необходимо, чтобы период напряжения развертки был равен или кратен периоду исследуемого сигнала. Для пояснения рассмотрим случай, когда период развертывающего напряжения T_p равен периоду сигнала T_c .

На изображении на экране ЭЛТ отмечены характерные точки 0, 1, 2, 3, 4, которые соответствуют моментам времени t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 при движении луча по экрану слева-направо и снизу-вверх. На отрезке времени t_4-t_5 происходит резкий спад напряжения U_x , и луч возвращается в начальную точку 0. В следующий период $t'_0, t'_1, t'_2, t'_3, t'_4, t'_5$ повторяется тот же цикл, и т.д., причем изображение повторяется во всех деталях и на том же месте экрана осциллографа. Если период развертки кратен периоду сигнала, то на экране получится изображение нескольких периодов исследуемого сигнала. Точное согласование периодов развертки и исследуемого сигнала достигается синхронизацией генератора развертки.

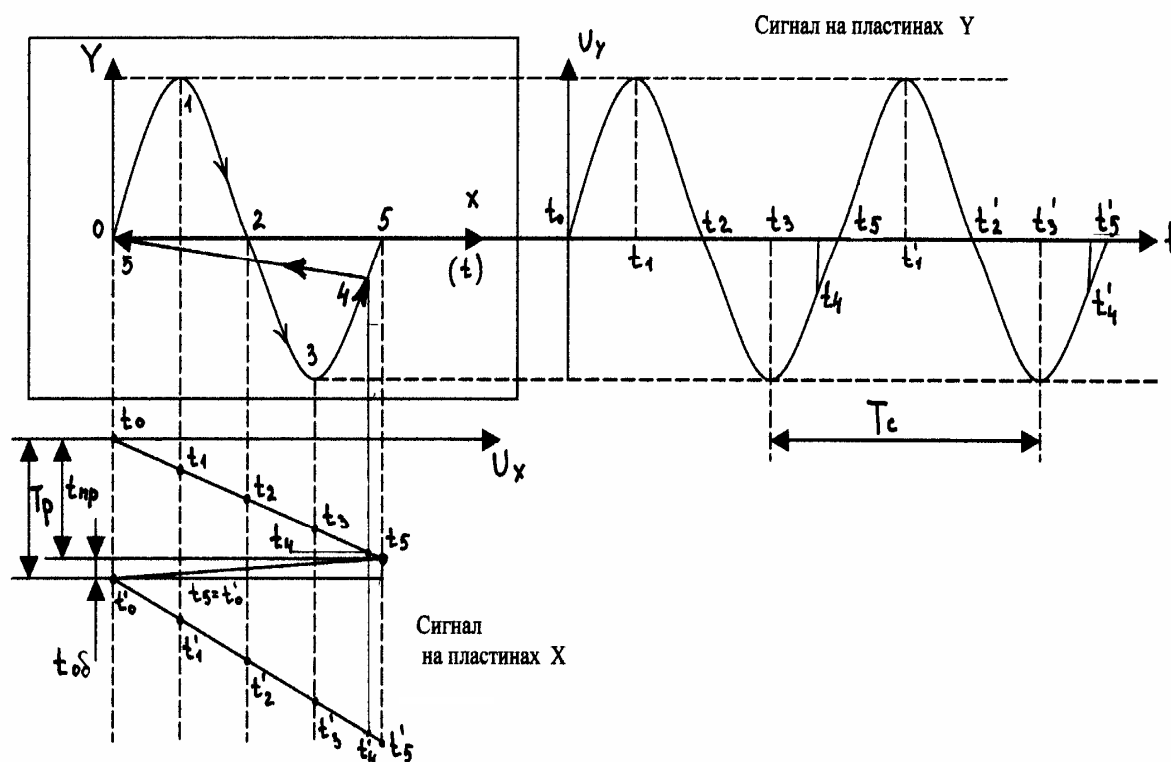


Рис.1. Формирование изображения сигнала на экране осциллографа

Из рис. 1 видно, что для того, чтобы не терялась часть изображения на участке между точками 4 и 5, должны выполняться соотношения:

$$t_{\text{пр}} \gg t_{\text{об}}, \quad T_p \approx t_{\text{пр}},$$

где T_p , $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{об}}$ соответственно период и длительности прямого и обратного хода развертки.

Работу идеального генератора развертки можно пояснить с помощью упрощенной эквивалентной схемы, представленной на рис.2.

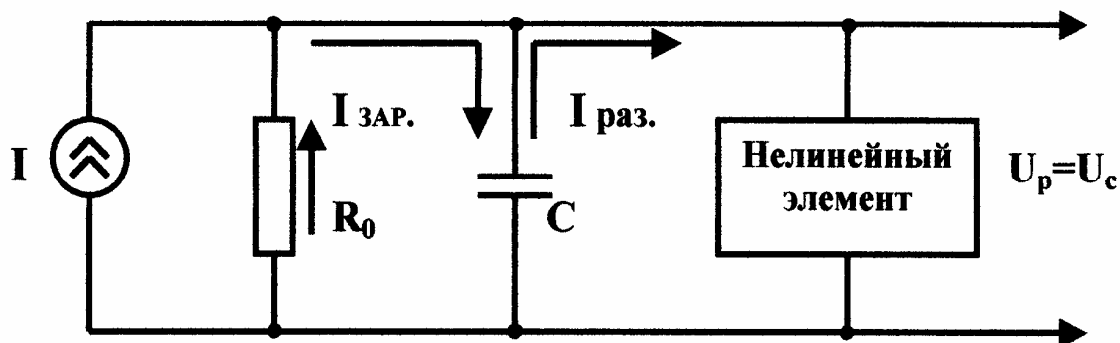


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора напряжения развертки.

Параллельно емкости достаточно большой величины включена управляемая нелинейная схема, входное сопротивление которой может принимать два значения: ноль или бесконечность. Когда сопротивление нелинейной схемы бесконечно, происходит заряд емкости от источника тока I . Если источник тока идеальный, то есть величина сопротивления R_0 бесконечно большая, то ток заряда $I_{\text{зар}}$ постоянен, и напряжение на конденсаторе U_c возрастает линейно во времени, как видно из следующего соотношения:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_{\text{пр}}} I_{\text{зар}} dt = \frac{1}{C} I_{\text{зар}} t_{\text{пр}}.$$

Время заряда емкости выбирается равным времени прямого хода луча. Когда сопротивление становится равным нулю, конденсатор практически мгновенно разряжается, что соответствует обратному ходу луча.

В реальных схемах величины сопротивления R_0 и сопротивления нелинейной схемы в режиме заряда имеют конечные значения, что приводит к нелинейности закона нарастания напряжения на емкости во времени. В режиме разряда сопротивление нелинейной схемы отлично от нуля, в результате чего длительность обратного хода тоже отлична от нуля.

В современных осциллографах в нелинейных схемах используются электронные ключи, управляемые импульсными схемами, на которые, в свою очередь, поступает сигнал синхронизации.

При внутренней синхронизации этот сигнал формируется из исследуемого входного сигнала U_y . В отсутствие исследуемого сигнала сигнал развертки генерируется непрерывно. Такой режим развертки называется автоколебательным.

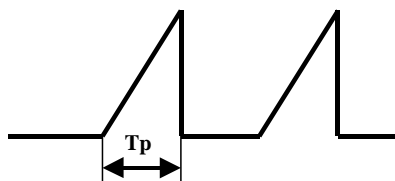


Рис. 3. Напряжение развертки в ждущем режиме

Если необходимо исследовать короткие импульсы, период следования которых много больше их длительности, то автоколебательный режим развертки оказывается непригодным из-за трудностей с синхронизацией. В таких случаях следует использовать режим ждущей развертки. При этом напряжение развертки формируется только при подаче сигнала синхронизации. Форма напряжения развертки в таком режиме представлена на рис. 3.

В режиме внешней синхронизации сигнал синхронизации генератора развертки осциллографа формируется из сигнала, подаваемого на вход X осциллографа. В режиме внешней развертки на этот же вход подается переменное напряжение, поступающее далее на пластины X. Внутренний генератор развертки осциллографа при этом отключается. Такой режим используется, например, для получения синусоидальной развертки, для наблюдения фигур Лиссажу и т.п.

Сведения о структурной схеме электронно-лучевого осциллографа и назначении его органов управления и регулировки даны в Приложении 1.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В лабораторную установку входят следующие приборы:

- универсальный электронный осциллограф типа С1-83,
- низкочастотный генератор типа ГЗ-109 (ГНЧ),
- высокочастотный генератор типа Г4-102 (ГВЧ),
- генератор прямоугольных импульсов типа Г5- 54 (ГИ),
- универсальный электронный цифровой вольтметр типа В7-16А, (В).

Примечание: В случае необходимости, указанные приборы могут быть заменены на приборы с аналогичными параметрами.

ВНИМАНИЕ! Перед включением приборов убедиться в том, что:

- корпуса приборов заземлены;
- ручка входного аттенюатора канала Y осциллографа поставлена в положение, соответствующее наименьшей чувствительности (например 20 В/дел.);
- ручки плавной регулировки уровня входных сигналов ГНЧ и ГИ поставлены в крайнее левое положение (сигналы на выходе отсутствуют).

4. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Измерить параметры низкочастотного гармонического сигнала.

4.2. Измерить параметры амплитудно-модулированного сигнала.

4.3. Наблюдать форму импульсного сигнала и измерить его параметры.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. Измерение параметров низкочастотного гармонического сигнала $u(t) = U_m \cos wt$ (п. 4.1. программы).

Собрать схему, показанную на рис. 4. С помощью органов управления генератора низкой частоты ГНЧ установить частоту f_r , равную $500 \cdot N$ Гц, где N - номер недели, и напряжение $U_r = 8-10$ В по внутреннему вольтметру генератора. При этом на экране осциллографа должен наблюдаться гармонический сигнал низкой частоты. Зарисовать полученную осциллограмму. Дискретным изменением коэффициента ВОЛЬТ/ДЕЛ установить величину изображения примерно 5 делений масштабной сетки на экране. Плавная регулировка, усиления должна находиться в фиксированном (защелкой) положении. Количество периодов на экране должно быть в пределах 2-3. Плавная регулировка частоты развертки также должна находиться в фиксированном положении.

По цене деления K_y (коэффициента отклонения по оси Y) определяемой переключателем "ВОЛЬТ/ДЕЛ", определить амплитуду $U_{Мизм}$ исследуемого гармонического сигнала по формуле:

$$U_{Мизм} = l_y * K_y,$$

где l_y - линейный размер по оси Y .

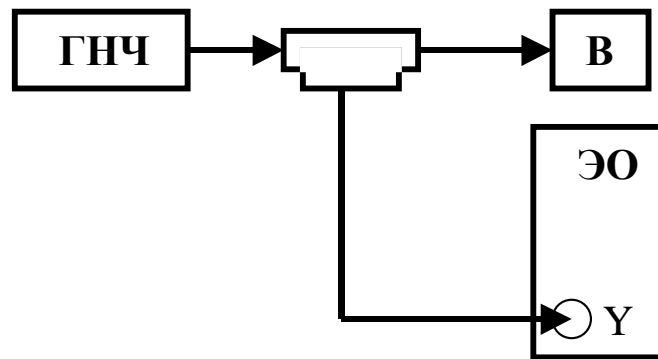


Рис. 4. Схема опыта по п. 4.1

Определить период исследуемого гармонического сигнала $T_{изм}$ по цене деления K_x (коэффициента отклонения по оси X), определяемой переключателем "ВРЕМЯ/ДЕЛ", учитывая значение коэффициента растяжки $K_{рх}$, определяемое положением переключателя "x1 x10". Значение $T_{изм}$ вычислить по формуле:

$$T_{изм} = l_x * K_x * K_{px},$$

где l_x - линейный размер по оси X .

Данные измерения занести в табл. 1.

Таблица 1

ГНЧ		Вольтметр		Параметры гармонического сигнала, определяемые по осциллографу ЭО						
f_T	U_T	U_d		l_y	K_y	U_m	l_x	K_x	K_{px}	T_x
Гц	В	В	В	дел	В/дел	В	дел	С/дел	-	с

Одновременно с определением параметров гармонического сигнала по осциллографу, измерить действующее значение этого сигнала по электронному вольтметру. Сопоставить полученные результаты, учитывая, что вольтметр проградуирован в действующих значениях синусоидального напряжения, следовательно амплитудное значение напряжения определяется по формуле $U_m = \sqrt{2} \cdot U_d$, где U_d - показание вольтметра, пропорциональное действующему значению синусоиды, а $\sqrt{2}$ - коэффициент амплитуды синусоидального сигнала.

Примечание. При определении параметров сигнала с помощью осциллографа относительная погрешность может достигать 5 - 10 % вследствие нелинейности развертки, геометрических искажений изображения на экране и соизмеримости толщины электронного луча с величиной изображения. Для уменьшения этих погрешностей следует располагать изображение примерно в середине экрана и выбирать цену делений по вертикали и по горизонтали таким образом, чтобы изображение занимало 50 - 70 % размера экрана. При этом следует добиваться минимальной толщины линий изображения на экране, используя для этого регулировки фокусировки и яркости.

Записать результаты измерений параметров исследуемого гармонического сигнала по формулам:

$$U_{mx} = U_{Мизм} \pm \Delta_{U_{Mx}},$$

$$T_x = T_{изм} \pm \Delta_{Tx},$$

где $\Delta_{U_{Mx}}$ и Δ_{Tx} - абсолютные погрешности измерения соответственно амплитуды и периода.

5.2. Измерение параметров амплитудно-модулированного сигнала

$$u(t) = U_M (1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (\text{п. 4.2 программы}).$$

Собрать схему, показанную на рис.5. Источником несущей частоты является высокочастотный генератор (ГВЧ). Установить несущую частоту в пределах 120 - 180 кГц. Модулирующая частота поступает с ГНЧ. Параметры модулирующего сигнала взять те же, что и в предыдущем опыте. Измерения проводить при двух значениях коэффициента модуляции, установленного на ГВЧ:

$$M_1 = 5n_1\% , \quad M_2 = 5n_2\% ,$$

где $n_1 = 6, n_2 = 10$ - для четных недель; $n_1 = 12, n_2 = 18$ - для нечетных недель.

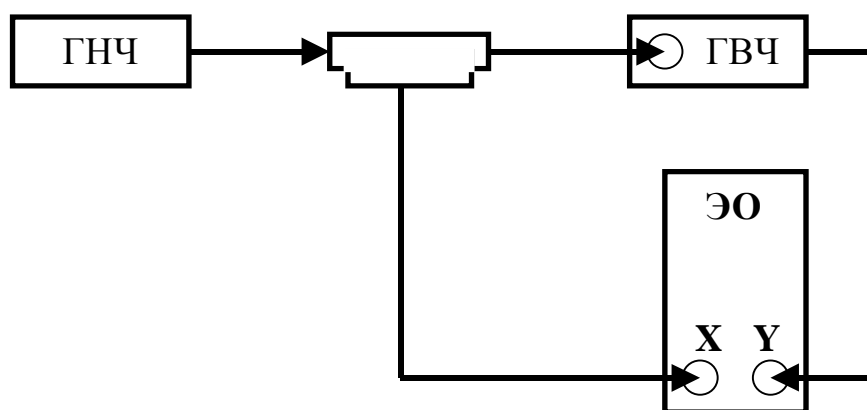


Рис. 5. Схема опыта по п. 4.2

Зарисовать осциллограммы, полученные на экране осциллографа для двух значений коэффициента модуляции M_1 и M_2 . Примерная форма АМ - колебаний представлена на рис. 6.

По изображению модулированного сигнала определить коэффициент модуляции по формуле:

$$M = \frac{A - B}{A + B} 100\% .$$

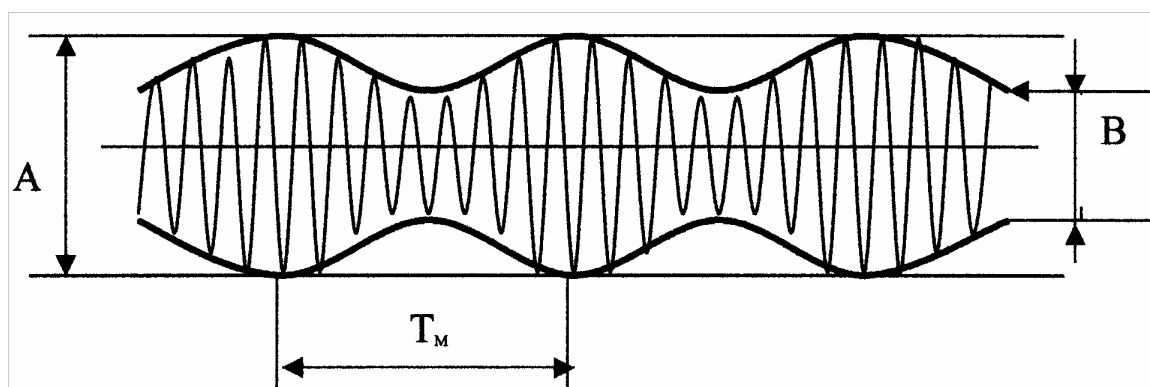


Рис. 6. АМ - колебание.

Определить период модулирующего сигнала T_m , как это было сделано в п.4.1 программы и частоту $F_m=1/T_m$. Данные эксперимента записать в табл.2. Письменно сопоставить полученные параметры $M1, M2, F_m$, с заданными.

Таблица 2

Заданные величины			Величины, измеренные с помощью осциллографа							
ГНЧ	ГВЧ									
F_m	$f_{нес}$	M	l_x	K_x	K_{px}	T_m	A	B	F_m	M
Гц	кГц	%	дел	с/дел	-	с	дел	дел	Гц	

5.3. Измерение параметров импульсного сигнала (п. 4.3 программы).

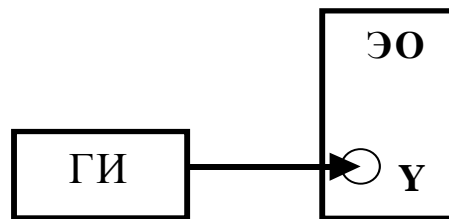


Рис.7. Схема опыта по п. 4.3

Собрать схему, показанную на рис. 7.

Исходные данные задать в соответствии с табл. 3.

Измерить пиковые значения импульсного сигнала ($U_{п}^+$ и $U_{п}^-$) (см. рис. 8). Зарисовать в масштабе осциллограммы импульсного сигнала для режима без постоянной составляющей сигнала (переключатель режима входа У в положении " ~ ").

В режиме " ~ " определить пиковые значения положительного $U_{п}^+$ и отрицательного $U_{п}^-$ импульсов с ГИ, период следования импульсов $T_{и}$ (частота $F_{и}$), длительность импульсов $\tau_{и}$.

Таблица 3.

Параметры импульсных сигналов.	Заданные значения параметров		
	1-я группа	2-я группа	3-я группа
Частота следования импульсов $F_{и}$, (Гц)	1000	500	700
Размах импульсов U_p (показания выходного прибора ГИ), В.	20	25	30
Длительность импульсов $\tau_{и}$ (мкс)	150	200	250

Для определения отрицательных и положительных пиковых значений U_{Π}^+ и U_{Π}^- вначале необходимо определить положение горизонтальной линии, соответствующей нулевому значению исследуемого сигнала. Для этого необходимо замкнуть вход осциллографа (поставить переключатель "∼"; "≈"; "⊥" в положение "⊥") и ручкой регулировки вертикального отклонения (" ") совместить линию развертки с центральной горизонтальной линией шкалы. Определяемые параметры импульсных сигналов показаны на рис. 8, а, б.

Выполнить расчет пиковых значений импульсов используя приведенные ниже соотношения (1) и (2).

При работе осциллографа в режиме "∼" постоянная составляющая входного сигнала отсекается. Следовательно, постоянная составляющая сигнала, отображаемого на экране, равна нулю, т.е. средние значения

напряжения за интервалы времени $\tau_{и}$ и $(T_{и} - \tau_{и})$ (см. рис. 8 а, б) равны по абсолютной величине. Отсюда для положительных импульсов (рис. 8, а)

имеет место соотношение
$$|U_{cp}^+| = |U_{cp}^-| ,$$

где
$$U_{cp}^+ = U_{\Pi}^+ \tau_{и} / T_{и} , \quad U_{cp}^- = U_{\Pi}^- (T_{и} - \tau_{и}) / T_{и} .$$

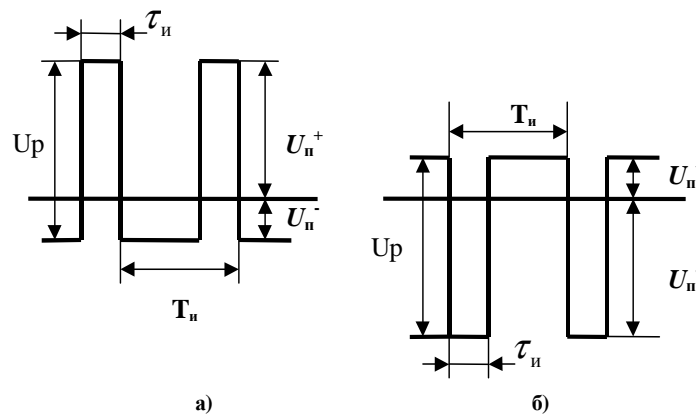


Рис. 8. Параметры положительных и отрицательных импульсов

Так как $|U_{\Pi}^+| + |U_{\Pi}^-| = U_p$ - напряжение импульсного сигнала "от пика до пика", получаем

$$U_{\Pi}^+ = U_p (T_{и} - \tau_{и}) / T_{и} , \quad U_{\Pi}^- = U_p \tau_{и} / T_{и} . \quad (1)$$

Аналогично для отрицательных импульсов (рис. 8, б):

$$U_{\Pi}^- = U_p (T_{и} - \tau_{и}) / T_{и} , \quad U_{\Pi}^+ = U_p \tau_{и} / T_{и} . \quad (2)$$

Результаты расчета и эксперимента записать в табл. 4.

Таблица 4

Заданные параметры (ГИ)				Расчетные параметры		Экспериментальные данные			
полярность	размах U_p	частота $F_{и}, \Gamma_{ц}$	длит. $\tau_{и},$ мкс	$U_{п}^+$ $U_{п}^-$, В	$U_{п}^-$ $U_{п}^+$, В	$U_{п}^+$ $U_{п}^-$, В	$U_{п}^-$ $U_{п}^+$, В	$\tau_{и},$ мкс	период $T_{и},$ мкс
+									
-									

Сделать письменные выводы о соответствии расчетных и экспериментальных величин $U_{п}^+$, $U_{п}^-$, $F_{и}$, $\tau_{и}$ заданным.

5.6. Ответить на вопросы

1) Отличаются ли параметры, определенные по вольтметру и осциллографу ЭО, от заданных генератором ГНЧ? На сколько процентов и как это объяснить?

2) Как связана кратность периодов развертки и сигнала с видом изображения на экране?

3) Нарисуйте упрощенную структурную схему осциллографа и поясните принцип его работы.

4) Какие бывают типы синхронизации? Какая синхронизация используется при измерении параметров гармонического сигнала и амплитудно-модулированного сигнала?

5) Какие бывают виды режимов работы генератора развертки?

6) Чем обусловлена погрешность измерения амплитуды и временных интервалов с помощью осциллографа?

7) Что такое коэффициент отклонения по оси Y (K_y) и коэффициент отклонения по оси X (K_x)?

8) Дайте определения действующего U_d и амплитудного U_m значений напряжений гармонического сигнала и как они связаны между собой?

9) В каких значениях отградуирована шкала вольтметров генератора и В7-16А?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление студентов с различными методами измерения частоты, оценкой их погрешностей. Основное внимание уделяется изучению принципов построения, функционирования и использования цифрового частотомера.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В состав лабораторной установки входят:

1. Цифровой частотомер типа ЧЗ-32 (или аналогичный).
2. Осциллограф С1-83 (или др. типа).
3. Генераторы синусоидального напряжения высокочастотные типа Г4-42 (или аналогичные), у одного из которых закрыта шкала установки частоты.
4. Генератор синусоидального напряжения низкочастотный типа ГЗ-33 (или аналогичный).
5. Макет смесителя двух сигналов.
6. Головной телефон.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

3.1. Ознакомиться по учебным пособиям и данным методическим указаниям с методами измерения частоты, принципом работы цифрового частотомера и оценкой величины его погрешности. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3.2. Подготовить блок-схемы измерений и таблицы для записи результатов по всем пунктам лабораторной работы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. На чем основан метод нулевых биений? Каковы его погрешности?
 4.2. Какой индикатор обеспечит большую точность при измерениях методом нулевых биений: головной телефон или осциллограф и почему?

4.3. Каков принцип работы цифрового частотомера в режиме измерения частоты сигнала?

4.4. Каков принцип работы цифрового частотомера в режиме измерения периода сигнала?

4.5. Как выбрать оптимальный с точки зрения минимальной погрешности измерение режим измерения частот 10 Гц, 10 кГц, 1 МГц с помощью используемого в лабораторной работе цифрового частотомера?

5. ЗАДАНИЕ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

5.1. Измерить методом нулевых биений неизвестную частоту генератора с закрытой шкалой:

а) используя в качестве индикатора головной телефон,

б) используя в качестве индикатора осциллограф.

5.2. Измерить частоту и период напряжения генератора с закрытой шкалой с помощью цифрового частотомера.

5.3. Исследовать стабильность частоты того же генератора во времени.

5.4. Проверить шкалу генератора низкой частоты на пределе, указанном преподавателем, с помощью цифрового частотомера в режимах измерения частоты и периода.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

6.1. Измерение частоты методом нулевых биений

Данный метод относится к методам сравнения и состоит в сравнении известной частоты эталонного генератора с измеряемой частотой генератора с закрытой шкалой.

Блок-схема измерений по методу нулевых биений показана на рис. 1. Сигнал с измеряемой частотой f_x , от генератора 1 с закрытой шкалой и сигнал с известной частотой $f_{эт}$ от генератора 2, называемого эталонным, подаются на входы смесителя. В качестве смесителя используется нелинейное устройство, выполненное в данном случае в виде транзисторного каскада. При совместном прохождении двух сигналов через нелинейное устройство на выходе помимо частот входных сигналов будут присутствовать так называемые комбинационные частоты: суммарная, разностная и др. В методе нулевых биений используется разностная частота, называемая частотой биений

$$F_{\text{б}} = |f_x - f_{\text{эт}}|.$$

Для определения неизвестной частоты плавно изменяют известную частоту эталонного генератора, контролируя при этом с помощью индикатора частоту биений. Необходимо добиться нулевого значения $F_{\text{б}}$ с погрешностью, определяемой возможностями индикатора. Тогда за результат измерения принимают $f_x = f_{\text{эт}}$.

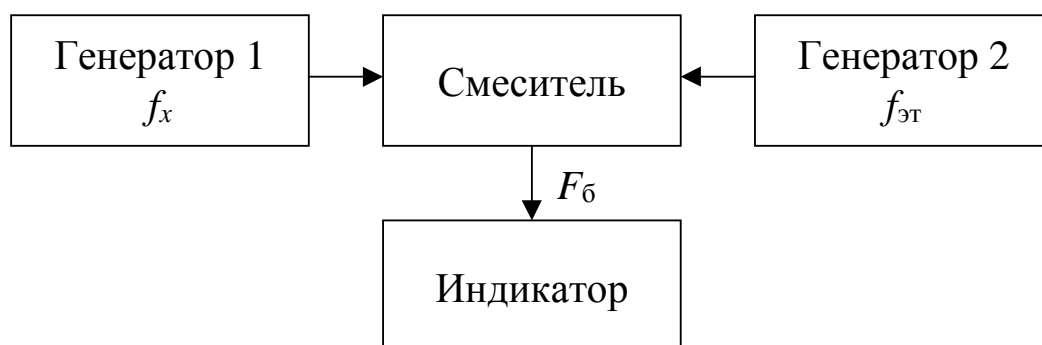


Рис.1. Блок-схема измерений методом нулевых биений

Определение равенства нулю частоты биений на слух с помощью головного телефона является одним из классических методов измерения частоты в радиотехнике. На рис.2. показана зависимость частоты биений от частоты эталонного генератора.

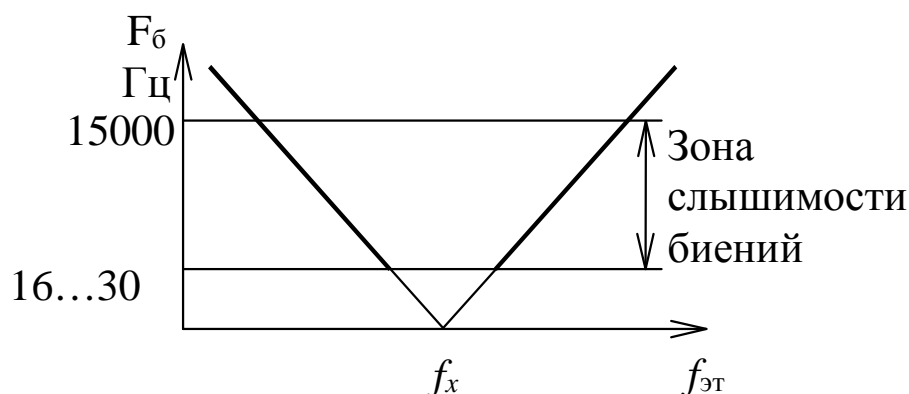


Рис.2. Зависимость частоты биений от частоты эталонного генератора

В двух интервалах значений $f_{эт}$ величина F_6 , будет попадать в диапазон воспринимаемых слухом значений частоты, приблизительно от 30 Гц до 15 кГц. В промежутке между этими интервалами находится участок, в пределах которого звук исчезает, т.е. $F_6=0$ и $f_x=f_{эм}$. Значение $f_{эм}$ определяется по шкале эталонного генератора.

Для выполнения измерения необходимо подключить выходы генераторов ко входам смесителя, соблюдая при этом правильное подключение сигнальных и общих выводов кабелей, подключить к выходу головной телефон и включить питание схемы смесителя. На эталонном генераторе необходимо установить диапазон изменения частоты от 85 до 300 кГц. Затем надо предварительно прослушать возникающие на выходе смесителя звуки при изменении $f_{эт}$, в пределах всего этого диапазона. Биения могут быть слышны в нескольких интервалах диапазона частот. Это объясняется тем, что в нелинейном устройстве возникают гармоники частот входных сигналов, и разностные частоты этих гармоник также могут попадать в звуковой диапазон. Биения входных сигналов существенно превосходят по громкости биения гармоник.

Определив по наибольшей громкости звука участок диапазона частот, в котором находится зона биений входных сигналов, необходимо, плавно вращая ручку настройки частоты эталонного генератора, определить точку на шкале, в которой звук пропадает, а по обе стороны от этой точки частота звука нарастает, и записать значение частоты $f_{эт}$, в этой точке шкалы. Данный опыт должны проделать по одному разу все члены бригады. За f_x , принимается среднее арифметическое значение полученных ими результатов.

Абсолютная погрешность измерения частоты описанным методом определяется по формуле

$$\Delta_f = \sqrt{\Delta_{и}^2 + \Delta_{эт}^2},$$

где $\Delta_{и}$ - абсолютная погрешность индикации, зависящая в данном случае от нижней частоты воспринимаемых человеком звуков, ее величина примерно 15 - 20 Гц; $\Delta_{эт}$ - абсолютная погрешность эталонного генератора, которую необходимо определить по техническому описанию на прибор, либо по шкале эталонного генератора. При этом $\Delta_{эт}=1/2$ цены деления шкалы. Записать результаты измерения частоты по форме $f_x=f_{эм}\pm\Delta_f$.

Измерение частоты с использованием в качестве индикатора осциллографа производится в основном аналогично. С выхода смесителя сигнал подать на вход "Y" осциллографа. На экране осциллографа наблюдается выходной сигнал смесителя, представляющий собой высокочастотное напряжение, промодулированное по амплитуде низкочастотным напряжением с разностной частотой F_6 . Необходимо установить коэффициент отклонения осциллографа по горизонтали 20 - 50 мс/дел. Плавно вращая ручку настройки эталонного генератора, наблюдать

форму низкочастотной огибающей. Необходимо добиться равенства частот с точностью до единиц Герц, когда на экране видны плавные изменения амплитуды сигнала во времени. Записать значение $f_{эт}$, при котором достигнута самая низкая частота биений.

6.2. Измерение частоты и периода переменного напряжения с помощью цифрового частотомера

Принцип работы цифрового частотомера и основные правила работы с ним описаны в Приложении к данным методическим указаниям.

Измерение неизвестной частоты в режиме измерения частоты необходимо выполнить для 5 значений времени счета: от 10^{-3} до 10 с. Для каждого времени счета измерение провести по 5 раз. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

Время счета, с	1	2	3	4	5	f_{cp}	δ_f
10^{-3}							
10^{-2}							
10^{-1}							
1							
10							

Для каждого значения времени счета вычислить среднее значение измеренной частоты и значение относительной погрешности по формуле

$$\delta_f = \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{1}{N} \cdot 100 \% \right)^2},$$

где δ_0 - кратковременная относительная нестабильность эталонной частоты в частотомере, которую можно принять равной $10^{-3} \%$; N - количество сосчитанных импульсов, определяемое по формуле $N = \Delta T f_x$, где ΔT - значение времени счета, f_x - измеряемая частота.

Величина $(1/N) \cdot 100\%$ определяет значение максимальной относительной погрешности дискретности, которая возникает вследствие дискретного характера используемого метода измерения частоты. Определить абсолютную погрешность измерения частоты по формуле $\Delta f = f_{cp} \cdot \delta_f / 100$. Записать результат измерения частоты по форме $f_x = f_{cp} \pm \Delta f$.

Измерение периода провести 1 раз, установив период счетных импульсов 10^{-6} с. Записать полученное значение периода T_x , пересчитать его в частоту по формуле $f_x = 1/T_x$, определить относительную погрешность измерения периода по формуле

$$\delta_T = \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{1}{N} \cdot 100 \% \right)^2},$$

где величина δ_0 такая же, как в режиме измерения частоты, а величина N определяется по формуле $N = T_x / T_0$, где T_x - измеренное

значение периода, T_0 - период счетных импульсов (см. Приложение). Как и в режиме измерения частоты, величина $(1/N) \cdot 100\%$ определяет максимальную относительную погрешность дискретности.

Определить абсолютную погрешность $\Delta_T = T_x \cdot \delta_T / 100$. Записать результат измерения по форме $T_x = T_{x \pm} \Delta_T$.

6.3. Исследование стабильности частоты ВЧ генератора

Генераторы сигналов, подобные используемым в данной лабораторной работе, имеют заметную нестабильность частоты во времени. В более совершенных генераторах сигналов применяют различные способы стабилизации частоты выходного сигнала.

Для выполнения данного опыта установить на частотомере режим измерения частоты, время счета 1с. Измерения проводить в течение 30 мин., записывая каждую минуту в табл. 2 в графу t_i с точностью до 1с значения времени в моменты замеров, а в графу f_i полученные в эти моменты значения частоты.

При обработке результатов в графу Δt_i записать значения промежутков времени $\Delta t_i = t_i - t_1$ относительно момента начала измерений t_1 , а в графу Δf_i - приращения значения частоты $\Delta f_i = f_i - f_1$ относительно значения частоты f_1 , измеренного в момент времени t_1 . Затем вычислить параметры линейной регрессии значений Δf и Δt , т.е. параметры линейной зависимости между этими величинами

$$\Delta f = b \Delta t + a,$$

где Δf - изменение частоты генератора вследствие дрейфа за промежуток времени Δt .

Параметр b показывает среднюю скорость изменения частоты во времени, а параметр a при правильном проведении измерений и расчетов должен быть близок к нулю.

Значения a и b определяются по формулам:

$$b = \frac{N \sum_i \Delta t_i \Delta f_i - \sum_i \Delta t_i \sum_i \Delta f_i}{N \sum_i t_i^2 - \left(\sum_i \Delta t_i \right)^2}, \quad a = \frac{\sum_i \Delta f_i - b \sum_i \Delta t_i}{N}$$

где N - количество сделанных измерений, $i=1..N$ - номер измерения. При расчетах значения $\Delta t_i \cdot \Delta f_i$, и Δt_i^2 заносить в соответствующие графы табл. 2.

Таблица 2

Номер измерения, i	1	2	3	30
t_i					
f_i					
$\Delta t_i = t_i - t_1$					
$\Delta f_i = f_i - f_1$					
Δt_i^2					
$\Delta t_i \cdot \Delta f_i$					

Построить с использованием найденных параметров a и b график аппроксимированной линейной зависимости Δt от Δf , после чего нанести на него все экспериментальные точки.

6.4. Проверка шкалы генератора низкочастотного синусоидального напряжения

В данном эксперименте проверяется правильность шкалы НЧ генератора в одном из четырех его частотных диапазонов, указанном преподавателем. Опыт проводится 2 раза: в режиме измерения частоты и в режиме измерения периода. В обоих случаях с помощью регулировки частоты генератора поочередно устанавливаются все значения частоты, отмеченные на шкале числами, и выполняются измерения частоты или периода переменного напряжения с помощью цифрового частотомера. Результаты для режима измерения частоты записываются в табл. 3, а для режима измерения периода - в табл. 4. В режиме измерения частоты устанавливается время счета 1с. В режиме измерения периода устанавливается период счетных импульсов 10^{-6} с.

При обработке результатов в табл. 4 измеренные значения периода $T_{\text{изм}}$ необходимо пересчитать по формуле $f=1/T$ в значения частоты f_p , которые надо записать в соответствующую графу табл. 4. В последней графе каждой таблицы записываются значения погрешности данного деления шкалы генератора, определяемые по формулам, приведенным в таблицах.

Таблица 3

Значение на шкале генератора f_{Γ} , Гц	20	25	...	200
Измеренное значение $f_{\text{изм}}$, Гц				
Погрешность $\Delta f = f_{\Gamma} - f_{\text{изм}}$, Гц				

Таблица 4

Значение на шкале генератора f_{Γ} , Гц	20	25	...	200
Измеренное значение периода $T_{\text{изм}}$, мс				
Расчетное значение частоты f_p , Гц				
Погрешность $\Delta f = f_{\Gamma} - f_p$, Гц				

Для обоих режимов необходимо рассчитать величину приведенной погрешности шкалы генератора по формуле

$$\gamma_f = \frac{\Delta f_{\text{макс}}}{f_{\text{макс}}} \cdot 100\%$$

где $\Delta f_{\text{макс}}$ - максимальное по всей шкале значение погрешности частоты, $f_{\text{макс}}$ - максимальное значение частоты на данном пределе работы генератора, определяемое по максимальному числу на его шкале. Для полученной величины приведённой погрешности γ определить класс точности из ряда предпочтительных цифр.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с резонансными методами измерения добротности, индуктивности, емкости и сопротивления с помощью куметра и методикой оценки погрешностей таких измерений.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает куметр типа Е9-4 (или аналогичный), а также объекты измерения: катушки индуктивности, входящие в комплект прибора, и набор конденсаторов и высокоомных резисторов, находящихся в отдельном корпусе с переключателем для выбора измеряемого элемента.

Структурная схема измерительной цепи, реализуемой с помощью куметра, представлена на рис. 1. Куметр содержит генератор синусоидального напряжения, частота которого может изменяться в широких пределах с помощью переключателя диапазона частот и ручки плавной регулировки. Генератор нагружен на низкоомное сопротивление R_0 величиной 0,04...0,05 Ом, что позволяет исключить влияние исследуемой схемы на режим работы генератора. Уровень напряжения на выходе генератора контролируется по вольтметру V1 (прибор “Уровень”).

К клеммам 1 и 2 подключается катушка индуктивности. На структурной схеме показаны ее индуктивность L , межвитковая паразитная емкость C_L и омическое сопротивление R_L . В куметре имеется переменный эталонный конденсатор C_3 , который служит для настройки колебательного контура в резонанс.

Выходной вольтметр V2 (прибор “Q”) контролирует напряжение на C_3 и проградуирован в единицах добротности колебательного контура. Его показания обычно и называют показаниями куметра. К клеммам 3 и 4 могут подключаться исследуемые конденсаторы или резисторы.

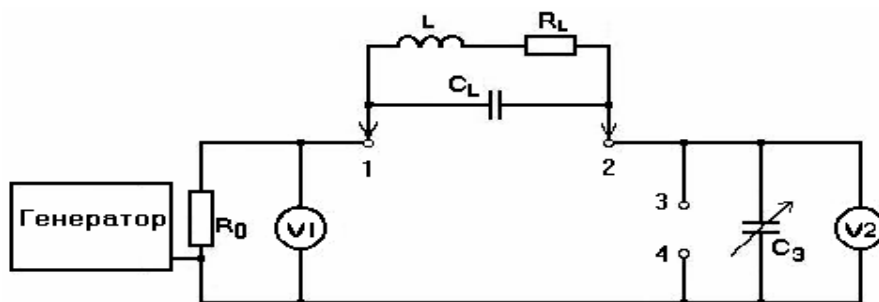


Рис.1. Структурная схема куметра

Измерения с помощью куметра основаны на получении резонанса в последовательном колебательном контуре. Достижение резонанса фиксируется по максимуму показаний вольтметра V2 при фиксированном на заданном уровне входном напряжении контура, измеряемом вольтметром V1. Условие резонанса определяется формулой:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}}, \quad (1)$$

где f_p - резонансная частота, L_K , C_K - индуктивность и емкость в контуре. Величина C_K складывается из емкостей $C_Э$, C_L и емкости внешнего конденсатора, если он подключен.

Добротность контура определяется формулой:

$$Q_K = \frac{2\pi f_p L_K}{R_K}, \quad (2)$$

где R_K сопротивление потерь в контуре. Величина R_K определяется сопротивлением R_L , сопротивлением потерь внешнего конденсатора и сопротивлением внешнего резистора, если эти элементы подключены.

Измерение добротности основано на следующем соотношении:

$$Q_K = \frac{U_p}{U_{BX}}, \quad (3)$$

где U_p - напряжение на емкости $C_Э$ при резонансе, измеряемое вольтметром V2, U_{BX} - напряжение на входе колебательного контура.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

3.1. По рекомендованной литературе и данному описанию ознакомиться со структурной схемой куметра, принципом его работы, резонансными методами измерения параметров элементов цепей с сосредоточенными постоянными.

3.2. Подготовить таблицы для записи результатов по всем пунктам лабораторной работы.

3.3. Изучить по данному описанию методику расчета погрешностей измерений.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Нарисовать структурную схему куметра и объяснить принцип его работы.

4.2. Почему вольтметр V2 показывает величину добротности? При каком условии это верно?

4.3. Как измерить индуктивность катушки без учета и с учетом ее собственной емкости?

4.4. Что такое угол потерь конденсатора? Как измерить емкость и тангенс угла потерь конденсатора?

4.5. Как измерить сопротивление резистора с помощью куметра?

4.6. Каковы источники погрешностей при измерении индуктивности с помощью куметра?

5. ЗАДАНИЕ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

5.1. Включить куметр и дать ему прогреться в течение 7 - 10 минут.

5.2. Проверить установку на “0” и выполнить калибровку куметра на шкалах добротностей 200 и 600.

5.3. Измерить добротности двух катушек на резонансных частотах, указанных преподавателем. Оценить погрешности измерений добротности.

5.4. По данным пункта 5.3. определить косвенным методом значения индуктивностей без учета собственных емкостей катушек. Затем определить значения паразитных емкостей катушек и значения индуктивностей с учетом этих емкостей.

5.5. Измерить величины индуктивностей прямым методом по шкале куметра. Сопоставить полученные значения с результатами п. 5.4.

5.6. Снять резонансные характеристики колебательного контура на двух частотах для одной из катушек индуктивности.

5.7. Методом замещения измерить значения емкостей нескольких конденсаторов и тангенсы углов потерь этих конденсаторов.

5.8. Измерить величины сопротивлений нескольких резисторов.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

6.1. Подготовка куметра к измерениям

Для подготовки куметра к измерениям необходимо выполнить следующие операции:

- переключить куметр в режим установки нуля и установить нули на шкалах приборов “Уровень” и “Q”;

- переключить куметр в режим калибровки, с помощью регулировки “Уровень” установить стрелку прибора “Уровень” на красную метку и с помощью подстройки калибровки для выбранного предела измерений добиться, чтобы стрелка прибора “Q” отклонилась до конца шкалы. При проведении измерений добротности колебательного контура необходимо всегда устанавливать уровень входного напряжения так, чтобы стрелка прибора “Уровень” находилась на красной метке. Тогда прибор “Q” будет показывать величину добротности.

6.2. Измерение добротности катушек

Измерение добротности каждой катушки производится на двух резонансных частотах f_{P1} и $f_{P2} = f_{P1} / k$, где для удобства последующих вычислений рекомендуется взять $k = 2$. Для настройки колебательного контура в резонанс необходимо изменять значение эталонной емкости C_3 с помощью ее основной регулировки до достижения максимального показания прибора “Q”, а затем при необходимости уточнить положение максимума с помощью дополнительной (подстроечной) регулировки. Значение C_3 определяется как сумма значений по основной и подстроечной шкалам. Величина добротности Q считывается по шкале прибора “Q”. Все данные записываются в табл. 1. В графы $Q_{1НОМ}$ и $Q_{2НОМ}$ записываются номинальные, то есть предельные значения шкал, по которым в данном опыте измерялась добротность.

Таблица 1

Катушка	f_{P1}	$C_{Э1}$	Q_1	$Q_{1НОМ}$	f_{P2}	$C_{Э2}$	Q_2	$Q_{2НОМ}$
№ 1								
№ 2								

6.3. Косвенные методы измерения индуктивности

6.3.1. Определение значения индуктивности L_X без учета собственной емкости катушки производится на основании формулы (1), причем берется $C_K = C_{Э}$, $L_K = L_X$. В результате получаем:

$$L_X = \frac{1}{(2\pi f_p)^2 C_{Э}}. \quad (4)$$

6.3.2. Определение индуктивности L_X , с учетом собственной емкости, а также величины собственной емкости катушки производится на основании формулы (1) с помощью системы двух уравнений, которая составляется с использованием результатов измерений на частотах f_{P1} и f_{P2} . В итоге получаем:

$$\begin{cases} f_{P1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_X(C_{Э1} + C_L)}}, \\ f_{P2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_X(C_{Э2} + C_L)}}. \end{cases} \quad (5)$$

Емкости $C_{Э}$ и C_L считаются включенными параллельно. Решение системы уравнений (5) даст искомые значения:

$$L_X = \frac{k^2 - 1}{(2\pi f_{P1})^2 (C_{Э2} - C_{Э1})}, \quad (6)$$

$$C_L = \frac{C_{Э2} - C_{Э1}k^2}{k^2 - 1}. \quad (7)$$

6.4. Измерение индуктивности катушки прямым методом

Измерение индуктивности катушки прямым методом осуществляется по шкале индуктивности, расположенной между основной и подстроечной шкалами эталонного конденсатора. При этом, значение резонансной частоты следует взять из таблицы, находящейся на передней панели прибора, в соответствии с диапазоном частот, в котором производятся измерения для данной катушки. С помощью регулировки емкости эталонного конденсатора необходимо добиться резонанса, после чего определить значение индуктивности по шкале, умножить его на множитель, взятый из указанной таблицы (для этого диапазона частот), и записать соответствующую единицу измерения (мГн или мкГн).

6.5. Определение резонансных характеристик колебательного контура

Снятие резонансных характеристик колебательного контура

осуществляется на двух частотах по указанию преподавателя. На подстроечной шкале эталонного конденсатора необходимо установить нулевое значение, с помощью основной регулировки эталонного конденсатора добиться резонанса, а затем с помощью подстроечной регулировки изменять эталонную емкость в пределах $\pm 3\text{пФ}$ и записывать показания куметра в табл. 2. В последние графы таблицы записать значение резонансной частоты и значение емкости по основной шкале эталонного конденсатора. Полученные резонансные характеристики построить на миллиметровке или бумаге.

6.6. Измерение емкости конденсатора и тангенса угла потерь методом замещения.

Измерение емкости C_X конденсатора выполняется методом замещения. Для этого необходимо, установив заданную преподавателем частоту, подключить измеряемый конденсатор C_X к клеммам "3-4" прибора "Q", затем с помощью основной регулировки эталонного конденсатора добиться резонанса и записать полученные значения эталонной емкости $C_{Э1}$ и добротности Q_1 . После этого отключить исследуемый конденсатор, снова добиться резонанса и записать полученные значения $C_{Э2}$ и Q_2 .

Таблица 2

ΔC	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	0	1	1,5	2	2,5	3	f_P	$C_{Э}$
Q_1													
Q_2													

Так как резонансная частота и индуктивность контура при обоих измерениях остались неизменными, то $C_{Э2} = C_{Э1} + C_X$, откуда

$$C_X = C_{Э2} - C_{Э1} . \quad (10)$$

Метод измерения тангенса угла потерь основан на изменении добротности контура при подключении к нему конденсатора с диэлектриком, в котором имеются потери. Тангенс угла потерь определяется по формуле:

$$tg \delta_{C_X} = \frac{(Q_1 - Q_2)(C_{Э1} + C_{Э2})}{Q_1 Q_2 (C_{Э2} - C_{Э1})} . \quad (11)$$

6.7. Измерение высокоомных сопротивлений методом вариации добротностей

При подключении измеряемого резистора к клеммам "3-4" прибора "Q", он оказывается включенным параллельно эталонному конденсатору, что приводит к возрастанию потерь в контуре и, следовательно, к уменьшению его добротности. Поскольку резистор обладает также и паразитной емкостью, его подключение повлияет не только на добротность, но и на резонансную частоту контура. Измерение проводится аналогично пункту 6.6, только вместо внешнего конденсатора к клеммам "3-4" подключается резистор. Кроме того, необходимо записать значение

резонансной частоты, на которой проводилось измерение. Сопротивление R_X , рассчитывается по формуле:

$$R_X = \frac{Q_1 Q_2}{(Q_2 - Q_1)(C_{Э2} - C_{Э1})2\pi f_P}. \quad (12)$$

6.8. Оценка погрешностей измерений

6.8.1. Оценка погрешности измерения добротности

С помощью прибора “Q” фактически измеряется добротность колебательного контура Q_K , на которую помимо добротности катушки Q_L влияют потери в эталонном конденсаторе и выходное сопротивление генератора R_0 . Потерями в эталонном конденсаторе можно пренебречь ввиду их малости. Для оценки погрешности добротности катушки, возникающей из-за выходного сопротивления генератора, используется соотношение:

$$Q_K = \frac{Q_L}{1 + R_0/R_L}.$$

Абсолютная погрешность измерения добротности равна разности измеренного значения добротности Q_K и истинного значения добротности Q_L

$$\Delta Q_L = Q_K - Q_L = \frac{Q_L}{1 + R_0/R_L} - Q_L = \frac{-Q_L R_0/R_L}{1 + R_0/R_L}.$$

Учитывая, что $R_0/R_L \ll 1$, величину относительной погрешности измерения Q_L можно представить в виде

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q_L}{Q_L} = -\frac{R_0}{R_L}.$$

Определив величину омического сопротивления катушки R_L по формуле $R_L = 2\pi f_P L_X / Q_K$ и приняв $R_0 = 0,05$ Ом, необходимо вычислить величину первой составляющей погрешности

$$\delta_1 = \frac{R_0}{R_L} 100\%.$$

Вторая составляющая погрешности обусловлена выходным измерительным прибором “Q” и оценивается по формуле:

$$\delta_2 = \frac{Q_{MAX}}{Q} \gamma,$$

где γ -класс точности прибора, равный 1,5%, Q_{MAX} - предельное значение шкалы прибора, Q - измеренное значение добротности.

Остальные источники погрешности (генератор, прибор “Уровень”) создают погрешность δ_3 порядка 2%.

Результирующая относительная погрешность измерения добротности катушки δ_Q определяется по формуле, получаемой из общей формулы для погрешности при косвенных измерениях :

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (8)$$

При этом учитывается, что три составляющие погрешности являются независимыми друг от друга (не коррелированными).

6.8.2. Определение погрешности измерений индуктивности косвенным методом

Величина погрешности δ_L рассчитывается по формуле, получаемой аналогично формуле (8)

$$\delta_L = \sqrt{4\delta_f^2 + \delta_{CЭ}^2} \quad (9)$$

где δ_f - погрешность установки частоты генератора, обычно принимаемая равной 1%, $\delta_{CЭ}$ - погрешность установки емкости эталонного конденсатора, вычисляемая по формуле:

$$\delta_{CЭ} = \frac{\Delta CЭ}{CЭ} 100\%$$

где $\Delta CЭ$ - цена одного деления основной шкалы эталонного конденсатора.

После вычислений относительных погрешностей δ_Q и δ_L записать результаты измерений добротности и индуктивности по форме: $Q_X = Q_{ИЗМ} \pm \Delta Q$; $L_X = L_{ИЗМ} \pm \Delta L$, где ΔQ и ΔL – абсолютные погрешности соответственно добротности и индуктивности.

Погрешности измерений емкости конденсатора и сопротивления резистора в данной работе не оцениваются.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является ознакомление с осциллографическими методами измерения фазового сдвига между двумя синхронными гармоническими напряжениями и получение практического навыка поверки шкалы фазометра с помощью калибратора фазы.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает:

- двухлучевой осциллограф типа С1-83 (или другой двухканальный или двухлучевой осциллограф);
- прямопоказывающий двухканальный фазометр типа Ф2-1;
- калибратор фазы типа Ф1- 4;
- низкочастотный генератор синусоидального напряжения типа ГЗ - 109 или аналогичный;

- макет фазосдвигающей цепи, состоящей из резистора R с сопротивлением $3,3 \text{ к}\Omega$ и конденсатора C с емкостью $0,047 \text{ мкФ}$.

На рис. 1 приведены схемы лабораторной установки для случаев интегрирующей (рис. 1,а) и дифференцирующей (рис. 1, б) фазосдвигающих цепей. На схемах показаны генератор синусоидального сигнала ГС и измеритель фазового сдвига ИФ, в качестве которого может применяться фазометр или осциллограф.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

3.1. Изучить:

- а) осциллографические методы измерения фазового сдвига;
- б) принцип работы прямопоказывающего фазометра.

3.2. Ознакомиться со статистическими методами обработки результатов измерений.

4. ЗАДАНИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Измерить фазовый сдвиг синусоидальных напряжений на выходах калибратора фазы для 6 значений фазового сдвига в диапазоне от 0 до 180° , зарисовывая при этом в масштабе получаемое на экране осциллографа изображение (для каждого значения фазового сдвига измерение проводить 1 раз):

а) с помощью двухканального осциллографа в режиме линейной развертки;

б) с помощью осциллографа в режиме синусоидальной развертки.

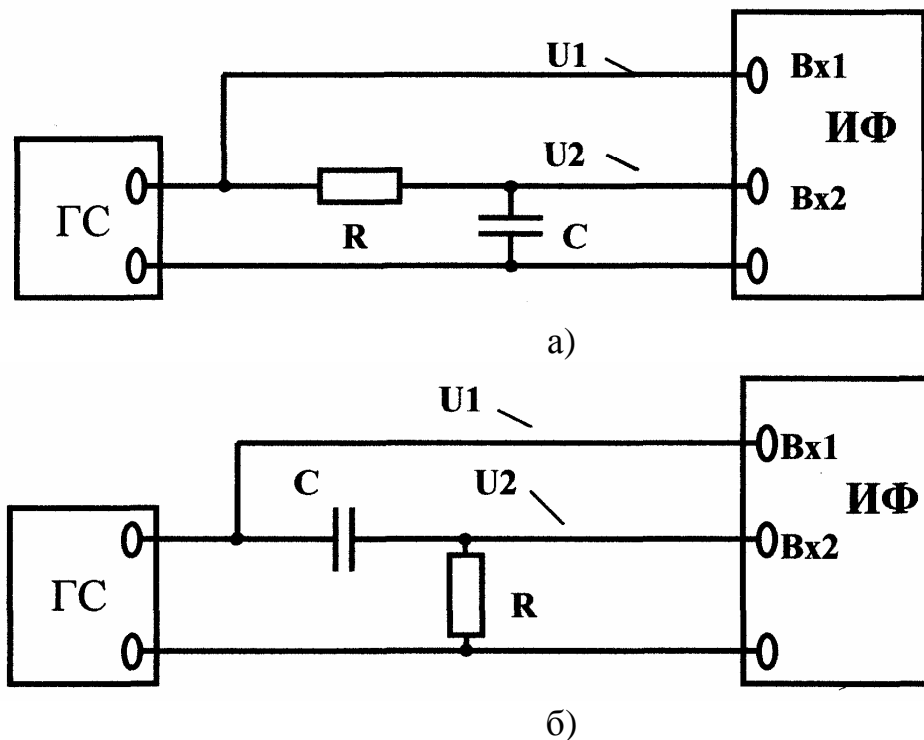


Рис. 1. Измерение фазового сдвига в интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) цепях

4.2. Измерить фазовый сдвиг, создаваемый интегрирующей цепью на заданной преподавателем частоте:

а) с помощью двухканального осциллографа в режиме линейной развертки;

б) с помощью осциллографа в режиме синусоидальной развертки;

в) с помощью прямопоказывающего фазометра.

4.3. Провести те же измерения на той же частоте, но для дифференцирующей цепи.

4.4. Провести поверку шкалы фазометра с помощью калибратора фазы и определить приведенную погрешность этого прибора.

4.5. Выполнить статистическую обработку результатов измерения осциллографическими методами, полученных в пп. 4.2 и 4.3.

4.6. Сопоставить измеренные значения фазового сдвига интегрирующей и дифференцирующей цепей с расчетными.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. В чем заключается способ измерения разности фаз с помощью осциллографа в режиме линейной развертки и каковы источники его погрешностей?

5.2. В чем заключается способ измерения разности фаз с помощью осциллографа в режиме синусоидальной развертки и каковы источники его погрешностей?

5.3. В чем заключается метод преобразования фазового сдвига во временной интервал и каковы источники его погрешностей?

5.4. Каковы ограничения рабочих частот фазометра, работающего на принципе преобразования фазового сдвига во временной интервал?

5.5. Что такое приведенная погрешность прибора и как определить ее величину?

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

6.1. Осциллографические способы измерения фазового сдвига.

6.1.1. Измерение фазового сдвига с помощью двухканального осциллографа в режиме линейной развертки (метод наложения).

Измерение фазового сдвига между двумя исследуемыми синусоидальными напряжениями в режиме линейной развертки осуществляется с помощью двухканального универсального осциллографа следующим образом:

а) подключить осциллограф к исследуемой схеме, как показано на рис.2. Установить переключатели режимов работы осциллографа в следующие положения: каналов вертикального отклонения ПООЧЕРЕДНО, развертка - А, синхронизация развертки А - ВНЕШНЯЯ:

б) изменяя период развертки с помощью переключателя "ВРЕМЯ/ДЕЛ.", получить на экране 2-3 периода синусоидальных напряжений и зарисовать полученную осциллограмму (рис.3,а);

в) измерить отрезки АБ и АВ. Измерения провести многократно (5 - 7) раз, меняя масштаб по оси Х с помощью ступенчатой и плавной регулировок "ВРЕМЯ/ДЕЛ" (так как фазовый сдвиг определяется как отношение отрезков, точное задание масштаба по оси Х не требуется);

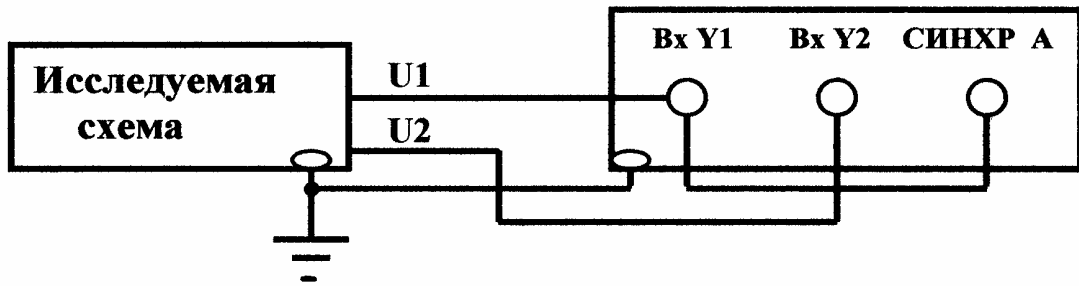


Рис.2. Измерение фазового сдвига с помощью двухканального осциллографа в режиме линейной развертки

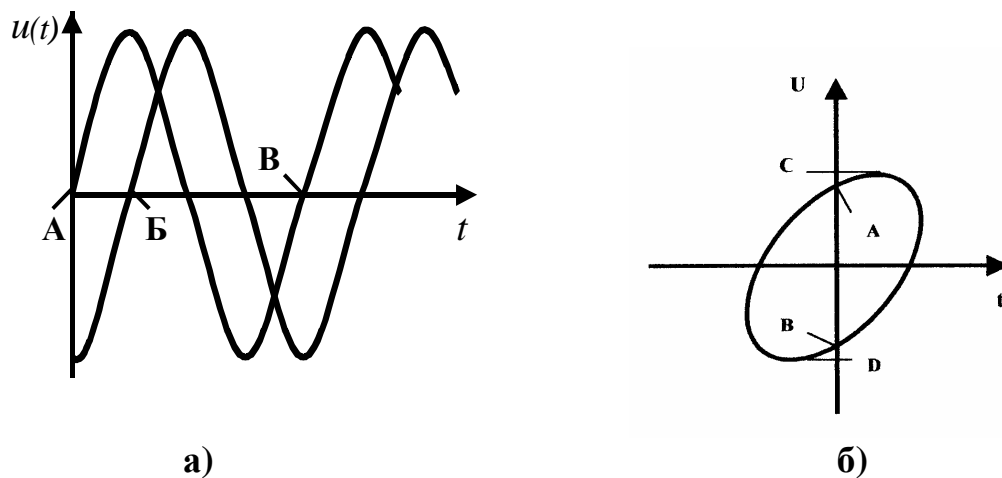


Рис.3. Методы измерения фазового сдвига с помощью осциллографа

г) вычислить для каждого измерения величину фазового сдвига по формуле:

$$\varphi = \frac{A B}{A B} 360^\circ$$

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 1.

д) оценить величину случайной погрешности при измерении фазового сдвига.

Случайная погрешность при измерении фазового сдвига осциллографическими методами возникает за счет неточности измерения длин отрезков на экране осциллографа и конечной ширины следа луча.

Таблица 1

№№ п.п.	АБ, мм	АВ, мм	φ_i , град	$\bar{\varphi}$, град	$\Delta\varphi_i$, град	σ , град	σ_{cp} , град	M_φ , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
·								
·								
n								

Порядок расчетов для оценки величины случайной погрешности следующий:

- рассчитать среднее значение фазового сдвига по формуле

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_i \varphi_i}{n}$$

и записать полученное значение в графу 5 табл. 1;

- для каждого замера вычислить отклонение его результата от среднего значения

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \bar{\varphi}$$

и записать полученные результаты в соответствующие строки графы 6 табл.1;

- вычислить среднеквадратическое отклонение результата одного измерения по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta\varphi_i^2}{n-1}}$$

и записать результат в графу 7 табл. 1;

- вычислить оценку среднеквадратической погрешности среднего значения по серии из n измерений по формуле

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

и записать результат в графу 8 табл. 1;

- вычислить оценку максимальной случайной погрешности по формуле $M = 3\sigma_{cp}$ и записать ее в графу 9 табл. 1.

Записать результат измерения по форме $\varphi_x = \bar{\varphi} \pm M$.

6.1.2. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа в режиме синусоидальной развертки (метод эллипса)

Измерение фазового сдвига между двумя исследуемыми напряжениями с помощью осциллографа в режиме синусоидальной развертки осуществляется следующим образом:

а) исследуемые сигналы (u_1, u_2) подать на входы вертикального (YI) и горизонтального (X) отклонений. Переключить режим каналов Y в положение YI, режим развертки - в положение "Вход X". Зарисовать полученную осциллограмму (рис. 3, б).

б) измерить отрезки АВ (расстояние между точками пересечения эллипса с вертикальной, осью) и CD (максимальное отклонение от вертикали). Измерения провести 5 - 6 раз, изменяя усиление по оси Y и смещения по осям Y и X;

в) вычислить для каждого измерения фазовый сдвиг по формуле:

$$\varphi = \arcsin \frac{AB}{CD} .$$

Результаты измерений и вычислений записать в табл. 2.

Обработка результатов для оценки случайной погрешности осуществляется так же, как описано в п.6.1.1.д.

Таблица 2

№№ п.п.	АВ, мм	CD, мм	φ_i , град	$\bar{\varphi}$, гр ад	$\Delta\varphi_i$, град	σ , град	σ_{cp} , град	M_φ , град
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
·								
n								

Записать результаты измерения по форме $\varphi_x = \bar{\varphi} \pm M$.

6.2 Измерение фазового сдвига с помощью прямопоказывающего фазометра.

- а) подключить фазометр к исследуемой схеме в соответствии с рис. 1;
- б) выбрать режим работы фазометра "Опережение" или "Отставание" и диапазон измеряемого значения фазы;
- в) записать измеренное значение.

6.3. Проверка шкалы фазометра

Проверка шкалы фазометра осуществляется с помощью калибратора фазы Ф1-4 на частоте 1 кГц при нулевом ослаблении выходных напряжений обоих сигналов калибратора следующим образом.

6.3.1. Перед проверкой прогреть калибратор Ф1-4 в течение 30 минут.

6.3.2. Соединить фазометр и калибратор фазы с помощью кабелей.

6.3.3. Установить частоту 1 кГц выходных напряжений калибратора фазы, для этого нажать несколько раз и отпустить кнопку требуемого поддиапазона " кГц". При этом на световом табло индицируется установленное значение частоты.

6.3.4. Задавать последовательно дискретные значения фазового сдвига от 0° до 180° с шагом 10° на индикаторе калибратора фазы и записывать показания калибратора и показания фазометра в табл.3.

Таблица 3

№ п.п	Измеренное значение фазового сдвига по шкале фазометра	Показания калибратора фазы	Абсолютная Погрешность $\Delta\varphi_i$
1			
·			
·			
n			

6.3.5. Оценка приведенной погрешности фазометра.

Приведенная погрешность находится по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{\varphi_{\text{ном}}} * 100\% ,$$

где $\Delta\varphi_{\max}$ - максимальное значение абсолютной погрешности во всем диапазоне изменения фазового сдвига; $\varphi_{\text{ном}}$ - номинальное значение фазового сдвига, равное 180° .

6.4. Расчет величины фазового сдвига для интегрирующей и дифференцирующей цепей

Синусоидальное напряжение на выходе интегрирующей цепи отстает по фазе от напряжения на входе цепи на величину

$$\Delta\varphi = \text{arctg}(\omega RC) .$$

Синусоидальное напряжение на выходе дифференцирующей цепи опережает по фазе напряжение на входе цепи на величину

$$\Delta\varphi = \text{arctg}(1/\omega RC) .$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 **ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛЬТМЕТРОВ** **РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление студентов с основными техническими характеристиками вольтметров разных типов и особенностями их применения.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В состав лабораторной установки входят:

1) Щитовой электромеханический вольтметр электромагнитной системы типа ЭЗО;

2) Электронный аналоговый вольтметр типа В7-26 с преобразователем максимального (амплитудного) значения, проградуированный в действующих значениях синусоидального напряжения;

3) Электронный цифровой вольтметр типа В7-16 с преобразователем средневыпрямленного значения, проградуированный в действующих значениях синусоидального напряжения, и с АЦП времяимпульсного преобразования;

4) Макет электронного аналогового вольтметра с преобразователем действующего значения, проградуированный в действующих значениях синусоидального напряжения;

5) Генератор синусоидального напряжения низкой частоты типа ГЗ-109;

6) Генератор прямоугольных импульсов типа Г5-54;

7) Магазин сопротивлений;

8) Колодка с двумя рядами гнезд.

На колодке гнезда одного ряда предназначены для подключения корпусов (общих шин) приборов, а гнезда другого ряда для подключения сигнальных входов или выходов приборов. При выполнении соединений необходимо внимательно следить за правильностью подключения проводов к гнездам нужного ряда. КОРПУСА ВСЕХ ПРИБОРОВ, ИМЕЮЩИХ СЕТЕВОЕ ПИТАНИЕ, ДОЛЖНЫ БЫТЬ ЗАЗЕМЛЕНЫ. У щитового вольтметра и магазина сопротивлений оба вывода равнозначны, а заземление этих приборов не требуется.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

Ознакомиться по учебным пособиям с принципами действия исследуемых в работе вольтметров и их основными характеристиками.

Внимательно изучить теоретический материал, помещенный в Приложении. Подготовить соответствующие таблицы и выписать формулы, необходимые для вычислений. Ответить на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Объяснить понятия аддитивной и мультипликативной составляющих погрешностей. В каких приборах преобладает аддитивная погрешность?

4.2. Как указываются параметры погрешности цифровых вольтметров?

4.3. Для каких приборов класс точности определяется по основной приведенной погрешности?

4.4. Как определяется вариация показаний прибора?

4.5. Напишите аналитические формулы для среднего, средневыпрямленного и действующего (эффективного) значений переменного напряжения.

4.6. Какими коэффициентами описываются связи между действующим, средневыпрямленным и амплитудным значениями переменного напряжения?

4.7. На какие параметры переменного напряжения могут реагировать вольтметры, имеющие в своем составе преобразователи переменного тока в постоянный?

4.8. Каковы особенности градуировки приборов с преобразователями амплитудного и средневыпрямленного значений, если они предназначены для измерения действующего значения синусоидального сигнала?

4.9. Чем определяются частотные зависимости вольтметров различных типов? Объяснить характер частотной зависимости вольтметра Э30.

5. ЗАДАНИЕ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

5.1. Произвести поверку электронного аналогового вольтметра с помощью цифрового вольтметра. Определить экспериментально класс точности поверяемого прибора и вариацию показаний.

5.2. Снять частотные характеристики исследуемых приборов при синусоидальном измеряемом напряжении. Построить графики, отображающие зависимости показаний вольтметров от частоты переменного напряжения.

5.3. Определить входные сопротивления указанных преподавателем приборов и подсчитать максимальную мощность, потребляемую приборами от источника измеряемого напряжения в исследуемом диапазоне измеряемых напряжений.

5.4. Исследовать зависимости показаний приборов от формы сигнала. Произвести вычисления, объясняющие эти зависимости.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

6.1. Поверка и определение класса точности вольтметра

6.1.1 Поверка прибора производится по схеме, представленной на рис. 1. В качестве поверяемого вольтметра V_1 используется электронный аналоговый вольтметр со стрелочным отсчетом, в качестве образцового V_2 - цифровой вольтметр.



Рис.1. Блок-схема эксперимента по поверке вольтметра

Поверка прибора производится на частоте 1000 Гц следующим образом. Плавно меняя уровень выходного напряжения генератора, необходимо последовательно устанавливать стрелку поверяемого прибора на делениях, около которых имеются числа на заданном преподавателем пределе измерения, записывая при этом показания поверяемого и образцового приборов в табл.1. Напряжение изменяется в диапазоне от нуля до максимального значения шкалы поверяемого прибора $U_{кл}$.

Затем аналогичные операции выполняются при плавном уменьшении напряжения от максимального значения до нуля. Показания снимаются для тех же точек шкалы поверяемого прибора, что и при увеличении напряжения. Абсолютная погрешность для каждого значения шкалы поверяемого прибора определяется как разность показаний поверяемого и образцового приборов.

Таблица 1

№ п. п.	Показания поверяемого прибора, В	Показания образцового прибора, В		Абсолютная погрешность, В		Вариация показаний $Var_{отн}, \%$
		При возрастании	При убывании	При возрастании	При убывании	

6.1.2. Определить класс точности электронного стрелочного вольтметра по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta_{\max}}{U_{к1}} \cdot 100\%$$

где Δ_{\max} - максимальная (по модулю) абсолютная погрешность, наблюдавшаяся при поверке; $U_{к1}$ - конечная отметка шкалы поверяемого прибора (номинальное значение напряжения).

Величина γ является основной приведённой погрешностью. По полученной приведённой погрешности класс точности выбирается из ряда предпочтительных цифр.

6.1.3. Построить график зависимости относительной погрешности от величины измеренного напряжения U на данном пределе измерений поверяемого вольтметра, вычисляя относительную погрешность по формуле

$$\delta_1 = \frac{\Delta_{\max}}{U} \cdot 100\%$$

Построить график зависимости максимальной относительной погрешности от величины измеренного напряжения U для цифрового вольтметра, вычисляя относительную погрешность по формуле

$$\delta_2 = \pm \left[0,5 + 0,05 \left(\frac{U_{к2}}{U} - 1 \right) \right] \%$$

где $U_{к2}$ - конечное значение шкалы цифрового вольтметра, а смысл остальных параметров разъясняется в Приложении 2.

6.1.4. Вычислить абсолютную и относительную вариации показаний.

Под абсолютной вариацией понимается разность показаний образцового прибора в данной точке шкалы поверяемого прибора при медленном подходе к ней со стороны меньшего и большего значений (при возрастании и убывании) $Var = U_{обр\uparrow} - U_{обр\downarrow}$. Относительная вариация для каждой точки шкалы определяется по формуле

$$Var_{отн} = \frac{Var}{U} \cdot 100\%$$

6.2. Исследование зависимостей показаний вольтметров от частоты синусоидального напряжения

Исследуемые вольтметры подключить к измерительному генератору синусоидального напряжения в соответствии с рис. 2, где V_1 - электронный аналоговый вольтметр В7-26, V_2 - электронный цифровой вольтметр В7-16, V_3 - макет электронного аналогового вольтметра с преобразователем действующего значения, V_4 - электромагнитный вольтметр Э30.

По электронному аналоговому вольтметру В7-26 установить уровень напряжения в пределах 70 - 90 В и поддерживать его постоянным во время проведения опыта. Частоту менять в соответствии с табл. 2.

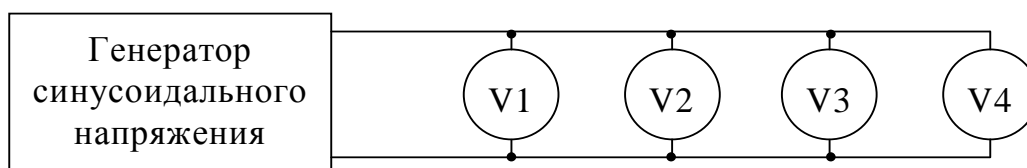


Рис.2. Блок-схема исследования частотных характеристик вольтметров

Таблица 2

Показания приборов, В	Частота Гц.				
	50	100	300	500	1000
U_1					
U_2					
U_3					
U_4					

Затем отключить электромагнитный вольтметр V_4 и продолжить снятие частотных характеристик цифрового вольтметра V_2 и макета аналогового вольтметра V_3 при том же уровне входного напряжения в диапазоне частот, указанных в табл. 3.

По полученным данным построить графики частотных зависимостей показаний для всех исследуемых вольтметров.

Таблица 3

Показания приборов В	Частота кГц					
	2	5	10	20	50	100
U_1						
U_2						
U_3						

6.3. Определение мощности, потребляемой вольтметром от цепи, в которой измеряется напряжение

Для проведения эксперимента собирается схема по рис. 3, на которой V_1 - электронный стрелочный вольтметр В7-26, используемый в качестве вспомогательного; R_M - магазин сопротивлений; V_x - исследуемый вольтметр (цифровой или электромагнитный).

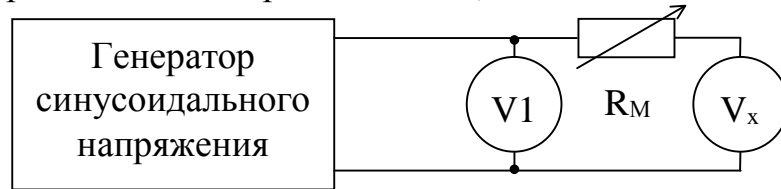


Рис.3. Блок-схема опыта по определению мощности, потребляемой вольтметром от цепи, в которой измеряется напряжение

Измерения проводятся на частоте 50 Гц для двух вольтметров: цифрового и электромагнитного. По вольтметру V_1 устанавливается напряжение $U_1=100$ В. Изменяя сопротивление магазина R_M , добиться, чтобы величина напряжения U_x стала равна 50 -70 % от U_1 , и записать значение R_M . Рассчитать входное сопротивление исследуемого прибора R_x

по формуле
$$R_x = \frac{U_x}{U_1 - U_x} \cdot R_M$$

Зная входное сопротивление прибора можно определить максимальную мощность, потребляемую от измерительной цепи, по

формуле
$$P = U_k^2 / R_x$$
,

где U_k - конечное значение шкалы исследуемого вольтметра V_x .

6.4. Исследование влияния формы сигнала на показания вольтметров

6.4.1. Снятие показаний вольтметров

Исследуемые вольтметры подключить к измерительному генератору импульсного напряжения в соответствии с рис. 4. где V_1 - электронный аналоговый вольтметр В7-26, V_2 - электронный цифровой вольтметр В7-16, V_3 - макет электронного аналогового вольтметра с преобразователем действующего значения.

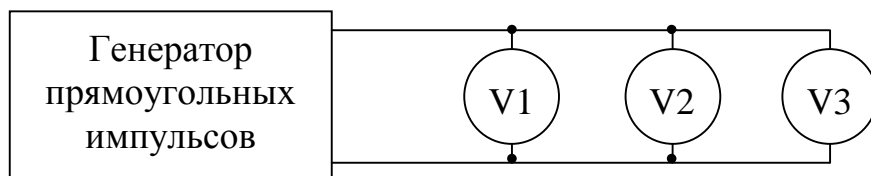


Рис.4. Блок-схема опыта по исследованию влияния формы напряжения на показания вольтметров

С выхода генератора прямоугольных импульсов подать сигнал на вольтметры. Амплитуду импульсов U_p установить в интервале от 20 до 50 В, а длительность τ - от 15 до 20 мкс. Положительную или отрицательную полярность импульсов установить по указанию преподавателя. Задавая значения частоты повторения импульсов, указанные в табл. 4, записывать показания трех вольтметров в соответствующие графы этой таблицы.

Таблица 4

Частота, Гц	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$U_{1\text{pc}}, В$	$U_{2\text{pc}}, В$	$U_{3\text{pc}}, В$
100						
300						
1000						
2000						
3000						
20000						

Затем, не меняя полярность и амплитуду импульсов, установить частоту 1000 Гц и, задавая значения длительности импульсов, указанные в табл. 5, записывать показания вольтметров в соответствующие графы этой таблицы.

Таблица 5

Длительность, мкс	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$U_{1\text{pc}}, В$	$U_{2\text{pc}}, В$	$U_{3\text{pc}}, В$
10						
30						
50						
100						
200						
300						

6.4.2. Выполнение расчетов и обработка результатов измерений

При обработке результатов необходимо найти расчетные зависимости показаний вольтметров с преобразователями амплитудного, средневыпрямленного и действующего значений переменного напряжения от частоты и длительности импульсов. Определение параметров переменных напряжений и сведения о градуировке вольтметров даны в Приложении 2.

Импульсы, поступающие с генератора, показаны на рис. 5, а и 6, а. Так как на входах вольтметров переменного напряжения имеются

разделительные конденсаторы, отсекающие постоянную составляющую, на входы преобразователей переменного напряжения в постоянное в электронных вольтметрах поступает только переменная составляющая напряжения, как показано на рис. 5, б и 6, б. При этом площади положительной и отрицательной полуволн (S_1 и S_2) в каждом периоде сигнала должны быть равны (условие отсутствия постоянной составляющей).

Для импульсов положительной полярности с амплитудой U_p имеем:

$$U^+ \tau = U^- (T - \tau), \quad U_p = U^+ + U^-, \quad \text{откуда получается:}$$

$$U^+ \tau = (U_p - U^+) (T - \tau), \quad U^- = U_p \tau / T, \quad U^+ = U_p (1 - \tau / T)$$

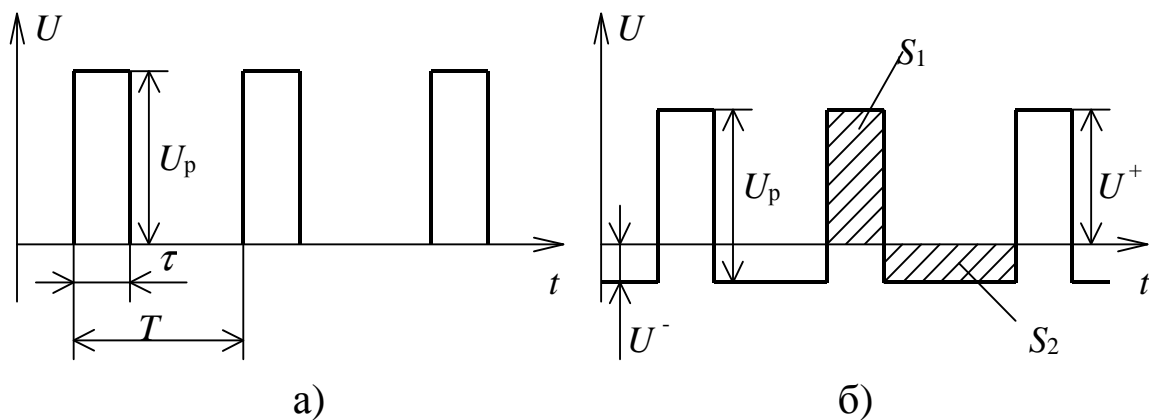


Рис.5. Форма импульсного сигнала (а) и его переменной составляющей (б) для положительной полярности импульсов

Для импульсов отрицательной полярности (рис.6) соответствующие формулы принимают вид:

$$U^+ (T - \tau) = U^- \tau, \quad U_p = U^- + U^+,$$

$$U^- = U_p (1 - \tau / T), \quad U^+ = U_p \tau / T$$

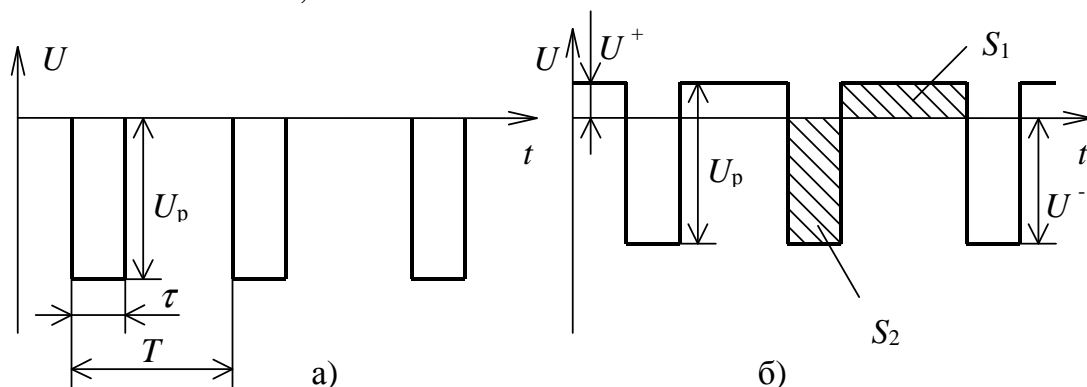


Рис.6. Форма импульсного сигнала (а) и его переменной составляющей (б) для отрицательной полярности импульсов

Вольтметр с преобразователем амплитудного значения реагирует на максимальную величину напряжения $U_{\text{макс}}$ на входе. Для импульсов положительной полярности $U_{\text{макс}}=U^+$, а для импульсов отрицательной полярности $U_{\text{макс}}=U^-$. С учетом ранее полученных выражений для U^+ и U^- , расчетные показания вольтметра с преобразователем амплитудного значения для импульсов любой полярности могут быть найдены из формулы

$$U_{1\text{pc}} = \frac{1}{1,41} U_p \left(1 - \frac{\tau}{T} \right),$$

1,41 – коэффициент амплитуды синусоидального напряжения, который необходимо учитывать, так как вольтметры градуируются так, чтобы при подаче на них синусоидального напряжения, они показывали действующее значение этого напряжения.

Расчетные значения показаний вольтметра с преобразователем средневывпрямленного значения находятся по формуле $U_{2\text{pc}}=1,11U_{\text{св}}$, где величина 1,11 - коэффициент формы синусоидального сигнала;

$$U_{\text{св}} = \frac{U^+}{T} \tau + \frac{U^-}{T} (T - \tau) \quad \text{- для положительных импульсов;}$$

$$U_{\text{св}} = \frac{U^+}{T} (T - \tau) + \frac{U^-}{T} \tau \quad \text{- для отрицательных импульсов.}$$

Подставляя в эти формулы выражения для U^+ и U^- , получаем для импульсов любой полярности

$$U_{\text{св}} = 2 \frac{\tau}{T^2} (T - \tau) \cdot U_p$$

$$U_{2\text{pc}} = 2,22 \frac{\tau}{T^2} (T - \tau) \cdot U_p$$

Отсюда получаем

Расчетные значения $U_{3\text{pc}}$ показаний вольтметра с преобразователем действующего значения для импульсов любой полярности находятся по формуле

$$U_{3\text{pc}} = U_p \sqrt{\frac{\tau}{T} \sqrt{\left(1 - \frac{\tau}{T} \right)^2 + \frac{\tau}{T} \left(1 - \frac{\tau}{T} \right)}} = U_p \sqrt{\frac{\tau}{T} \sqrt{1 - \frac{\tau}{T}}}$$

После выполнения расчетов необходимо построить графики расчетных и экспериментальных зависимостей показаний всех вольтметров от частоты импульсов (на одном рисунке) и графики расчетных и экспериментальных зависимостей показаний всех вольтметров от длительности импульсов (на другом рисунке).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

МОСТОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление студентов с мостовыми методами измерения параметров элементов цепей.

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает в себя:

- 1) Измеритель L, C, R универсальный типа Е7-11;
- 2) Макет с элементами L, C, R для проведения измерений. Схема макета приведена на рис.1. В состав макета входят дроссель с ферромагнитным сердечником $L2$, катушка индуктивности без ферромагнитного сердечника $L1$ с подключенными к ней резисторами $R1..R3$, конденсаторы $C1..C5$ разных типов и емкостей, резисторы $R4..R8$ с различными величинами сопротивлений.

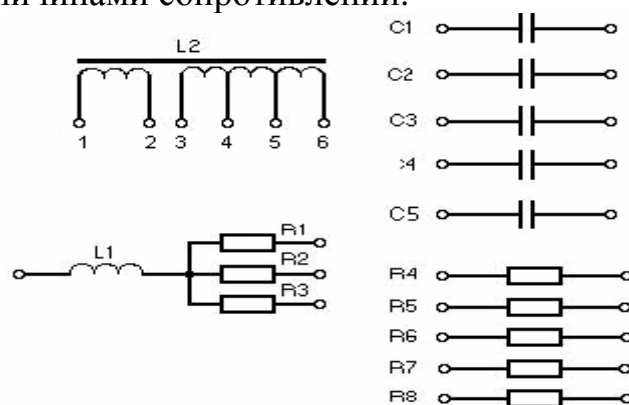


Рис.1. Схема макета

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

3.1. Внимательно изучить по рекомендованной литературе мостовые методы измерения параметров элементов цепей со сосредоточенными постоянными.

3.2. Ознакомиться с описанием измерителя Е7-11, приведенным в Приложении.

3.3. Подготовить соответствующие таблицы и выписать формулы, необходимые для вычислений.

Ответить на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Нарисовать схему моста для измерения комплексных сопротивлений. Написать в общем виде условия равновесия для такого моста:

- а) для чисто активных сопротивлений во всех плечах моста;
- б) для комплексных сопротивлений в двух плечах моста и активных сопротивлений в других двух плечах моста.

4.2. Нарисовать схему моста для измерения индуктивности при параллельном включении элементов. Написать соотношения для определения L_X, R_X, Q_X .

4.3. Нарисовать схему моста для определения индуктивности при последовательном включении элементов. Написать соотношения для определения L_X, R_X, Q_X .

4.4. Нарисовать схему моста для определения емкости при последовательном включении элементов. Написать соотношения для определения $C_X, R_X, tg \delta_X$.

4.5. Нарисовать схему моста для определения емкости при параллельном включении элементов. Написать соотношения для определения $C_X, R_X, tg \delta_X$.

5. ЗАДАНИЕ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

5.1. Измерить активные сопротивления резисторов $R4..R8$ на постоянном токе и на частоте 1000 Гц. Оценить погрешности измерений.

5.2. Измерить емкости и значения тангенсов углов потерь и добротностей конденсаторов $C1..C5$. Оценить погрешности измерений.

5.3. Измерить индуктивность и добротность катушки $L1$ на частоте 1000 Гц. Оценить погрешности измерений. По полученным данным определить величину активного сопротивления катушки.

5.4. Измерить активное сопротивление катушки $L1$ на постоянном токе и на частоте 1000 Гц. Сопоставить полученные значения с величиной активного сопротивления, найденного в п.5.3. и дать им объяснение. Нарисовать эквивалентную схему катушки и построить для нее векторные диаграммы тока и напряжений.

5.5. Измерить на частоте 1000 Гц индуктивность и добротность цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки $L1$ и одного из резисторов $R1..R3$ по указанию преподавателя. Отдельно измерить сопротивление этого резистора на постоянном токе и на частоте 1000 Гц. Используя данные п.5.3, рассчитать ожидаемое значение добротности цепи и сопоставить с результатом опыта.

5.6. Измерить индуктивность и добротность дросселя $L2$ между выводами 1 и 2 на частоте 100 Гц. Определить по этим данным величину активного сопротивления дросселя.

5.7. Измерить величину активного сопротивления дросселя $L2$ на постоянном токе и на частоте 100 Гц. Сопоставить результаты измерений с величиной сопротивления, полученной в п.5.6. Объяснить полученные результаты.

6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

6.1. Измерение активного сопротивления на постоянном и на переменном токах.

Переключатель вида измерения " L, C, R, R_+ " измерителя E7-11 установить в нужное положение. При измерении на переменном токе установить заданное значение частоты. Переключатель "ПРЕДЕЛЫ" поставить в крайнее левое положение. На шкалах "МНОЖИТЕЛЬ" выставить значение 1,090. Ручку "ЧУВСТВИТ." поставить в среднее положение.

Выбрать нужный предел. Для этого последовательно переводить ручку "ПРЕДЕЛЫ" на одно деление по часовой стрелке, пока знак напряжения разбаланса на индикаторе баланса не изменится на противоположный, Это и будет нужный для измерения предел.

Уравновесить мост вращением ручек "МНОЖИТЕЛЬ", постепенно увеличивая чувствительность до уровня, обеспечивающего заметную индикацию разбаланса при изменении положения ручек "МНОЖИТЕЛЬ" на величину, соответствующую 1/2 погрешности измерения для данной величины сопротивления. Измеренная величина сопротивления равна произведению отсчета по шкалам "МНОЖИТЕЛЬ" на значение сопротивления, соответствующее выбранному пределу измерения.

Оценка погрешности измерения выполняется в соответствии с таблицей 1.

В формулы для вычислений погрешностей, данные в этой таблице, необходимо подставлять значения сопротивления в Ом, емкостей в Пф, индуктивностей в мкГн.

Результаты измерений сопротивлений и их погрешности представить в виде таблицы, форму которой разработать самостоятельно.

Таблица 1.

Измеряемая величина	Пределы измерений	Основная погрешность
Емкость при $Q > 1$	0,5..1000пФ	$\pm (1 + 20/C)\%$
	1000пФ..10мкФ	$\pm 1\%$
	10...1000 мкФ	$\pm 2\%$
Емкость при $Q < 1$	0,5..1000пФ	$\pm (1 + 20/C + 1/Q)\%$
	1000пФ..10мкФ	$\pm (1+1/Q)\%$
	10...1000 мкФ	$\pm (2+ 1/Q)\%$
Индуктивность при $Q > 1$	0,3..100 мкГн	$\pm (2+10/L)\%$
	100 мкГн..10 Гн	$\pm 1\%$
	10..1000 Гн	$\pm 2\%$
Индуктивность При $Q < 1$	0,3..100 мкГн	$\pm (2+10/L+1/Q)\%$
	100 мкГн..10 Гн	$\pm (1+1/Q)\%$
	10..1000 Гн	$\pm (2+1/Q)\%$
Сопротивление	0,1..10 Ом	$\pm (2+2/R)\%$
	10 Ом..1 МОм	$\pm (1 + 2/R)\%$
	1..10 МОм	$\pm (2+2/R)\%$
Добротность	0,1..30	$\pm (10+0,5Q)\%$
Тангенс угла потерь	0.005..0,1	$\pm (0,1 \operatorname{tg} \delta + 5 \cdot 10^{-3})$

6.2. Измерение емкости, тангенса угла потерь и добротности конденсатора

Переключатель вида измерения " L, C, R_-, R_+ " установить в положение "С". Установить заданное значение частоты. Переключатель "ПРЕДЕЛЫ" поставить в крайнее левое положение. На шкалах "МНОЖИТЕЛЬ" выставить значение 1,090. Ручку "ЧУВСТВИТ." поставить в среднее положение. Переключатель " $Q > 0,5, Q < 0,5, tg \delta$ " установить в положение, соответствующее измеряемой величине.

Выбрать нужный предел. Для этого нажать кнопку "ВЫБОР ПРЕДЕЛА" и последовательно переводить ручку "ПРЕДЕЛЫ" на одно деление по часовой стрелке, пока знак напряжения разбаланса на индикаторе баланса не изменится на противоположный. Это и будет нужный для измерения предел. Отпустить кнопку "ВЫБОР ПРЕДЕЛА".

Уравновесить мост. Для этого уменьшать значение на шкале "МНОЖИТЕЛЬ" до получения минимума показаний индикатора баланса. Найдя минимум, продолжить уравнивание моста с помощью регулировки шкалы. Продолжать уравнивание моста, поочередно используя регулировки "МНОЖИТЕЛЬ" и " Q " или " $tg \delta$ " и постепенно увеличивая чувствительность до уровня, обеспечивающего индикацию разбаланса на 1/2 погрешности измерения для данной величины емкости, пока не будет достигнуто минимальное показание на индикаторе баланса. Следует помнить, что при измерении емкостей и индуктивностей стрелка индикатора баланса отклоняется только в одну сторону.

Измеренная величина емкости равна произведению отсчета по шкалам "МНОЖИТЕЛЬ" на значение емкости, соответствующее выбранному пределу измерения. Если измерения производились на частоте 100 Гц, то результат должен быть увеличен в 10 раз. Значения Q или $tg \delta$ отсчитываются непосредственно по соответствующим шкалам.

Оценка погрешности измерения выполняется в соответствии с таблицей. Результаты измерений параметров конденсаторов и их погрешности представить в виде таблицы, форму которой разработать самостоятельно.

6.3. Измерение индуктивности и добротности катушки

Переключатель вида измерения устанавливается в положение " L ", переключатель " $Q > 0,5, Q < 0,5, tg \delta$ " в положение " $Q > 0,5$ ". Дальнейшие действия аналогичны описанным в п.6.2. В процессе уравнивания моста следует выбрать из положений " $Q > 0,5$ " и " $Q < 0,5$ " то, которое обеспечивает меньший уровень показаний индикатора баланса.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

1. Структурная схема и органы управления и регулировки универсального осциллографа (на примере осциллографа С 1-65)

Структурная схема осциллографа представлена на рис.П.1.

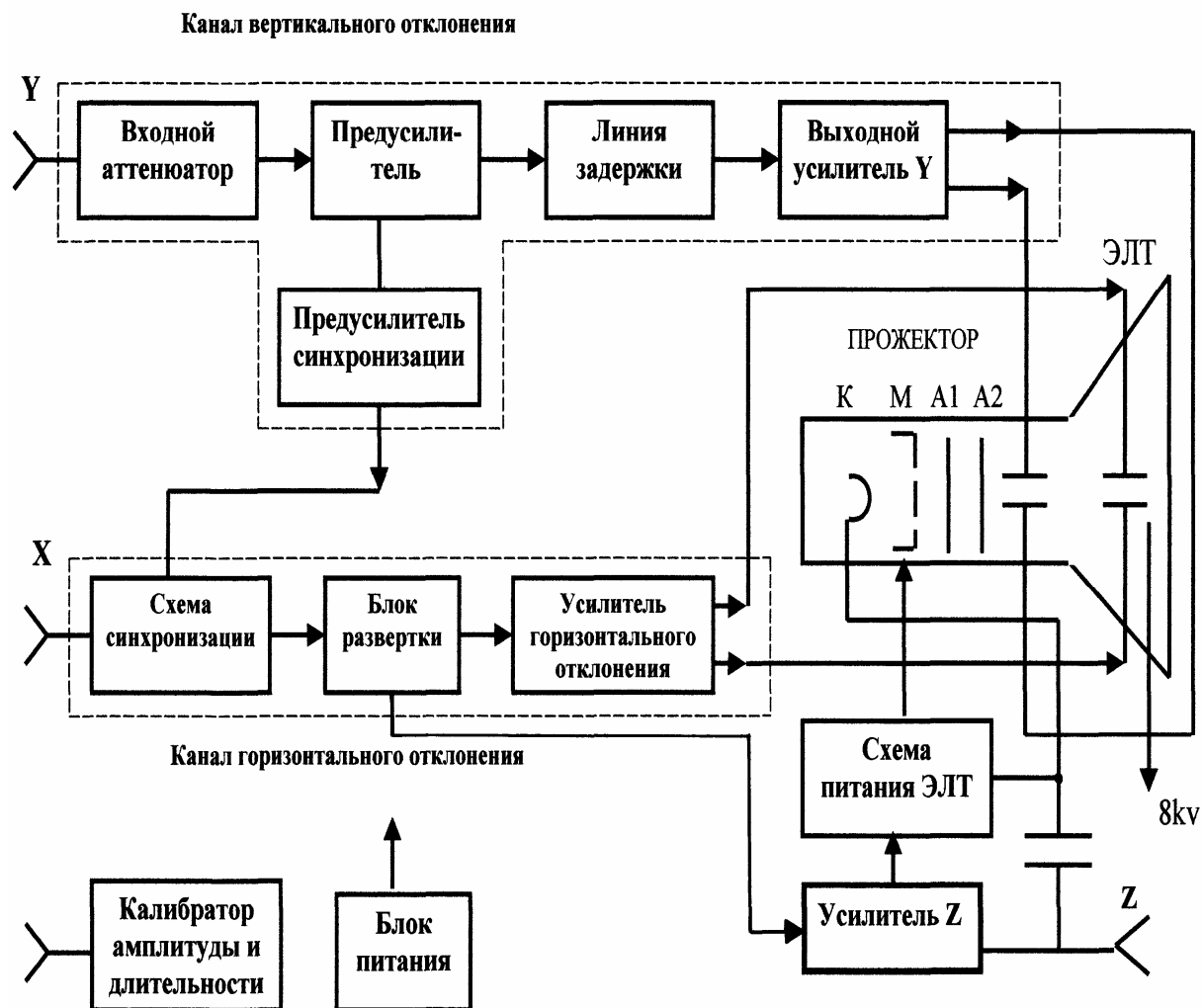


Рис.П.1. Структурная схема осциллографа

Исследуемые сигналы подаются на вход Y.

При помощи входного аттенюатора, переключатель "ВОЛЬТ/ДЕЛ." которого выведен на переднюю панель прибора, задают величину напряжения сигнала в канале Y, удобную для наблюдения на экране ЭЛТ. Далее сигнал усиливается предусилителем, коэффициент которого может плавно изменяться регулировкой, находящейся на той же оси, что и переключатель аттенюатора. В тракт усилителя вертикального отклонения луча включена линия задержки, которая задерживает исследуемый сигнал, подающийся на пластины вертикального отклонения, на время, которое затрачивается на прохождение сигнала в схемах синхронизации, развертки

и т.п. Благодаря этому появляется возможность наблюдать передние фронты импульсов.

Выходной усилитель Y усиливает сигнал до величины, необходимой для получения требуемого отклонения луча в ЭЛТ.

На входе Y имеется переключатель режима входа. В положении " \sim " входной сигнал непосредственно поступает на вход усилителя постоянного тока. При этом можно наблюдать на экране осциллографа постоянную составляющую исследуемого сигнала. В режиме " \sim " входной сигнал проходит на усилитель постоянного тока через разделительный конденсатор. В результате постоянная составляющая отсекается, а наиболее низкочастотные переменные составляющие сигнала ослабляются. В таком режиме удобно наблюдать небольшую переменную составляющую напряжения на фоне большой постоянной составляющей, например, во входных каскадах усилителей.

В канале вертикального отклонения имеются также регулировка смещения по вертикали, подстройка коэффициента усиления предусилителя, используемая при калибровке прибора (этот орган регулировки полуоперативный, т.е. "под отвертку"), и полуоперативная подстройка баланса, с помощью которой добиваются отсутствия смещения прямой линии, получаемой на экране при отключении входного сигнала, при переключениях аттенюатора "ВОЛЬТ/ДЕЛ".

Канал горизонтального отклонения осциллографа содержит схему синхронизации, вырабатывающую импульс для запуска генератора развертки, сам генератор развертки, формирующий пилообразное напряжение для отклонения луча по горизонтали и импульс для гашения луча на время обратного хода развертки, подаваемый на усилитель Z , и усилитель X , усиливающий напряжение развертки до требуемой величины. Напряжение развертки выводится также на гнездо, имеющееся на передней панели осциллографа.

Схема синхронизации имеет на передней панели прибора переключатель вида синхронизации "ВНУТР. - СЕТЬ - 1:1 - 1:10", служащий для выбора источника сигнала синхронизации. В положении "ВНУТР" сигнал синхронизации поступает на схему синхронизации с предусилителя Y через предусилитель синхронизации. В положении "СЕТЬ" развертка синхронизируется сетевым напряжением с частотой 50 Гц. В положениях "1:1" и "1:10" сигнал синхронизации поступает на схему синхронизации со входа X (режим внешней синхронизации), причем в положении "1:10" этот сигнал делится в 10 раз, что необходимо при синхронизации от сигналов с большой амплитудой.

Далее, схема синхронизации имеет на передней панели плавную регулировку "УРОВЕНЬ", с помощью которой устанавливают режим

схемы для обеспечения устойчивого изображения исследуемого сигнала на экране осциллографа. Переключатели "+/-" и " \sim/\simeq " служат также для установки режима синхронизации. При выборе положения " \simeq " запуск развертки определяется постоянным положительным или отрицательным (в зависимости от положения "+/-") уровнем сигнала. При выборе положения " \simeq " запуск развертки происходит от положительного или отрицательного перепада сигнала.

Переключатель "АВТ. ЖДУЩ. ОДНОКР." обеспечивает три режима работы генератора развертки. В положении " ЖДУЩ." развертка возникает только тогда, когда поступает запускающий импульс со схемы синхронизации (т.е. при наличии исследуемого сигнала). В положении "АВТ" при отсутствии запускающего импульса синхронизации возникает несинхронизированная развертка. В положении "ОДНОКР" запуск развертки сигналом синхронизации осуществляется один раз. Для повторного запуска необходимо нажать кнопку "ГОТОВ" на передней панели осциллографа.

Длительность развертки ступенчато изменяется переключателем "ВРЕМЯ/ДЕЛ", а плавно - находящимся на одной оси с этим переключателем переменным резистором. Следует помнить, что измерения временных интервалов по экрану осциллографа можно производить только при повороте плавной регулировки длительности развертки по часовой стрелке до упора. Для калибровки длительности развертки служит еще одна полуоперативная регулировка "под отвертку".

Переключатель "x1 x10 X" служит для установки вида развертки. В положении "x1" скорость развертки соответствует положению переключателя "ВРЕМЯ/ДЕЛ". В положении "X" развертка растягивается в 10 раз, и цена деления на экране уменьшается в 10 раз. В положении "X" горизонтальное отклонение осуществляется внешним сигналом, подаваемым на вход внешней синхронизации.

Канал Z предназначен для управления яркостью изображения на экране. Усилитель Z усиливает поступающие со схемы развертки импульсы обратного хода и обеспечивает гашение обратного хода развертки на экране осциллографа. В осциллографе предусмотрена возможность подачи внешнего сигнала на вход Z для получения яркостных меток времени. Вход Z находится на задней стенке осциллографа.

Для периодической проверки чувствительности канала вертикального отклонения и проверки калибровки длительности развертки служит калибратор, который вырабатывает периодический прямоугольный сигнал частотой 1000 Гц и ступенчато переключаемой амплитудой, а также постоянное напряжение переключаемой величины.

Электронно-лучевая трубка предназначена для формирования луча с помощью прожектора и две пары отклоняющих пластин по оси Y и оси X.

2. Двухканальный и двухлучевой осциллографы и работа с ними. Двухканальный и двухлучевой осциллографы предназначены для одновременного наблюдения двух независимых сигналов. Структурные схемы каналов вертикального отклонения этих осциллографов приведены на рис. П.2 а, б.

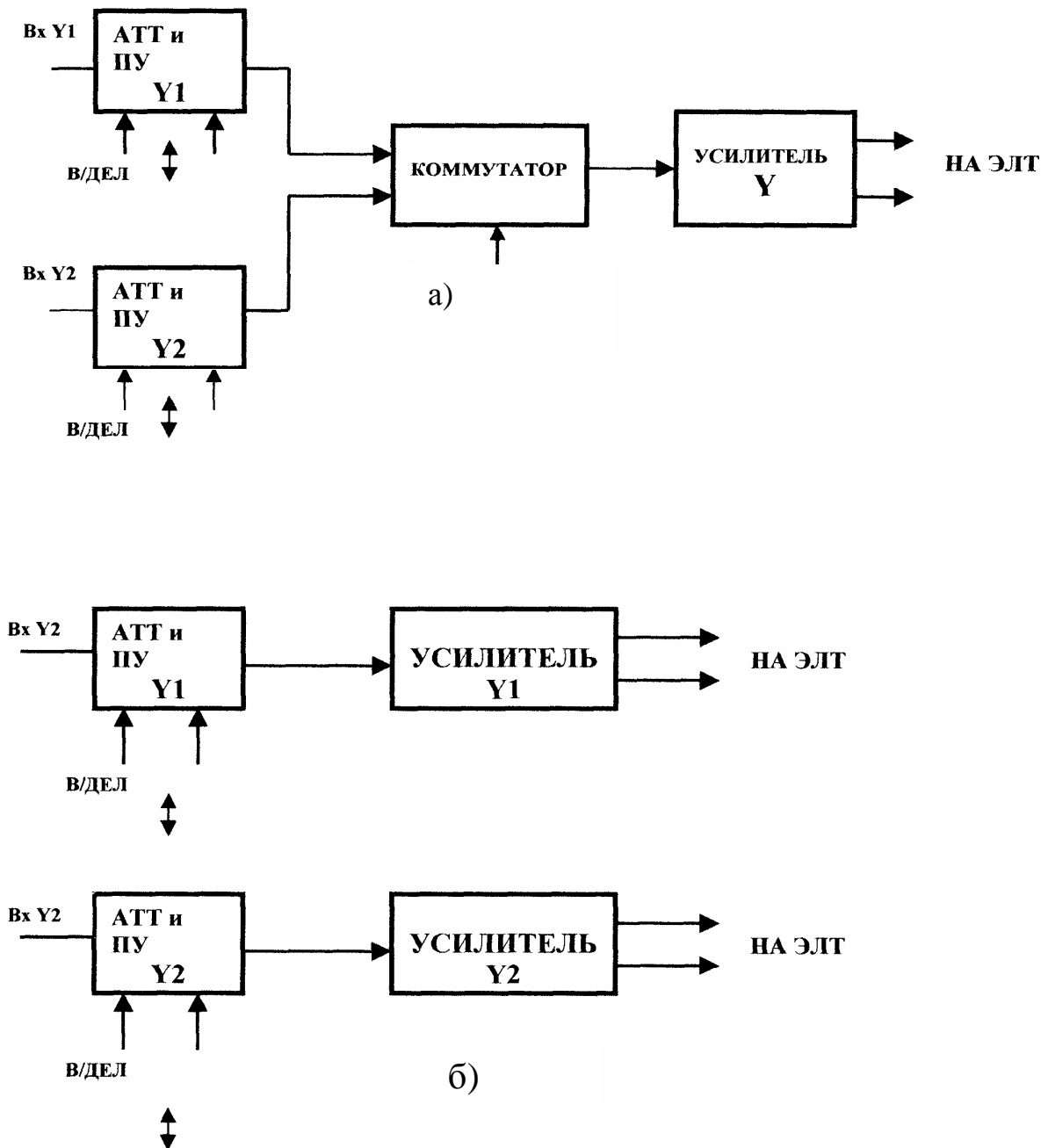


Рис.П.2. Структурные схемы каналов Y двухканального (а) и двухлучевого (б) осциллографов

В двухканальном осциллографе имеется два входа Y , на которые могут подаваться независимые сигналы. Каждый из этих сигналов проходит свой аттенюатор (АТТ), с помощью которого ступенчато устанавливается коэффициент отклонения по вертикали, и предусилитель (ПУ), в котором выполняются плавная регулировка коэффициента отклонения по вертикали и регулировка смещения по вертикали.

Сигналы Y_1 и Y_2 далее поступают на коммутатор, с помощью которого можно установить один из следующих режимов:

- "Поочередно". В этом режиме переключение сигналов Y_1 и Y_2 производится после каждого периода развертки по горизонтали;

- " I ". Постоянно отображается сигнал Y_1 ;

- " Прерывание". В этом режиме коммутатор в течение каждого периода развертки многократно переключает сигналы Y_1 и Y_2 . В результате осциллограммы получаются прерывистыми. Этот режим удобен для наблюдения сигналов с большими периодами повторения, когда режим " Поочередно" создает заметные мерцания изображения;

- " II ". Постоянно отображается сигнал Y_2 ;

- "Сумма ". Постоянно отображается сумма сигналов Y_1 и Y_2 .

В двухлучевом осциллографе используется ЭЛТ с двумя электронными лучами. Регулировка яркости, фокусировка и отклонение по вертикали этих лучей осуществляется независимо, а отклонение по горизонтали - совместно. Двухлучевой осциллограф имеет два независимых от входа до выхода канала вертикального отклонения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1. Устройство и принцип работы цифрового частотомера

Как правило, цифровые частотомеры имеют 2 основных режима работы: измерения частоты сигналов и измерения периода сигналов. Кроме того, могут быть и другие режимы, например, измерения отношения частот, измерения длительности импульсов и т.д.

На рис.П1 показана упрощенная структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты, а на рис. П2 приведены временные диаграммы, поясняющие работу этой схемы. Сигналы в точках, отмеченных цифрами 1..5 на рис.П1, показаны на соответствующих временных диаграммах на рис.П2.

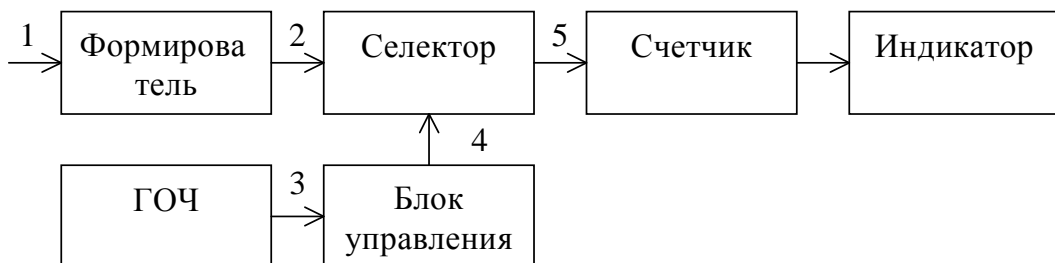


Рис.П1. Структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты

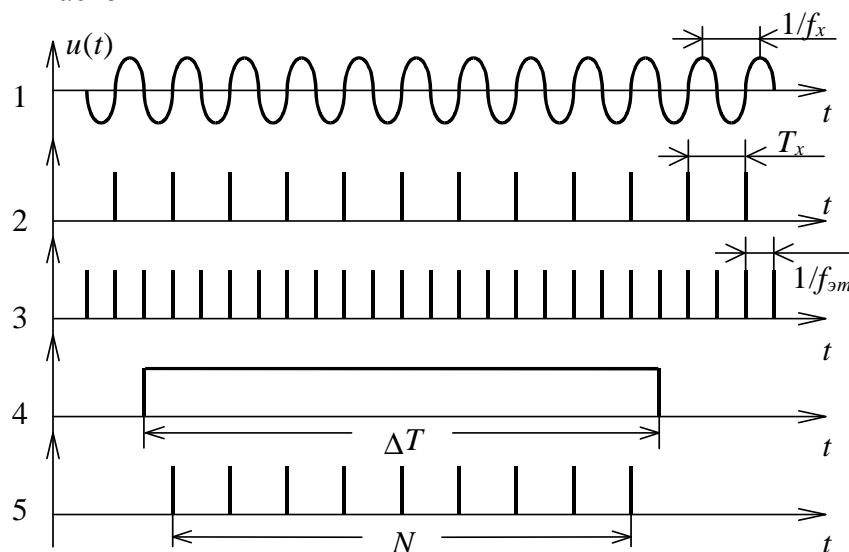


Рис.П2. Временные диаграммы работы цифрового частотомера в режиме измерения частоты

На вход частотомера (точка 1) поступает периодическое переменное напряжение, например, синусоидальной формы, имеющее частоту f_x . Формирователь преобразует это напряжение в импульсы (точка 2) с такой же частотой. Имеющийся в частотомере генератор опорной частоты (ГОЧ) непрерывно вырабатывает импульсное напряжение с опорной частотой $f_{эт}$ (точка 3).

В блоке управления с использованием делителей частоты из импульсов опорной частоты $f_{эт}$ вырабатывается импульс длительностью ΔT (точка 4), определяющий время счета импульсов измеряемой частоты f_x . Селектор пропускает на счетчик импульсы измеряемой частоты только в течение этого интервала времени (точка 5). Количество сосчитанных счетчиком импульсов равно $N = \Delta T f_x$. Если $\Delta T = 1\text{с.}$, то N равно измеряемой частоте. При уменьшении или увеличении ΔT в 10^n раз число значащих цифр в результате измерения будет, соответственно, уменьшаться или увеличиваться на n разрядов.

На рис.П3 показана упрощенная структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения периода, а на рис.П4 приведены временные диаграммы, поясняющие работу этой схемы. Сигналы в точках, отмеченных цифрами 1..5 на рис.П3, показаны на соответствующих временных диаграммах на рис П4.

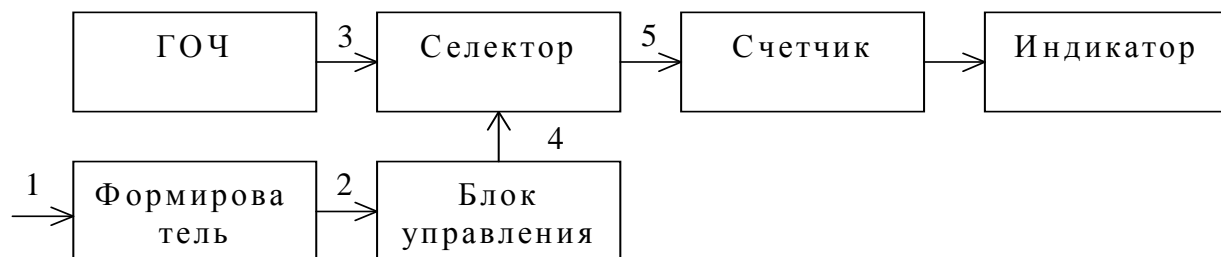


Рис.П3. Структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения периода

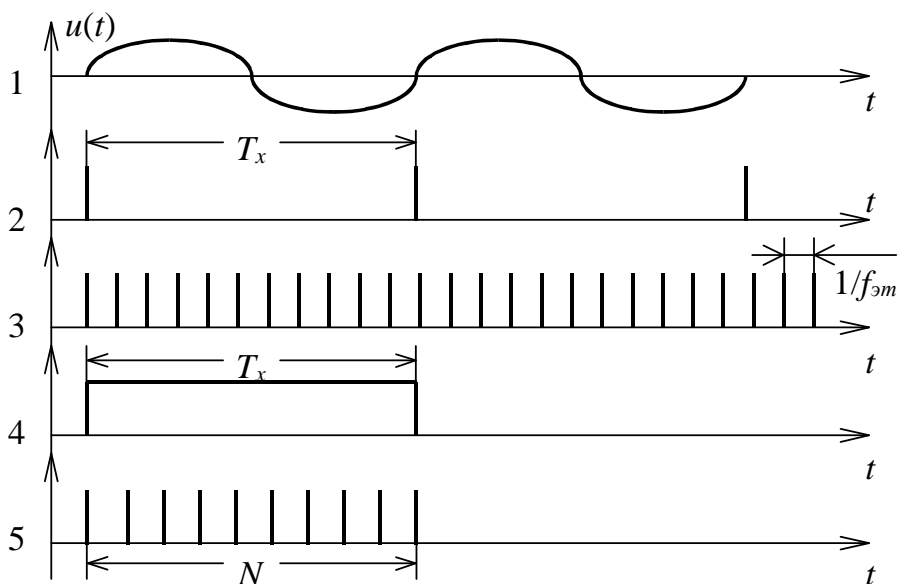


Рис.П4. Временные диаграммы работы цифрового частотомера в режиме измерения периода

На вход частотомера (точка 1) поступает периодическое переменное напряжение, например, синусоидальной формы, имеющее период T_x . Формирователь преобразует это напряжение в импульсы (точка 2) с таким же периодом. Генератор опорной частоты (ГОЧ) непрерывно вырабатывает импульсное напряжение с опорной частотой $f_{эт}$, (точка 3). В блоке управления из импульсов с выхода формирователя вырабатывается импульс длительностью T_x (точка 4), определяющий время счета импульсов опорной частоты. Селектор пропускает на счетчик импульсы опорной частоты только в течение этого интервала времени (точка 5).

Количество сосчитанных счетчиком импульсов равно

$$N = T_x f_{эт} = T_x / T_{эт},$$

где $T_{эт}$ - период опорной частоты, который может изменяться с помощью переключателя времени счета. Если $T_{эт} = 1$ мкс., то N равно измеряемому периоду, выраженному в микросекундах. При уменьшении или увеличении $T_{эт}$ в 10^n раз число значащих цифр в результате измерения будет, соответственно, увеличиваться или уменьшаться на n разрядов.

Для измерения частоты с помощью частотомера ЧЗ-32 необходимо подать сигнал на вход А, переключатель "Режим работы" установить в положение f_A , а переключатель "Время счета" установить в одно из положений правой половины его шкалы, показывающих значения времени счета. Для измерения периода необходимо подать сигнал на вход Б, переключатель "Режим работы" установить в положение T_B , а переключатель "Время счёта" установить в одно из положений левой половины его шкалы, показывающих значения периода импульсов опорной частоты.

2. Погрешности вольтметров

В общем случае абсолютная инструментальная погрешность вольтметра состоит из двух составляющих: мультипликативной (зависящей от измеряемой величины) и аддитивной (не зависящей от измеряемой величины), и может быть записана в виде соотношения

$$\Delta_m = \pm(a + bU),$$

где Δ_m предельно допустимая погрешность (максимальная), U - измеренное значение напряжения, a и bU - соответственно аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности.

Относительное значение предельно допустимой погрешности равно

$$\delta = \frac{\Delta_m}{U} = \pm \left(\frac{a}{U} + b \right) \cdot 100\%$$

В свою очередь величину "а" принято выражать в зависимости от номинального значения (конечного) шкалы прибора $a = \frac{\gamma}{100} U_{ном}$, где γ - приведенная относительная погрешность в процентах, равная отношению максимальной абсолютной аддитивной погрешности к номинальному значению шкалы прибора

$$\gamma = \frac{\Delta_m}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

Эта формула и будет определять класс точности для большинства электромеханических приборов, а также для электронных приборов со стрелочным отсчетом, т.к. в них преобладает аддитивная составляющая погрешности.

Для цифровых вольтметров, в которых аддитивные составляющие соизмеримы с мультипликативными, для определения класса точности используется трехчленная формула

$$\delta_{\%} = \pm \left[c + d \left(\frac{U_{ном}}{U} - 1 \right) \right] \%$$

Класс точности записывается цифрами c/d . где c - суммарная относительная погрешность в конце диапазона, d - относительная аддитивная составляющая погрешности.

Например, для цифрового вольтметра В7 -16 (В7- 16А)

$$\delta = \pm \left[0,5 + 0,05 \left(\frac{U_{ном}}{U} - 1 \right) \right] \%$$

для диапазонов измерения 10 и 100 В при частотах от 20 Гц до 20 кГц. Класс точности обозначается 0,5/0,05 (с/d).

3. Измерение переменных напряжений различной формы

Электронные вольтметры переменного напряжения содержат преобразователи переменного напряжения в постоянное. Функция преобразователей заключается в том, чтобы формировать на своем выходе постоянное напряжение, пропорциональное амплитудному, средневыпрямленному или эффективному (действующему) значению переменного напряжения, поданного на вход преобразователя. Свойства вольтметра во многом определяются типом используемого в нем преобразователя.

Переменное напряжение может характеризоваться следующими параметрами: $u(t)$ - мгновенным значением, U_m - амплитудным, $U_{св}$ - средневыпрямленным, U - эффективным, (действующим).

Связи между этими параметрами определяются соотношениями

$$K_A = \frac{U_m}{U} \quad - \text{коэффициент амплитуды}; \quad K_\phi = \frac{U}{U_{\text{св}}} \quad - \text{коэффициент формы.}$$

Общие формулы для вычисления параметров переменного напряжения имеют вид:

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt$$

- для средневыпрямленного напряжения

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$$

- для эффективного значения

Коэффициенты формы и амплитуды различны для разных сигналов.

Так, для синусоидального сигнала

$$K_{A\sin}=1,41, \quad K_{\phi\sin}=1,11.$$

При градуировке приборов, предназначенных для работы на синусоидальном напряжении, на их шкалах указывается действующее значение синусоидального напряжения, хотя в действительности прибор измеряет амплитудное или средневыпрямленное значение. Поэтому при измерении одного и того же синусоидального напряжения показания вольтметров с разными типами преобразователей одинаковы.

Если же форма напряжения отличается от синусоидальной, то может возникнуть методическая погрешность. Например, если измерять напряжение типа "меандр", у которого $K_{\Phi M}=K_{A M}=1$, то есть $U_m=U_{\text{св}}=U$, то прибор с преобразователем амплитудного значения покажет

$$U_{\text{изм}} = \frac{U_m}{K_{A\sin}} = \frac{U_m}{1,41},$$

а показания прибора с преобразователем средневыпрямленного значения соответственно будут

$$U_{\text{изм}} = U_{\text{св}} K_{\phi\sin} = U_{\text{св}} \cdot 1,11 = U_m \cdot 1,11$$

Таким образом, при измерении напряжений несинусоидальной формы необходимо учитывать свойства используемого вольтметра и вносить соответствующие поправки в его показания.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ИЗМЕРИТЕЛЬ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ Е7-11

В основе работы измерителя универсального Е7-11 положены мостовые методы измерения L , C , R на постоянном и переменном токах. Упрощенная структурная схема измерителя универсального Е7-11 приведена на рис. П1.

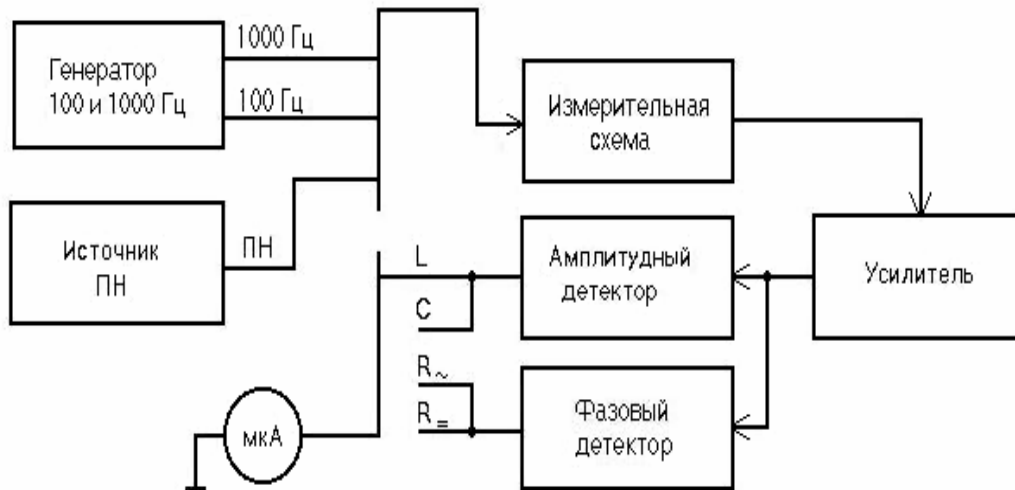


Рис.П1. Структурная схема измерителя универсального Е7-11

Прибор содержит генератор переменного напряжения, частота которого может быть установлена равной 1000Гц или 100Гц. Этот генератор используется при проведении измерений на переменном токе. Для проведения измерений сопротивления на постоянном токе используется источник постоянного напряжения (ПН)

В зависимости от выбранного режима измерений переменное или постоянное напряжение подается на измерительную схему, в состав которой входят эталонные постоянные и переменные резисторы, эталонный конденсатор и измеряемый элемент, подключаемый к схеме с помощью зажимов. Сигнал с измерительной схемы усиливается. В случае измерений на постоянном токе сигнал (постоянное напряжение) с измерительной схемы перед усилением преобразуется в переменное напряжение, чтобы обеспечить отсутствие влияния дрейфа элементов усилителя на баланс моста.

Усиленное переменное напряжение поступает на детекторы. При измерениях емкости и индуктивности используется амплитудный детектор. При этом, показания индикатора (мкА – микроамперметр) отклоняются от нулевого положения только в одну сторону. При измерениях сопротивления как на постоянном, так и на переменном токе, используется фазовый детектор. При этом, показания индикатора отклоняются от нулевого положения в обе стороны в зависимости от того, меньше измеряемое сопротивление выставленного значения эталонного сопротивления или больше. Применение фазового детектора позволяет устранить влияние на результат измерения паразитных емкости и индуктивности измеряемого резистора.

Фазовый детектор также используется при измерениях индуктивностей и емкостей в режиме поиска предела измерения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов./ В.И. Нефедов, В.И. Хахин, Е.В. Федорова и др.; Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2001. -383с.
2. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения. – М.: Радио и связь, 1993. – 318с.
3. Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения. - Минск: Высшейшая школа, 1986.-320 с.
4. Беянина Е.К., Федорова Е.В. Основы метрологии, стандартизации и измерительной техники. Сборник задач. - М.: МИРЭА, 2000. – 60с.
5. Хромой Б.П. Электрорадиоизмерения. – М.: Радио и связь, 1985. – 310с.
6. Зайчик Ю.А. Практикум по электрорадиоизмерениям. – М.: Высшая школа, 1985. -157 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЯХ.....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ.....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКОВ.....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ.....	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ.....	34
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. РЕЗОНАНСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ.....	41
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА.....	47
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛЬТМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ.....	53
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11. МОСТОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПЕЙ.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	76
ЛИТЕРАТУРА.....	77

Клименко О.И., Орозбек уулу Аскар

Метрология и радиоизмерения
Методические указания по выполнению лабораторных работ

Тех. редактор: Жакыпова Ч.А.
Компьютерная верстка: Ысманова Н.К.

Отпечатано в полиграфическом комплексе
ИГУ им. К.Тыныстанова
Заказ 356 Тираж 25.
Тел.: (03922) 52696

