

Министерство образования Российской Федерации
ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет –
УПИ"

Д.Ю. Бирюков А.Ф. Зацепин А.И. Сюрдо

**АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В
НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Учебно-методическое пособие

Научный редактор – проф. д-р техн. наук В.С. Кортон

Екатеринбург
2003

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Б 64

Авторы-составители: Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин, А.И. Сюрдо

Рецензенты: кафедра общей и молекулярной физики УрГУ

(зав. каф. проф. д-р физ.-мат. наук С.Ф. Борисов);

д-р физ.-мат. наук А.Б. Ринкевич (ИФМ УрО РАН).

Б 64 Акустические и электрические измерения в неразрушающем контроле материалов и изделий / Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин, А.И. Сюрдо. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 124 с.

ISBN 5-321-00333-5

Учебно-методическое пособие по курсам «Методы и средства измерений, испытаний и контроля», «Акустический контроль» и «Измерительная техника» рассчитано на студентов специальностей 190200 – Приборы и методы контроля качества и диагностики, 072000 – Стандартизация и сертификация в приборостроении.

В настоящем пособии приводятся основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также описание методов измерений и контроля изделий и материалов. В конце каждого раздела приведено описание лабораторных работ. Часть из них посвящена акустическим измерениям с применением пьезоэлектрических преобразователей; другие рассматривают методы и средства измерений электрических величин, а также температуры и угла диэлектрических потерь.

Библиогр.: 21 назв. Табл. 30. Рис. 37.

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Подготовлено кафедрой "Физические методы и приборы контроля качества" при участии секции информатики и когнитологии Регионального Центра новых информационных технологий ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Публикуется в рамках Федеральной программы "Интеграция" (проект № Л0135) и плана Уральского НОЦ "Перспективные материалы" (Award No. REC-005 (CRDF)).

ISBN 5-321-00333-5

© ГОУ ВПО "Уральский государственный
технический университет – УПИ", 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ЧАСТЬ I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	6
1. Акустические свойства сред. Физические принципы и методы измерения скорости ультразвуковых волн	6
1.1. Скорость распространения ультразвуковых колебаний	6
1.2. Методы измерения скорости распространения продольных и поперечных колебаний	8
1.3. Принцип действия типового импульсного УЗ- дефектоскопа	10
Описание лабораторной работы №1 «Измерение скорости распространения ультразвука в твердых телах»	11
2. Акустические свойства сред. Затухание ультразвука в материалах	19
2.1. Причины затухания	19
2.2. Звуковое поле дискового излучателя	20
2.3. Метод определения коэффициента затухания	22
Описание лабораторной работы № 2 «Измерение затухания ультразвука в материалах»	23
3. Коэффициенты пьезоэлектрического преобразования и методы их измерения	28
3.1. Понятие коэффициента преобразования	28
Описание лабораторной работы № 3 «Измерение коэффициента пьезоэлектрического преобразования»	30
ЧАСТЬ II. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ	36
4. Эхо-метод дефектоскопии	36
4.1. Мертвая зона	36
4.2. Точка выхода луча	39
4.3. Угол ввода луча	39
4.4. Разрешающая способность	40
Описание лабораторной работы № 4 «Изучение эхо-метода дефектоскопии»	40
5. Ультразвуковой резонансный метод контроля	46
Описание лабораторной работы №5 «Исследование ультразвукового резонансного метода контроля»	48
6. Применение эхо-метода для обнаружения и характеристики дефектов	53
6.1. Оценка размеров малых дефектов	53
6.2. Оценка размеров больших дефектов	57
Описание лабораторной работы №6 «Измерение размеров дефектов с помощью ультразвука»	60

ЧАСТЬ III. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	65
7. Электронно-лучевой осциллограф	65
Описание лабораторной работы № 7 «Изучение электронного осциллографа»	69
8. Вольтметры	73
8.1. Характеристика измеряемых параметров переменного напряжения	73
8.2. Характеристика детекторов электронных вольтметров	75
Описание лабораторной работы № 8 «Измерение напряжений сложной формы»	79
9. Приборы и методы измерения временных интервалов и частоты	84
9.1. Описание устройства и принципов работы электронно- счетного частотомера ЧЗ-35А	84
9.2. Описание устройства и принципа работы измерителя временных интервалов И2-26	85
Описание лабораторной работы № 9 «Измерение временных интервалов и частоты»	87
10. Приборы и методы измерения электрического сопротивления	94
10.1. Описание устройства и принципа работы вольтметра цифрового В7-58	94
10.2. Описание устройства и принципы работы моста постоянного тока измерительного Р5053	94
Описание лабораторной работы № 10 «Измерение сопротивления мостовым способом»	96
ЧАСТЬ IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	101
11. Измерение параметров электротехнических цепей	101
11.1. Резонансный метод	101
11.2. Мостовой метод	103
Описание лабораторной работы № 11 «Измерения угла диэлектрических потерь»	105
12. Термочувствительные преобразователи	111
12.1. Термоэлектрические преобразователи	111
12.2. Терморезисторы	114
12.3. Другие разновидности	115
Описание лабораторной работы № 12 «Термочувствительные преобразователи»	117
Библиографический список	122

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие содержит основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также описание методов измерений и контроля изделий и материалов.

Учебно-методическое пособие рассчитано на студентов специальностей 190200 – Приборы и методы контроля качества и диагностики, 072000 – Стандартизация и сертификация в приборостроении слушающих курсы «Акустический контроль», «Измерительная техника» и «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». В конце каждого раздела приведено описание работ к лабораторному практикуму по данным курсам. Цель лабораторного практикума – закрепить и расширить теоретические сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений.

Предлагаемый материал посвящен изучению основных серийно-выпускаемых приборов и различных методов измерений и контроля изделий и материалов, исследованию с их помощью основных характеристик преобразователей физических величин. Выполнение лабораторных работ позволит студентам приобрести навыки работы с современной измерительной аппаратурой.

Для выполнения лабораторного практикума студент должен знать принцип действия, структуру и особенности приборов контроля; четко представлять физику процессов, происходящих в преобразователях физических величин; уметь использовать ЭВМ для расчетов и обработки результатов измерений.

ЧАСТЬ I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Акустические свойства сред. Физические принципы и методы измерения скорости ультразвуковых волн

1.1. Скорость распространения ультразвуковых колебаний

В зависимости от упругих свойств среды в ней могут распространяться упругие колебания разных типов, отличающиеся направлением смещения колеблющихся частиц. В связи с этим различают следующие типы ультразвуковых колебаний: продольные, поперечные (сдвиговые), поверхностные, нормальные и т.д.

Продольные колебания могут распространяться в твердой, жидкой и газообразной средах, так как связаны с упругостью объема среды.

Поперечные (сдвиговые) колебания могут распространяться только в твердой среде, которая обладает упругостью формы, т.е. способна сопротивляться деформации сдвига.

Поскольку природа продольных и поперечных волн разная, то скорости их распространения определяются различными упругими константами среды и значительно отличаются друг от друга. Для неограниченной твердой среды скорость продольных волн зависит от модуля объемной упругости E (модуль Юнга), коэффициента Пуассона ν и плотности среды ρ :

$$C_l = \sqrt{E(1-\nu)/[\rho(1+\nu)(1-2\nu)]}. \quad (1.1)$$

Скорость поперечных волн определяется модулем сдвига G и плотностью среды:

$$C_t = \sqrt{G/\rho}. \quad (1.2)$$

Коэффициент Пуассона характеризует отношение констант объемной упругости и сдвига:

$$\nu = E/2G - 1. \quad (1.3)$$

В твердом теле распространение продольной волны сопровождается распространением поперечных волн, но выделить тот или иной тип колебания возможно только при отражении и преломлении ультразвуковых волн на границе двух сред. Продольные и поперечные волны имеют различную скорость распространения,

поэтому отражаться и преломляться на границе двух сред они будут под разными углами.

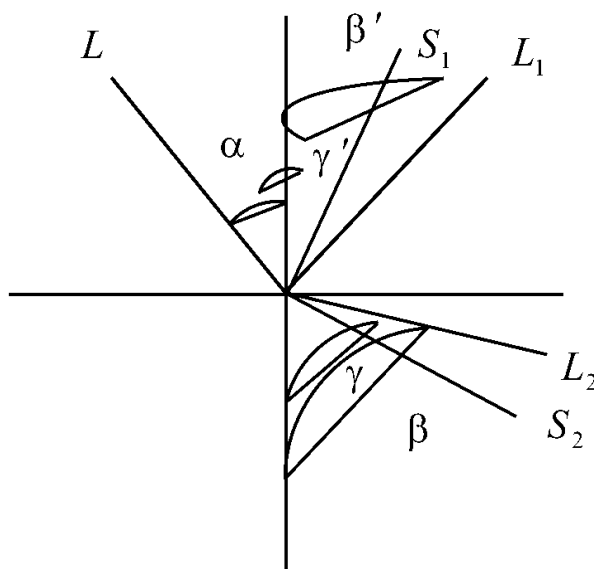


Рис.1.1. Отражение и преломление ультразвука на границе двух сред: L – падающая продольная волна; L₁, L₂ – отраженная и преломленная продольные волны; S₁, S₂ – отраженная и преломленная поперечные волны

Углы падения α , отражения β' , γ' и преломления β , γ связаны следующим соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{C_{l1}} = \frac{\sin \beta'}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma'}{C_{t1}} = \frac{\sin \beta}{C_{l2}} = \frac{\sin \gamma}{C_{t2}}. \quad (1.4)$$

Из рис.1.1 очевидно существование некоторого критического угла падения $\alpha_{кр.I}$, при котором преломленные продольные волны будут распространяться в поверхностном слое, а также критического угла $\alpha_{кр.II} > \alpha_{кр.I}$, при котором по поверхности будут распространяться преломленные поперечные волны.

Таким образом, для углов падения α , удовлетворяющих условию $\alpha_{кр.I} < \alpha < \alpha_{кр.II}$, в среде будут распространяться только преломленные поперечные волны. Для многих материалов $\alpha_{кр.I} \approx 30^\circ$, $\alpha_{кр.II} \approx 51^\circ$.

1.2. Методы измерения скорости распространения продольных и поперечных колебаний

1.2.1. Определение скорости распространения продольных волн можно осуществить при нормальном вводе УЗ-сигнала, используя прямой пьезопреобразователь и плоскопараллельный образец (рис.1.2).

Очевидно, что $C_l = 2D/t$.

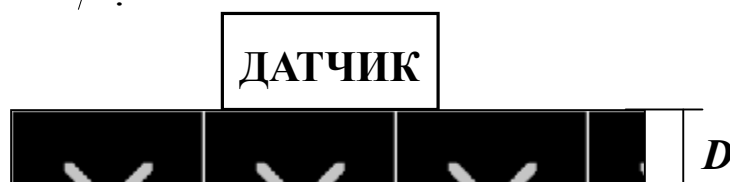


Рис.1.2. Схема распространения продольных волн

1.2.2. Для определения скорости распространения поперечных волн необходимо использовать наклонный преобразователь с углом падения α , удовлетворяющим условию $\alpha_{кр.I} < \alpha < \alpha_{кр.II}$. В этом случае для попадания отраженной волны на преобразователь требуется направить преломляемую волну на какой-либо отражатель, например, уголкового (прямой угол образца) – рис.1.3.

При этом следует иметь в виду, что время распространения зондирующих импульсов включает в себя время распространения продольной волны в призме преобразователя t_n и время распространения волны в образце $t_{обр.}$. Для определения скорости распространения поперечных волн необходимо провести измерения времени распространения импульса для двух положений преобразователя, как указано на рис.1.3.

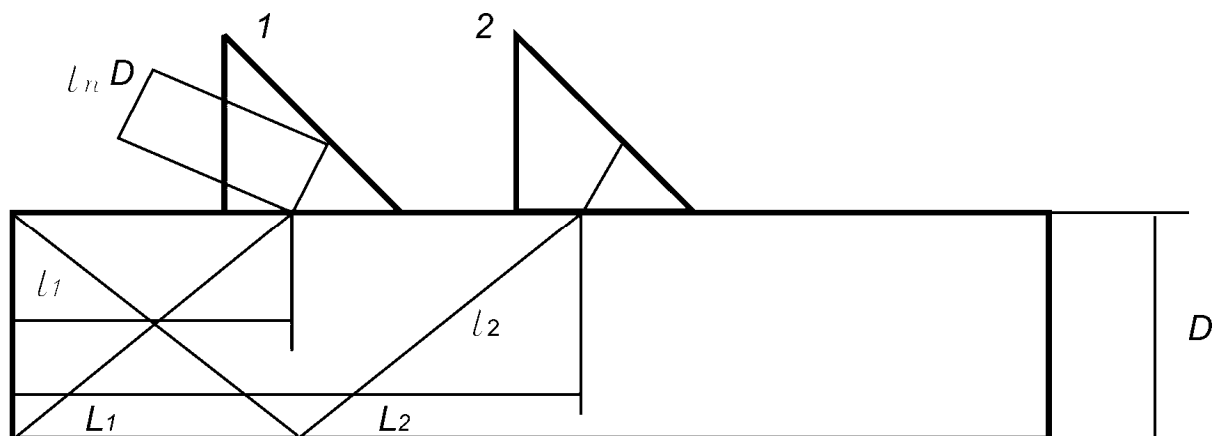


Рис.1.3. Схема распространения поперечных волн

В положении 1 и 2 преобразователя общее время распространения зондирующих импульсов определяется соответственно как

$$t_1 = t_n + t_{обp.1} = 2l_n / C_l + 2L_1 / C_t, \quad (1.5)$$

$$t_2 = t_n + t_{обp.2} = 2l_n / C_l + 2L_2 / C_t, \quad (1.6)$$

где l_n – расстояние, проходимое импульсом в призме;

$L_{1,2}$ – расстояние, проходимое импульсом в образце при положении 1 и 2 преобразователя.

Вычитая (1.6) из (1.5), получим:

$$t_1 - t_2 = t_{обp.2} - t_{обp.1} = \frac{2(L_2 - L_1)}{C_t}. \quad (1.7)$$

Из формулы (1.7) по измеренным значениям t_1, t_2, l_1, l_2 можно определить скорость распространения поперечных волн.

Значения L_1, L_2 легко вычислить по измеренным величинам l_1, l_2, D .

Необходимо отметить, что во все приведенные формулы в качестве скорости ультразвука входит фазовая скорость перемещения определенной фазы бесконечной синусоидальной (монохроматической) волны.

В то же время УЗ-дефектоскоп для зондирования использует ограниченные по времени последовательности УЗ-сигналов, что приводит к существованию некоторого распределения ультразвука по частотам. В подобном случае применяется понятие групповой скорости – это скорость движения группы (цуга) волн, образующих в каждый момент времени локализованный в пространстве пакет.

Поскольку для зондирования используются достаточно длинные последовательности импульсов (период следования много больше периода УЗ-колебаний) и в связи с малой дисперсионной способностью исследуемых сред, можно считать групповую скорость примерно равной фазовой и использовать приведенные формулы.

1.3. Принцип действия типового импульсного УЗ-дефектоскопа

Блок-схема типового импульсного УЗ-дефектоскопа приведена на рис.1.4.

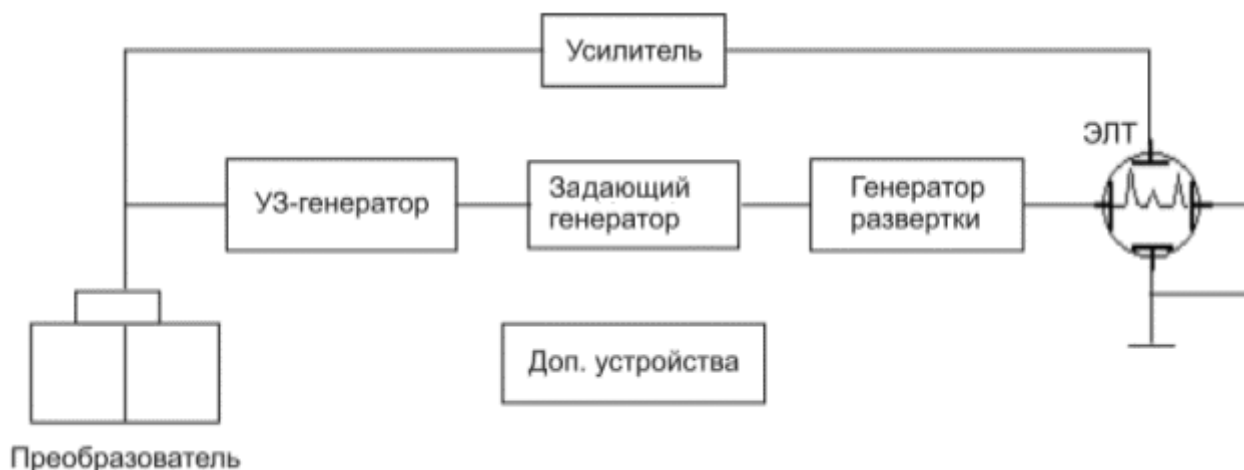


Рис.1.4. Блок-схема типового УЗ-дефектоскопа

К дополнительным устройствам относятся глубиномер, аттенуатор, электронная лупа, автоматический сигнализатор дефектов и т.д.

Алгоритм работы дефектоскопа следующий.

Задающий генератор запускает УЗЧ-генератор и генератор развертки. Импульсы посылают один за другим через определенное время.

Общий период $T = \tau + t$, где пауза t больше продолжительности серии импульсов τ , чтобы отраженные импульсы не попали на преобразователь при излучении.

Одновременно с запуском генератора на экране ЭЛТ появляется начальный (зондирующий) импульс. В период t отраженные УЗ-колебания формируют сигналы на экране ЭЛТ.

Если время прохождения луча прямо пропорционально пройденному пути, то для данного материала на экране трубки наблюдается диаграмма, по горизонтальной оси которой отложено время, пропорциональное глубине залегания дефекта, а по вертикальной – интенсивность отраженных от дефектов импульсов, зависящая от их размеров, глубины залегания, ориентировки.

Описание лабораторной работы №1 «Измерение скорости распространения ультразвука в твердых телах»

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с устройством серийного дефектоскопа (ГСП ЭКОН-4 УД-11 УА).

1.2. Освоить методику измерения скорости распространения ультразвуковых волн.

1.3. Определить значения динамических упругих модулей исследуемых твердых тел.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из серийного дефектоскопа УД-11 УА, комплекта пьезопреобразователей, штангенциркуля и набора образцов исследуемых материалов.

2.2. В комплект пьезопреобразователей входят совмещенные прямые и наклонные пьезопреобразователи П-111-2,5-КН, П-111-5,0-КН, П-121-1,25-40°-Н, П-121-2,5-40°-Н.

2.3. В качестве исследуемых образцов (акустической нагрузки) используются стальной и дюралюминевый образцы в форме параллелепипеда.

3. Программа работы

3.1. Ознакомиться с устройством дефектоскопа УД-11 УА и его работой в режиме контроля эхо-методом.

3.2. Ознакомиться со структурной схемой дефектоскопа УД-11 УА и с назначением органов управления. Органы управления установить в требуемое первоначальное положение.

3.3. Проверить работоспособность дефектоскопа. Для этого собрать лабораторную установку согласно рис.1.5.

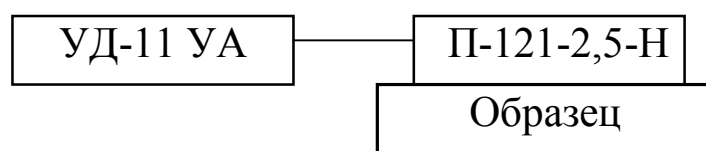


Рис.1.5. Схема лабораторной установки

Получить на экране дефектоскопа четкие изображения зондирующего, первого донного эхо-сигналов и строб-импульса.

3.4. Определить скорость распространения продольных волн.

- 3.4.1. Определить толщину образцов D с помощью штангенциркуля. Результаты пяти измерений занести в табл.1.1.
- 3.4.2. Измерить временной интервал t между зондирующим и первым донным эхо-сигналами на экране дефектоскопа с использованием преобразователей разной частоты. Результаты пяти измерений t занести в табл.1.1.
- 3.4.3. Рассчитать по формуле (1.8) и занести в табл.1.1 значение скорости распространения продольных волн в исследуемых средах.

$$2D = t \bar{C}_l = 2\bar{D}/\bar{t}. \quad (1.8)$$

3.5. Оценить суммарную погрешность определения скорости распространения продольных волн в образцах.

Таблица 1.1

Результаты измерения скорости распространения продольных волн

Материал	Тип пьезопреобразователя	Номер измерений	Время t , 10^{-6} с	Толщина D , м	Скорость распространения продольных волн C_l , м/с
Сталь	П-111-2,5-КН	1			
	—"	2			
	—"	3			
	П-111-5,0-КН	1			
	—"	2			
Дюралюминий	П-111-2,5-КН	1			
	—"	2			
	—"	3			
	П-111-5,0-КН	1			
	—"	2			

3.6. Определить скорость распространения поперечных волн.

3.6.1. Определить расстояния, проходимые ультразвуком в образце, используя формулы (1.9) и (1.10).

$$L_1 = \sqrt{D^2 + l_1^2}, \quad (1.9)$$

$$L_2 = 2\sqrt{D^2 + l_2^2/4}, \quad (1.10)$$

где D – толщина образца;

l_1, l_2 – расстояния от точки ввода излучения в образец в положении 1 и 2 преобразователя до поперечной грани образца.

Данные пяти измерений и расчета занести в табл.1.2.

3.6.2. Измерить время распространения импульса в призме преобразователя и образце (t_1 и t_2) для разных положений датчика с использованием пьезопреобразователей разной частоты. Результаты измерений занести в табл.1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерения скорости распространения поперечных волн

Материал	Тип пьезо-преобразователя	Номер изм.	$t_1, 10^{-6} \text{ с}$	$t_2, 10^{-6} \text{ с}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$L_1, \text{ м}$	$L_2, \text{ м}$	Скорость распространения поперечных волн $C_t, \text{ м/с}$
Сталь	П-121-1,25-40°-Н	1							
	—"	2							
	—"	3							
	П-121-2,5-40°-Н	1							
	—"	2							
Дюралюминий	П-121-1,25-40°-Н	1							
	—"	2							
	—"	3							
	П-121-2,5-40°-Н	1							
	—"	2							

3.6.3. Рассчитать по формуле (1.11) и занести в табл.1.2. скорость распространения поперечных волн в исследуемых материалах:

$$\bar{C}_t = 2(\bar{L}_2 - \bar{L}_1)/(\bar{t}_2 - \bar{t}_1). \quad (1.11)$$

3.7. Оценить суммарную погрешность определения скорости распространения поперечных волн в образцах.

3.8. Вычислить динамические упругие модули исследуемых материалов по формулам (1.12), (1.13), (1.14)

$$G = \rho \cdot \bar{C}_t^2, \quad (1.12)$$

$$E = \rho \cdot \bar{C}_t^2 \left(3 - 4\bar{C}_t^2/\bar{C}_l^2 \right) / \left(1 - \bar{C}_t^2/\bar{C}_l^2 \right); \quad (1.13)$$

$$\nu = \left(\bar{C}_l^2 - 2\bar{C}_t^2 \right) / \left(\bar{C}_l^2 - \bar{C}_t^2 \right), \quad (1.14)$$

где G – модуль сдвига, Па;

E – модуль Юнга, Па;

ν – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность материала, кг/м³.

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. К п.1.1.

Установить органы управления дефектоскопом в соответствии с табл.1.3.

Таблица 1.3

Исходное положение органов управления дефектоскопом (настраивается преподавателем)

Блок	Орган управления	Исходное положение органа управления
СД-24 (индикатор- ный блок)	"Частота Hz" "Задержка μS" "Развертка μS" Синхр. внеш. Синхр. поверхн. "⊗", "⊙", "⊗⊙", "↑" "←"	Кнопка "200" нажата Кнопки отпущены То же Отпущена То же Крайнее правое положение Среднее

Продолжение табл.1.3

СК-26 (блок обра- ботки сигнала)	"Координата-скорость УЗК x10" "Скорость УЗК x10" "↓" Поверхн. "⊗", "mm – μS·0,1", "⊞" внешн. " "⊞" "⊞" "4", "8" "ЗАДЕРЖКА ПОВЕРХН. "	Отпущена Среднее Крайнее правое положение Отпущена Отпущены 020 Отпущены Среднее
СА-36 (усилитель)	"<dB" "20" ГЛУБИНА, НАЧАЛО, КРУТИЗНА "MHz" ОТСЕЧКА, ЗАДЕРЖКА, ЗОНА, УРОВЕНЬ	Кнопки отпущены Отпущена Крайнее левое положение Кнопки отпущены Крайнее левое положение
СЕ-35 (генератор)	"V" "MHz" МОЩНОСТЬ	Отпущена Кнопка "1,25" нажата Крайнее правое положение
Задняя стенка	НАПРЯЖЕНИЕ ВРЧ- ВНЕШН.	Напряжение ВРЧ

4.2. К п.3.2.1.

При работе с прямыми совмещенными и наклонными преобразователями соединить кабелем ЩО4.850.278 выходной разъем "⊞" блока генератора СЕ-35 с входным разъемом блока усилителя СА-36 и подсоединить пьезопреобразователь.

Включить тумблер "Сеть", при этом должен загораться светодиодный индикатор.

Установить после 15-минутного прогрева дефектоскопа начало импульса возбуждения после нуля на шкале экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) при помощи регулятора "↔". Совместить линию развертки с горизонтальной шкалой отчета ЭЛТ при помощи регулятора "↓". Отрегулировать яркость и четкость линии развертки при помощи регуляторов "⊗", "⊙", "⊞".

На блоках генератора СЕ-35 и усилителя СА-36 установить нажатием кнопки "МНz" частоту ультразвуковых колебаний, соответствующую рабочей частоте используемого пьезопреобразователя.

Перед началом измерений поверхности контролируемых образцов покрыть слоем контактной жидкости (масло, глицерин, вода). Пьезопреобразователь установить на поверхность с легким нажимом.

Получить на экране ЭЛТ с помощью органов управления МОЩНОСТЬ, ОТСЕЧКА, ГЛУБИНА, НАЧАЛО, КРУТИЗНА, " $\angle$ dB" устойчивое изображение первого отраженного сигнала с амплитудой, не менее стандартного уровня (половина шкалы ЭЛТ дефектоскопа).

4.3. К п.3.2.2, 3.2.4.

При выполнении п.3.2.2, 3.2.4 воспользоваться указаниями к п. 3.1.2. Измерения проводить при отпущенных кнопках переключателей "mm – μ S·0,1" и "Координата-скорость УЗК $\times 10$ ".

Добиться переключателями " $\text{---}\text{---}\text{---}$ " и " $\text{---}\text{---}\text{---}$ " попадания стробимпульса в зону отраженного сигнала. В совпадении сигналов можно убедиться по установлению устойчивого значения координаты отражателя на цифровом индикаторе.

При этом показания на лимбе переключателя " $\text{---}\text{---}\text{---}$ " соответствуют величине временного интервала t между зондирующим и отраженным сигналами, выраженной в μ S·0,1.

4.4. К п.3.2.3, 3.4.3.

Обоснования и вывод используемых формул (1.8) и (1.11) приведены в разд. 7 "Пояснения к работе".

4.5. К п.3.3, 3.4.

4.5.1. Рассчитать средние значения и среднеквадратичные отклонения измеренных параметров на программируемом микрокалькуляторе МК-64.

Определить для скорости ультразвука доверительный интервал случайной погрешности измерения, используя распределение Стьюдента.

4.5.2. Принять для параметров длины и времени в качестве границ неисключенных систематических погрешностей основные допустимые погрешности применяемых средств измерений. Учесть, что основная допустимая погрешность для штангенциркуля равна половине наименьшего деления, для дефектоскопа УД-11 УА при измерении временных интервалов – 0,1 мкс.

4.5.3. Рассчитать неисключенную систематическую погрешность определения скорости распространения ультразвука C :

$$\Theta^{HCP} = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial C}{\partial x} \cdot \Theta_i \right]^2}, \quad (1.15)$$

где x_i – измеряемые параметры;

Θ_i – неисключенные систематические погрешности измеренных параметров, $K=1,1$ при $P=0,95$.

4.5.4. Определить суммарную погрешность измерения скорости ультразвука (ГОСТ.8.207076).

4.5.5. Результат представить в виде $C = \bar{C} \pm \Delta C$, $P = 0,95$.

4.6. К п.3.6.

Для расчета использовать табличные значения плотности стали и меди:

$$\rho_{стали} = 7800 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{дюрал} = 2700 \text{ кг/м}^3.$$

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

Описание экспериментальной установки.

- Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
- Структурная схема типового УЗ-дефектоскопа.

Теоретическая часть.

- Методика проведения измерений (схемы распространения ультразвука).
- Основные расчетные соотношения.

Экспериментальное исследование.

- Описание последовательности действий.
- Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).

Оценка погрешности результатов исследования.

– Методика расчета погрешности.

– Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. Принцип действия типового УЗ-дефектоскопа.

6.2. Физические основы эхо-метода акустического контроля.

6.3. Типы ультразвуковых колебаний.

6.4. Характеристика упругих модулей твердого тела.

6.5. Методика измерения скорости ультразвука.

2. Акустические свойства сред. Затухание ультразвука в материалах

2.1. Причины затухания

Затухание ультразвука – это уменьшение амплитуды и, следовательно, интенсивности звуковой волны по мере её распространения в среде. Основными причинами затухания являются:

- убывание амплитуды волны с удалением от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника (расхождение волны);
- рассеяние звука на неоднородностях среды, которое приводит к уменьшению потока звуковой волны в первоначальном направлении;
- необратимый переход энергии звуковой волны в другие формы, в частности в тепло, т.е. поглощение звука.

Первая из этих причин связана с тем, что звуковая энергия точечного источника (или любого источника конечных размеров) распределяется при расхождении волны на все увеличивающуюся поверхность волнового фронта, что приводит к уменьшению интенсивности звука. Для сферической волны, поверхность фронта которой с увеличением расстояния от источника r растет как r^2 , амплитуда волны убывает пропорционально r^{-1} .

Рассеяние звука происходит на границах неоднородностей среды (например, микровключения, кристаллиты в поликристалле), что особенно заметно в случае неоднородностей, размеры которых сравнимы с длиной волны (область Релеевского рассеяния). Здесь затухание ультразвука при неизменной частоте оказывается пропорционально четвертой степени $d_{\text{ср}}$ (статистический размер зерна). Эта закономерность положена в основу определения структуры поликристаллических металлов и изделий из них. Кроме того, чем больше упругая анизотропия вещества (упругая анизотропия – это различие в скоростях распространения звука в кристалле вдоль различных кристаллографических направлений), тем больше частичное отражение, преломление, трансформация типов волн на границах кристаллит-кристаллит и, следовательно, больше рассеяние. Так ультразвук сильно затухает в меди, аустенитной коррозионно-стойкой стали. Малой упругой анизотропией характеризуются вольфрам и алюминий. Альфа-железо и углеродистая сталь относятся к промежуточным

материалам в отношении величины упругой анизотропии и рассеяния. Материалы, состоящие из разнородных частиц (бетон, гранит, чугун), характеризуются большим рассеянием.

Поглощение звука может быть обусловлено различными механизмами. Большую роль играет теплопроводность среды, взаимодействие волны с тепловыми колебаниями решетки и др.

Затухание, обусловленное поглощением и рассеянием, описывается экспоненциальным законом убывания амплитуды с рассеянием. Если без учета затухания уравнение распространения звуковой волны в направлении координаты x имеет вид

$$U = U_0 e^{-j\omega t - kx}, \quad (2.1)$$

то с учетом затухания

$$U = U_0 e^{-\delta x} e^{-j\omega t - kx}, \quad (2.2)$$

где $\delta = \delta_{\text{пог}} + \delta_{\text{рас}}$ – коэффициент затухания,
 $\delta_{\text{пог}}$ – коэффициент поглощения,
 $\delta_{\text{рас}}$ – коэффициент рассеяния;

с учетом расхождения волны в сферической системе координат уравнение имеет вид

$$U = U_0 (G/r) e^{-\delta x} e^{-j\omega t - kr}, \quad (2.3)$$

где G – размерный коэффициент, м.

В формуле (2.3) полагается, что начало координат совпадает с эффективным акустическим центром излучателя - точкой, из которой наблюдателю в дальней зоне волны кажутся расходящимися. Положение этой точки не совпадает с местом контакта преобразователя и материала. Положение её можно определить, зная частоту колебаний f , скорость излучаемых волн C , диаметр пьезопреобразователя D .

2.2. Звуковое поле дискового излучателя

Если окружающая среда однородна и изотропна, то излучатель создает в ней звуковое поле, имеющее вблизи него почти цилиндрическую форму (ближняя зона, зона дифракции Френеля), а с некоторого расстояния L приобретающее форму усеченного конуса (рис. 2.1) с углом 2θ при вершине (дальняя зона, зона дифракции Фраунгофера).

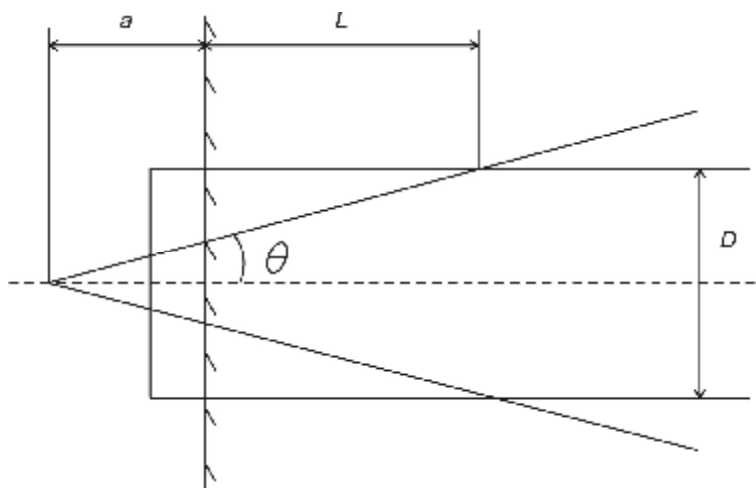


Рис.2.1. Звуковое поле дискового излучателя

Протяженность ближней зоны может быть определена по формуле

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4C}, \quad (2.4)$$

где D – диаметр излучателя;

λ – длина волны УЗК;

f – частота УЗК;

C – скорость распространения УЗК в среде.

Скорость распространения УЗК в различных средах приведена в табл.2.1.

Таблица 2.1

Скорость распространения продольных УЗ-волн в различных средах

Материал	C , м/с
Сталь малоуглеродистая	5850
Дюралюминий	6260
Медь	4700
Оргстекло	2670
Стекло кварцевое	5500

Половину угла раствора конуса, в котором почти полностью концентрируется генерируемая излучателем энергия, можно определить из соотношения

$$\sin \theta = 1,22 \lambda / D. \quad (2.5)$$

Заметим, что, строго говоря, в пределах этого конуса интенсивность УЗК неодинакова. Этот факт находит отражение в диаграммах направленности излучателей.

Ближняя зона не может быть использована для измерения затухания, так как в ней наблюдаются интерференционные эффекты. Это накладывает ограничения на минимальную толщину исследуемых образцов.

2.3. Метод определения коэффициента затухания

Метод определения затухания основан на измерении изменения амплитуды при прохождении некоторого расстояния ($r_2 - r_1$).

Для расстояния r_1 формула (2.3) принимает вид

$$U_1 = U_0 (G/r_1) e^{-\delta r_1} e^{-j\omega t_1 - kr_1}, \quad (2.6)$$

для расстояния r_2

$$U_2 = U_0 (G/r_2) e^{-\delta r_2} e^{-j\omega t_2 - kr_2}. \quad (2.7)$$

Разделив (2.6) на (2.7), имеем

$$U_1/U_2 = r_2/r_1 e^{\delta(r_2 - r_1)} \quad (2.8)$$

(множители $\exp(-j\omega t_1 - kr_1)$, $\exp(-j\omega t_2 - kr_2)$ не влияют на амплитуду импульса, так как каждому r соответствует t , при котором $\exp(-j\omega t - kr) = 1$).

Преобразуем (2.8):

$$U_1/U_2 \cdot r_1/r_2 = e^{\delta(r_2 - r_1)}; \ln(U_1/U_2) - \ln(r_1/r_2) = \delta(r_2 - r_1) \quad (2.9)$$

и окончательно получим

$$\delta = [\ln(U_1/U_2) - \ln(r_1/r_2)] / (r_2 - r_1). \quad (2.10)$$

Обычно для измерений использует первый и второй донные импульсы. Тогда для образца толщиной A :

$$\begin{aligned} r_1 &= 2a + 2A; \\ r_2 &= 2a + 2A + 2A = 2a + 4A; \\ r_2 - r_1 &= 2A, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где a – расстояние от поверхности до эффективного акустического центра - см. рис.2.1).

Описанная методика определения затухания УЗК в среде не учитывает потерь при отражении импульса от контактирующей с пьезопреобразователем поверхности образца. Это может дать значительные ошибки при измерении малых δ .

Описание лабораторной работы № 2 «Измерение затухания ультразвука в материалах»

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с устройством ультразвукового дефектоскопа УД-10 УА.

1.2. Освоить методику измерения затухания ультразвука в твёрдых телах .

1.3. Провести сравнительный анализ коэффициентов затухания в предложенных материалах.

2. Используемые приборы

При выполнении работы используются дефектоскоп УД-10 УА; прямые пьезопреобразователи с рабочими частотами 1,25 МГц, 2,5 МГц, 5 МГц, диаметрами 20, 12 и 5 мм; набор образцов для исследования и штангенциркуль.

3. Программа работы

3.1. Рассчитать минимальную толщину образцов, которые могут быть использованы для измерения затухания ультразвука в малоуглеродистой стали, меди, алюминии, оргстекле при измерениях различными преобразователями (учесть рабочую частоту и диаметр пьезопластины преобразователей). Проверить, удовлетворяют ли размеры предложенных образцов необходимым требованиям.

3.2. Рассчитать положение эффективного акустического центра для предположенных материалов и преобразователей.

3.3. Провести измерения затухания ультразвука в различных точках каждого образца. Толщину образца измерять в месте прозвучивания.

3.4. Результаты расчётов (п.3.1, 3.2) и измерений (п.3.3) оформить в виде таблицы. Рассчитать коэффициенты затухания исследованных образцов. Оценить погрешность измерений. Коэффициенты затухания представить в виде $\delta = \delta \pm \Delta\delta$ и сравнить со справочными данными.

Таблица 2.2

Сводная таблица расчётных и экспериментальных параметров для определения коэффициентов затухания

Материал	L , мм	a , мм	N_i , ДБ	A_i , мм	r_{li}	r_{2i}	$\delta_i, м^{-1}$

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. Толщина образцов для исследования ограничена снизу условием $A \gg L$, где L – протяжённость ближней зоны. L может быть рассчитана по соотношению (2.4) с использованием справочной табл.2.

4.2. Положение эффективного акустического центра может быть получено при помощи геометрического построения звукового поля дискового излучателя в каждом из образцов (рис. 2.1) и с использованием формул (2.4), (2.5).

4.3. Измерения с помощью затухания проводятся прибором УД-10 УА.

4.3.1. Подготовка прибора к работе:

- присоединить совмещённый пьезопреобразователь к одному из выходных разъёмов "□" блока генератора, другой разъём блока генератора соединить специальным кабелем длиной 300 мм с входным разъёмом "□" блока усилителя;
- установить ручки управления следующим образом:

на блоке синхронизации и развёртки

- кнопки "ВНЕШНЯЯ" и "ЗАДЕРЖКА" переключателя "СИНХР" отпущены;

- все кнопки переключателя "ЗАДЕРЖКА μs " отпущены;

на блоке усилителя

- тумблер "ВРЧ-ВРЧ-СТУПЕНЧАТАЯ" – в положении "ВРЧ СТУПЕНЧАТАЯ";
 - регуляторы "ГЛУБИНА", "НАЧАЛО", "КРУТИЗНА ВРЧ", "УСИЛЕНИЕ", "ОТСЕЧКА" – в крайнее левое положение;
 - кнопки переключателя "ОСЛАБЛЕНИЕ dB " отпущены;
- на блоке ступенчатой временной регулировки (СВРЧ)*

- регулятор "ЗАДЕРЖКА ВКЛ" вывести влево до щелчка;
- регуляторы "КРУТИЗНА ЗОНЫ" – в крайнее левое положение;

на блоке автоматического сигнализатора (АС)

- кнопки "ЗАПУСК", "ТЕНЕВОЙ", кнопки переключателя "ПОМЕХЗАЩИТА", "ЗАДЕРЖКА", "ЗОНА" отпущены;
- регуляторы "УРОВЕНЬ" – в крайнее левое положение;

на блоке генератора УЗК

- регулятор "МОЩНОСТЬ" – в крайнее правое положение.

4.3.2. Порядок работы:

- включить прибор в сеть поворотом регулятора " $\odot$ " вправо до щелчка на передней панели индикаторного блока. Время прогрева – 30 мин;
- установить начало зондирующего импульса против нуля шкалы, отрегулировать яркость и четкость линии;
- установить диапазон контроля нажатием соответствующей кнопки переключателя "РАССТОЯНИЕ mm ", руководствуясь толщиной образца (его толщина должна быть порядка 80 % от полной шкалы диапазона контроля);
- включить задержку нажатием кнопки "20 ВКЛ" и с помощью регулятора "ЗАДЕРЖКА μS ПЛАВНО" на выбранном диапазоне переключателя добиться появления на экране ЭЛТ первого и второго эхо-сигналов;
- используя регулятор "МОЩНОСТЬ", установить необходимую амплитуду сигналов U_1 , U_2 ;
- отношение $\ln U_1/U_2$ удобно получить на приборе с использованием аттенюатора. Измерив на экране значение U_2 , переключателем "ОСЛАБЛЕНИЕ dB " дефектоскопа

уменьшить U_1 до прежнего значения U_2 и зафиксировать значение N , дБ.

Калиброванный регулятор усиления (аттенюатор) "ОСЛАБЛЕНИЕ dB " имеет диапазон от 0 до 81 дБ. Требуемое ослабление получается путем включения в определенном наборе отдельных звеньев: "1", "2", "4", "8", "16", "20", "30 дБ".

По определению,

$$N, dB = 20 \lg U_1/U_2 = 20 / 2,3 \ln U_1/U_2, \quad (2.12)$$

отсюда $\ln U_1/U_2 = N, dB / 8,6$.

4.4. Рассчитывается коэффициент затухания.

4.4.1. Определить среднее значение коэффициента затухания $\bar{\delta}$ по формуле (2.10) с учетом (2.12) и (2.11), используя средние значения из пяти измерений $\bar{N}$ и $\bar{A}$.

4.4.2. Определить значения среднеквадратичных отклонений δ_N и δ_A величин N и A по стандартной программе расчета на микрокалькуляторе МК-64.

4.4.3. Определить доверительный интервал ε случайной погрешности измерения величины δ .

4.4.4. Определить неисключённые систематические погрешности θ_N и θ_A измерения величин N и A .

4.4.5. Определить неисключённую систематическую погрешность θ_δ измерения величины δ .

4.4.6. Определить суммарную погрешность $\Delta\delta$ измерения величины (ГОСТ 8.207-76).

4.4.7. Результат представить в виде $\delta = \bar{\delta} \pm \Delta\delta$, $p=0,95$.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета – по образцу.

Название и цель работы

Описание экспериментальной установки.

– Приборы и вычислительная техника, используемые в работе (краткая техническая характеристика).

Теоретическая часть.

- Расчет по формулам (запись физических величин и расшифровка буквенных обозначений в формуле согласно ГОСТ 8.417-81).
- Графические зависимости, используемые в расчете (выполнять согласно ГОСТ 2.319-81).
- Таблица результатов расчета (ГОСТ 2.105-81).

Экспериментальное исследование.

- Методика проведения измерений.
- Экспериментально снятые зависимости, представленные графически (ГОСТ 2.319-81).
- Таблица результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).

Оценка погрешности результатов измерений.

- Методика расчета погрешности.
- Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Каковы физические причины затухания ультразвука в твердых телах?
- 6.2. Как зависит коэффициент затухания от размера неоднородностей материала?
- 6.3. Оценить размер зерна малоуглеродистой стали, при котором затухание УЗК на частоте $f=2,5$ МГц будет наибольшим.
- 6.4. Звуковое поле какой конфигурации создает в твердом теле дисковый излучатель?
- 6.5. Что такое ближняя зона Френеля и почему она непригодна для ультразвуковых исследований характеристик твердого тела?
- 6.6. В чем сущность метода определения величины затухания УЗК в твердых телах?

3. Коэффициенты пьезоэлектрического преобразования и методы их измерения

3.1. Понятие коэффициента преобразования

Коэффициент преобразования K_{UU} является важнейшей характеристикой пьезопреобразователей (ПП) и входит в число гостимулируемых параметров ПП (ГОСТ 23702-79).

Коэффициент преобразования определяется через передаточную функцию преобразователя. Передаточная функция преобразователя – это комплексное отношение двух функций от частоты выходного сигнала преобразователя к входному сигналу при определенных электрической и акустической нагрузках преобразователя.

В режиме излучения входными сигналами являются электрическое напряжение $U_{и}$ или сила тока $I_{и}$; выходными – упругое напряжение или давление $P_{и}$. В режиме приема входные сигналы – упругое напряжение или давление в падающей волне $P_{п}$, выходные – электрическое напряжение или ток ($U_{п}$, $I_{п}$).

В совмещенном режиме входными сигналами являются $U_{и}$, $I_{и}$, выходными – $U_{п}$, $I_{п}$.

Передаточная функция совмещенного режима

$$K_{ип} = \frac{U_{п}}{U_{и}} \quad (3.1)$$

есть коэффициент преобразования ПП.

Параметр $U_{п}$ определяется в условиях холостого хода на электрических клеммах преобразователя, когда нагрузка (входное сопротивление) измеряющего устройства или усилителя существенно больше 100 кОм.

Любую из передаточных функций можно представить в виде

$$\overline{K}_{\ell m} = \overline{K}_{\ell m}(j\omega) e^{-j\varphi(j\omega)}, \quad (3.2)$$

где $\overline{K}_{\ell m}(j\omega)$ и $\varphi(j\omega)$ – модуль и фаза передаточной функции; K_{lm} – коэффициент преобразования, равный значению модуля на частоте максимального преобразования $\omega_{lm} = 2\pi f_{lm}$ в области рабочих частот.

Наиболее широко употребляемые схемы электрического возбуждения и согласования ПП с усилителями могут быть описаны в режиме возбуждения схемой, показанной на рис.3.1, а, в режиме прие-

ма – схемой на рис.3.1, б. Для этого случая коэффициент двойного преобразования

$$\overline{K}_{uu} = \frac{\beta^2 (1 - \overline{R}_{12}^2)}{x \omega C_{\Pi}} \cdot \frac{(1 - a_1)^2 (1 - R_{13} a_1)^2}{(1 - \overline{R}_{12} \overline{R}_{13} a_1^2)^2} \cdot \frac{(Z_{\Pi} Y_{\mathfrak{Z}} + 1)^{-1} K_{FF}^2}{[Z_{\Pi} (1 + R_{\Gamma} Y_{\mathfrak{Z}}) + R_{\Gamma}]}, \quad (3.3)$$

$$\text{где } Y_{\mathfrak{Z}} = \frac{1 - x_{\mathfrak{Z}}^2 + j x_{\mathfrak{Z}} / Q_{\mathfrak{Z}}}{j x_{\mathfrak{Z}} R / Q_{\mathfrak{Z}}}; \quad x_{\mathfrak{Z}} = \omega / \omega_{\mathfrak{Z}}; \quad \omega_{\mathfrak{Z}} = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$Q_{\mathfrak{Z}} = \omega_{\mathfrak{Z}} C R; \quad Q_{\mathfrak{Z}} = \omega_{\mathfrak{Z}}^{-1} R / L; \quad x = \omega / \omega_0; \quad \omega_0 = \pi C_1 / l_1;$$

β – коэффициент электромеханической связи.

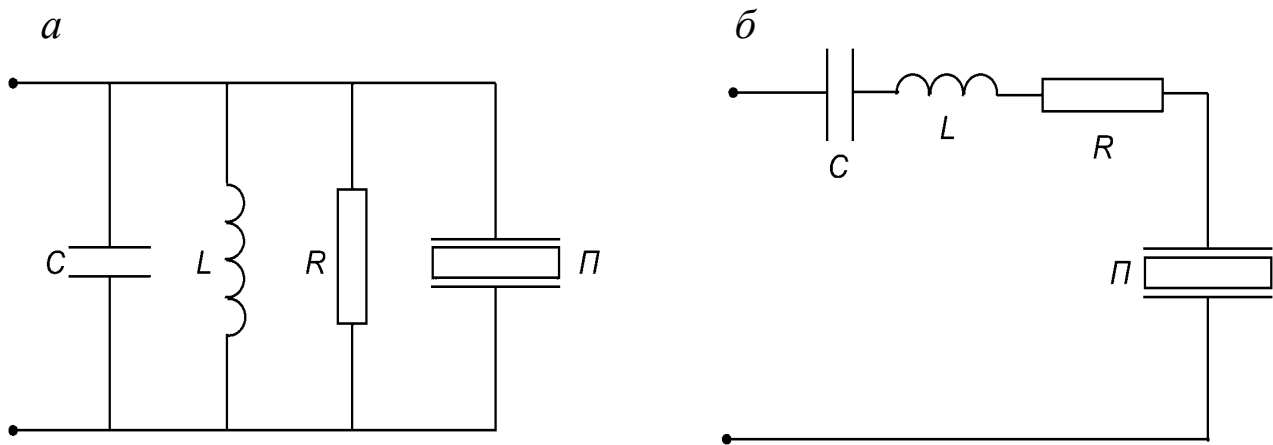


Рис.3.1. Схема включения преобразователей

В формуле (3.3) $a_1 = e^{-p\tau_1}$; $\tau_1 = \frac{l_1}{C_1} - l_1$ – толщина пьезопластины; C_1 – скорость УЗК в пьезопластине; Z_{Π} – электрическое сопротивление преобразователя; $R_{12,13}$ – обобщенные коэффициенты отражения на границах пьезопластины, определяемые, как и K_{FF} , через удельные акустические сопротивления сред: демпфер, пьезопластины, нагрузку.

В реальных условиях величина коэффициента преобразования зависит от многих факторов, таких, например, как свойства пьезоматериала, условия работы (температура, наличие поляризующего напряжения, демпфирование, согласование со средой, на которой проводятся измерения, и т.д.).

Описание лабораторной работы № 3 «Измерение коэффициента пьезоэлектрического преобразования»

1. Цель работы

- 1.1. Освоить методику определения коэффициента преобразования.
- 1.2. Ознакомиться с порядком и зависимостью коэффициента преобразования от различных факторов.

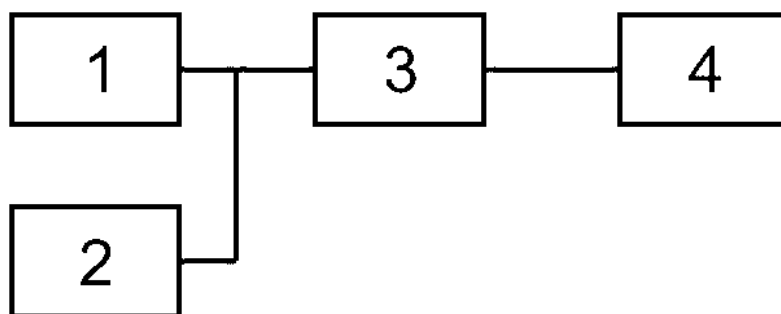
2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов: дефектоскопа УД -10-УА; осциллографа С1-150; комплекта пьезопреобразователей.

2.2. В качестве акустической нагрузки используется образец в виде плоскопараллельной пластины из стали (дюралюминия).

3. Программа работы

3.1. Измерения проводить на дефектоскопе, к генератору которого подключают исследуемый преобразователь по блок-схеме (рис.3.2).



*Рис.3.2. Блок-схема измерения коэффициента преобразования:
1 -дефектоскоп; 2 -осциллограф; 3 -преобразователь;
4 -акустическая нагрузка*

3.2. Используя дополнительный делитель, измерить амплитуду напряжения возбуждения U_{Γ} , затем измерить амплитуду принятого сигнала U_{Π} .

Данные занести в таблицу.

Таблица 3.1

Результаты измерения коэффициента преобразования

Номер пьезо-преобразователя	Номер измерения	U_{Γ} , В	U_{Π} , В	A	K
1	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
2	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Поскольку распространение УЗК в акустической нагрузке сопровождается уменьшением амплитуды волны из-за расхождения и затухания, полученное отношение U_{Π}/U_{Γ} необходимо умножить на поправочный коэффициент:

$$A = \frac{2\lambda \cdot r \cdot \exp(\delta r)}{S_a}, \quad (3.4)$$

где λ – длина волны УЗК;

r – расстояние, пройденное УЗК;

S_a – площадь преобразователя;

δ – коэффициент затухания.

3.3. Повторить измерения для другого значения напряжения генератора.

3.4. Повторить измерения для другого типа акустической нагрузки.

3.5. Измерить частоту зондирующего импульса и донного импульса.

3.6. Рассчитать ожидаемое время до эхо-сигнала по формуле

$$t = \frac{2D}{C}, \quad (3.5)$$

где D – толщина образца.

3.7. Измерить по экрану осциллографа фактическое время распространения УЗК в материале образца.

3.8. Рассчитать фактическую скорость УЗК в образце (п.3.6).

3.9. Определить коэффициент преобразования K .

3.10. Рассчитать суммарную погрешность определения значения коэффициента преобразования.

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. Указания к выполнению п.3.1.

4.1.1. Присоединить кабель с совмещенной искательной головкой к выходному разъему "□" блока генератора, другой разъем блока генератора соединить кабелем длиной 300 мм с входным разъемом "□" блока усилителя.

При работе с раздельно-совмещёнными головками кабели головки подключить соответственно к указанным разъемам.

4.1.2. Установить следующим образом ручки управления:

- кнопка "ВНЕШНЯЯ" переключателя "СИНХР" отпущена;
- кнопки переключателя "ЗАДЕРЖКА μS " отпущены;
- тумблер "ВРЧ-ВРЧ СТУПЕНЧАТАЯ" в положении "ВРЧ СТУПЕНЧАТАЯ";
- регуляторы "ГЛУБИНА", "НАЧАЛО", "КРУТИЗНА" "ВРЧ", "УСИЛЕНИЕ", "ОТСЕЧКА" в крайнем левом положении;
- кнопки переключателя "ОСЛАБЛЕНИЕ dB " отпущены;
- регулятор "ЗАДЕРЖКА ВКЛ" влево до щелчка;
- "КРУТИЗНА ЗОНЫ" в крайнем левом положении;
- кнопка "ЗАПУСК" отпущена;
- кнопка "ТЕНЕВОЙ" отпущена;
- кнопки "ПОМЕХОЗАЩИТА" отпущены;
- кнопки переключателей "ЗАДЕРЖКА" и "ЗОНА" I и II каналов отпущены;
- регуляторы "ЗАДЕРЖКА" и "ЗОНА" I и II каналов в крайнем правом положении;
- регуляторы "УРОВЕНЬ" I и II каналов в крайнем левом положении;
- регулятор "МОЩНОСТЬ" в крайнем правом положении.

4.1.3. Получить четкое изображение донного импульса на экране ЭЛТ дефектоскопа.

Для этого следует:

- включить прибор поворотом регулятора "☉";
- установить диапазон контроля кнопки "РАССТОЯНИЕ *mm*";
- установить начало зондирующего импульса против нуля шкалы регулятором "-" и отрегулировать яркость и четкость линии регуляторами "☼", "☉", "☉";
- установить горизонтальную развертку регулятором "|";
- установить искательную головку на нагрузку через слой контактной жидкости и обеспечить плотный контакт;
- определить следующий режим синхронизации в отпущенном положении кнопки "ВНЕШНЯЯ" переключателя "СИНХР": генератор развертки и генератор зондирующих импульсов запускаются от внутреннего синхронизатора;
- величину задержки запуска развертки для послойного контроля задать кнопками и регуляторами переключателя "ЗАДЕРЖКА μS ";
- частоту следования изменять регулятором "ЧАСТОТА СЛЕДОВАНИЯ" в зависимости от выбранного диапазона контроля;
- шумы усилителя и структурные шумы от изделия на экране ЭЛТ при максимальном усилении (регулятор "УСИЛЕНИЕ") убрать регулятором "ОТСЕЧКА";
- мощность (амплитуду) зондирующего импульса изменять регулятором "МОЩНОСТЬ";
- регулятором "ОСЛАБЛЕНИЕ *dB*" вводить калиброванное ослабление от 0 до 81 дБ.

4.1.4. Амплитуду зондирующего импульса (U_r) измерять осциллографом перед подключением искательной головки непосредственно на выходе генератора дефектоскопа "☐".

4.1.5. Амплитуду донного импульса (U_n) измерять после прохождения выходного сигнала искателя через гасящую цепочку входного аттенюатора дефектоскопа для исключения влияния зондирующего импульса (амплитуда которого может достигать величины $\sim 10^2$ В). Подключение осциллографа при этом производится к гнездам, выведенным на переднюю панель блока усиления дефектоскопа.

4.2. Указания к выполнению п.3.5.

Частота зондирующего и донного импульсов измеряется по экрану осциллографа с учетом длительности развертки, для этого необходимо на осциллографе наблюдать, по крайней мере, по два зондирующих и донных сигнала.

4.3. Указания к выполнению п.3.7.

Измерение фактического времени распространения УЗК в материале образца производится по известной длительности развертки осциллографа.

4.4. К п.3.10.

4.4.1. Определить среднеквадратичное отклонение напряжения преобразователя и генератора по программе на МК ЭВМ "М-64" и доверительный интервал случайной погрешности измерения коэффициента преобразования.

4.4.2. Определить границы неисключённой систематической погрешности измерения U_{Π} и U_r , учитывая, что основная допускаемая погрешность при измерении напряжения импульсной формы осциллографом не превышает $\pm 12\%$.

4.4.3. Определить неисключённую систематическую погрешность значения K :

$$\theta^{исп} = K \sqrt{[(\partial K / \partial U_{\Pi}) \theta_{\Pi}]^2 + [(\partial K / \partial U_r) \theta_r]^2}, \quad (3.6)$$

где $\theta_{n, r}$ – неисключенная систематическая погрешность, $K=1,1$ при $P=0,95$.

4.4.4. Определить суммарную погрешность измерения K (ГОСТ 6.207-76).

4.4.5. Результат представить в виде

$$K = \bar{K} \pm \Delta K, \quad p=0,95.$$

5. Содержание отчета

5.1. Отчет оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

Описание экспериментальной установки.

– Приборы, используемые в работе.

– Структурные схемы измерений.

Теоретическая часть.

– Основные формулы, используемые в работе (ГОСТ 8.418-81).

– Основные формулы для оценки погрешностей.

Экспериментальное исследование.

– Методика проведения измерений.

– Наблюдаемые осциллограммы.

– Таблицы результатов измерений (ГОСТ 2.105-81).

Оценка погрешности результатов измерений.

Анализ результатов измерений.

Заключение.

6. Контрольные вопросы

6.1. Дать определения передаточной функции преобразователя.

6.2. Какими величинами характеризуется передаточная функция преобразователя в раздельно-совмещенном режиме?

6.3. Как измеряется коэффициент преобразования пьезопреобразователя?

6.4. Каковы порядки величин напряжений, подаваемых на преобразователи и снимаемых с них?

6.5. Какими факторами определяется величина K в реальных условиях?

6.6. Объясните метод определения погрешности косвенного измерения.

ЧАСТЬ II. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ

4. Эхо-метод дефектоскопии

Достоверность метода ультразвуковой дефектоскопии зависит от правильности выбора основных параметров контроля и точности соблюдения их в процессе изделий. Такие параметры, как частота УЗ-колебаний и размеры пьезопреобразователя, определяются типом применяемых дефектоскопа и искателя и практически остаются неизменными в процессе их эксплуатации. В то же время мертвая зона, разрешающая способность, угол ввода луча, точность глубиномера и некоторые другие параметры во многом зависят от работоспособности и настройки аппаратуры. В связи с этим необходима стандартизация методов проверки следующих основных параметров с помощью специальных эталонов: условной чувствительности, угла ввода луча, точности работы глубиномера, разрешающей способности и мертвой зоны.

4.1. Мертвая зона

При совмещенной и раздельно-совмещенных схемах на вход приемного тракта кроме эхо-сигнала от выявляемых дефектов поступает зондирующий импульс. Если дефект в зоне под поверхностью расположен так, что эхо-сигнал от него возвращается ранее, чем кончилось излучение зондирующего импульса, то дефект не будет обнаружен. Зону под поверхностью, на которой установлен искатель и дефекты в которой не могут быть выявлены эхо-методом, называют мертвой зоной (МЗ).

Величина МЗ зависит от длительности зондирующего импульса τ , времени восстановления τ_y , коэффициента усиления приемного тракта после воздействия зондирующего импульса, а также от конструкции искателя.

Действительно, для раздельной регистрации эхо-сигнала от дефекта и зондирующего импульса необходимо, чтобы время T от момента излучения зондирующего импульса и до момента возвращения эхо-сигнала было больше времени $(\tau + \tau_y)$.

Время T связано с глубиной залегания дефекта соотношением:
— для прямого искателя

$$T = \frac{2H}{C_l}; \quad (4.1)$$

– для наклонного искателя

$$T = \frac{2H}{C_t \cos \alpha} + 2t_{\Pi}, \quad (4.2)$$

где H – глубина расположения дефекта;

C_l, C_t – скорость продольной и поперечной УЗ-волн;

α – угол ввода УЗ-колебаний;

t_{Π} – время прохождения УЗ-импульса через призму.

Приравнявая время T к длительности $(\tau + \tau_y)$, получаем минимальную величину МЗ:

– для прямых искателей

$$M_{\min} = [(\tau + \tau_y)/2]C_l, \quad (4.3)$$

– для наклонных искателей

$$M_{\min} = [(\tau + \tau_y - 2t_{\Pi})/2]C_t \cos \alpha. \quad (4.4)$$

Из выражений (4.3) и (4.4) видно, что сокращение длительности τ и τ_y уменьшает величину мертвой зоны. Длительность зондирующего импульса τ может быть уменьшена путем увеличения частоты колебаний зондирующих импульсов. Объясняется это тем, что с увеличением частоты (а также размеров призмы) падает уровень реверберационных шумов, обуславливающих, в основном, МЗ наклонных искателей. Для сокращения периода восстановления τ_y на вход приемного тракта включают цепочку, шунтирующую зондирующий импульс, или запирают приемник на время действия зондирующего импульса.

При $(\tau + \tau_y) < 2t_{\Pi}$, что имеет место в практике, мертвая зона при работе призматическими искателями могла бы отсутствовать, если бы ультразвуковые колебания после многократных отражений в призме полностью поглощались и не возвращались на пьезоэлектрическую пластинку. Эхо-сигналы, появляющиеся после многократных отражений зондирующего импульса в призме искателя, делают невозможной регистрацию эхо-сигналов от дефектов, расположенных близко от поверхности, создавая тем самым МЗ величиной 3-10 мм.

При контроле некоторых изделий МЗ не должна превышать 1-4 мм. Величина МЗ, обусловленной многократными отражениями УЗ-волн в призме искателя, может быть значительно снижена путем введения в приемный тракт системы коррекции во времени коэффициента усиления, ограничения по минимуму и селекции во времени поступающих на вход сигналов.

Коррекцию во времени коэффициента усиления приемного тракта следует подбирать так, чтобы в процессе излучения зондирующего импульса усилитель был заперт и его коэффициент усиления восстанавливался к моменту полного затухания реверберационных шумов в призме искателя. В дефектоскопе должна быть предусмотрена плавная регулировка характера изменения во времени коэффициента усиления приемного тракта.

В качестве системы временной коррекции усиления приемного тракта используется система временной регулировки чувствительности дефектоскопа ВРЧ. С помощью ручки ВРЧ регулируются амплитуда и длительность корректирующего импульса. Система ВРЧ не только используется для уменьшения МЗ, но и обеспечивает постоянство чувствительности контроля изделий независимо от глубины расположения дефекта. В связи с этим система ВРЧ должна корректировать коэффициент усиления приемника в течение всего периода возможного приема эхо-сигналов, причем коррекция должна выполняться с учетом дифракции и затухания УЗ в контролируемом изделии. При отыскании дефектов перед началом работы необходимо оценить величину МЗ для конкретного материала и конкретного типа дефектов; следовательно, величина МЗ зависит не только от конструкции искателей и характеристик приемно-излучающего тракта дефектоскопа, но и определяется акустическими характеристиками контролируемого материала и эквивалентной площадью отражателей (дефектов), для которых она оценивается. МЗ следует оценивать по выявляемости отражателей заданного размера, выполненных в образце из контролируемого материала. В практике дефектоскопии МЗ прямых искателей весьма часто определяют по выявлению донного сигнала. При работе наклонным искателем МЗ принято характеризовать минимальной глубиной расположения цилиндрического отражателя, эхо-импульс от которого можно отличить от зондирующего импульса и эхо-импульсов шумов, возвращающихся из призмы. Цилиндрический отражатель диаметром 2 мм и длиной более ширины ультразвукового

пучка должен быть выполнен в образце из контролируемого материала (ГОСТ 14782-69). Очевидно, что чем больше угол призмы наклонного искателя, тем меньше мертвая зона.

Для определения МЗ необходимо в образце из материала, аналогичного по акустическим свойствам контролируемому, выполнить на заданной глубине отражатели диаметром 2 мм. Если необходимо проверить только соответствие МЗ дефектоскопа с искателем заданной величины, то достаточно выполнить в образце по одному отверстию. Очевидно, что такие отверстия могут быть изготовлены в эталоне, предназначенном для измерения угла ввода луча.

МЗ проверяют по контрольному образцу № 2, если контролируемое соединение выполнено из малоуглеродистой и низколегированной стали. При контроле соединений, отличающихся от малоуглеродистых и низколегированных сталей, МЗ проверяют по контрольному образцу № 2А, блок которого выполнен из контролируемого металла. Глубина расположения отверстий в образце контрольном № 2А указывается в документации на контроль.

4.2. Точка выхода луча

Точку выхода луча (центр излучения искателя) определяют по эталону № 3. Центр излучения искателя лежит против центра окружности образца при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала максимальна.

Для обеспечения необходимой достоверности контроля угол ввода луча должен быть установлен с точностью не менее 2°.

4.3. Угол ввода луча

Под углом ввода луча α следует понимать угол между нормалью к поверхности изделия, проходящей через точку ввода луча, и линией, соединяющей центр цилиндрического отражателя и точку луча при установке искателя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала отражателя максимальна.

Угол ввода луча измеряют по контрольному образцу № 2, если контролируемое изделие выполнено из малоуглеродистой низколегированной стали.

4.4. Разрешающая способность

Разрешающая способность эхо-метода определяется минимальным расстоянием между двумя одинаковыми дефектами, при котором эти дефекты фиксируются как отдельные. Различают лучевую разрешающую способность (по дальности) и фронтальную разрешающую способность (разрешающую способность по углу).

Лучевая разрешающая способность определяется минимальным расстоянием Δr между двумя отдельно выявляемыми дефектами, расположенными в направлении хода луча вдоль акустической оси преобразователя. Такие отражатели в виде пазов предусмотрены в образце № 1.

Фронтальная разрешающая способность определяется минимальным расстоянием δ_1 между двумя отдельно выявляемыми дефектами, залегающими на одной глубине.

Фронтальная разрешающая способность так же, как и лучевая разрешающая способность, зависит от направленности УЗ-поля и от скорости распространения волны в контролируемом материале.

Описание лабораторной работы № 4 «Изучение эхо-метода дефектоскопии»

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с устройством ультразвукового дефектоскопа УД-13 УРВ.

1.2. Приобрести практические навыки поверки дефектоскопа и подготовки его к работе.

1.3. Провести измерения параметров дефектов эхо – методом на эталонных образцах.

2. Используемые приборы

При выполнении работы используются:

- ультразвуковой импульсный дефектоскоп УД-13 УРВ с набором пьезопреобразователей;
- эталоны для настройки прибора;
- образцы с искусственными дефектами.

3. Программа работы

3.1. Определить точку выхода луча (стрелу преобразователя) для прямых и наклонных преобразователей с углом призмы $\beta=40^\circ$, 50° , 60° по контрольному образцу № 3.

3.2. Определить угол α ввода луча для наклонных преобразователей с углом призмы $\beta=40^\circ$, 50° , 60° по контрольному образцу № 2. Провести не менее 5 измерений.

3.3. Настроив дефектоскоп на определенную условную чувствительность по контрольному образцу № 2 в диапазоне от 0 до 30 дБ с шагом 4-6 дБ, измерять (при данной настройке) условную чувствительность по контрольному образцу № 1. Построить график взаимосвязи условных чувствительностей данного дефектоскопа для преобразователя с углом призмы $\beta=40^\circ$, радиусом $a=6$ мм на частоте $f=2,5$ МГц.

3.4. Проверить мертвую зону дефектоскопа на соответствие установленным требованиям контроля.

3.5. Измерить мертвую зону в образце с искусственными отражателями при работе прямыми преобразователями с $f=2,5$ МГц и $a=6$ мм.

3.6. Определить погрешность глубиномера дефектоскопа при работе прямым преобразователем $f=2,5$ МГц, $a=6$ мм по контрольным образцам № 1 и № 2.

3.7. Определить разрешающую способность по дальности дефектоскопа при работе прямым преобразователем $f=2,5$ МГц, $a=6$ мм по контрольному образцу № 1.

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. Подготовка прибора к работе.

4.1.1. Подключить преобразователь к разъему "Г" на задней панели дефектоскопа. Подключить телефоны.

4.1.2. Поставить регулятор усиления 1-го канала в крайнее правое положение, кнопки аттенюатора, а также кнопки "ПО СЛОЯМ" и "ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РАЗВЕРТКИ" отпустить, регуляторы "ВРЧ" и "ГЛУБИНА КОНТРОЛЯ" поставить в среднее положение, регуляторы усиления – в крайнее правое положение.

4.1.3. Включение дефектоскопа производить кнопкой "ВКЛ" на передней панели прибора.

4.2. К п.3.1.

Точка выхода луча определяется по контрольному образцу № 3. Проекция точки выхода луча наносится на боковую поверхность корпуса преобразователя против риски, соответствующей центру образца № 3, при установке преобразователя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от цилиндрической поверхности максимальна.

Стрелу преобразователя n , в мм, измеряют между передней гранью преобразователя и проекцией точки выхода луча.

При контроле изделий из металла, скорость распространения поперечной волны в котором меньше скорости распространения поперечной волны в стали образца № 3, и при использовании преобразователя с углом падения луча, близким ко второму критическому углу в образце №3, для определения точки выхода следует применять образец, аналогичный образцу № 3, но изготовленный из контролируемого материала.

4.3. К п.3.2.

Угол ввода отсчитывают по шкале контрольного образца № 2 против метки, соответствующей точке выхода луча, при установке преобразователя в положение с максимальной амплитудой эхо-сигнала, отраженного от цилиндрического отверстия диаметром 6 мм.

4.4. К п.3.3.

Условную чувствительность K дефектоскопа с преобразователем определяют по контрольным образцам № 1 и № 2. Условную чувствительность по контрольному образцу № 1 (преобразователь в положении A) выражают наибольшей глубиной, в мм, расположения отражателя, амплитуда эхо-сигнала от которого соответствует по величине порогу срабатывания автоматического сигнализатора дефектов (АСД) или достигает заданного уровня на экране ЭЛТ.

Условную чувствительность по контрольному образцу № 2 выражают разностью, в дБ, между показаниями N_x аттенюатора при данной настройке прибора и показанием N_0 аттенюатора, соответствующим максимальному ослаблению, при котором амплитуда эхо-сигнала от цилиндрического отверстия диаметром 6 мм на глубине 44 мм соответствует порогу срабатывания АСД или достигает заданного уровня на экране ЭЛТ (т.е. $K_y = N_0 - N_x$).

Пример 1

Настроить дефектоскоп с преобразователем $\beta = 40^\circ$ на условную чувствительность $K_y = 40$ мм по образцу № 1.

Устанавливают преобразователь в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отверстия, расположенного на глубине 40 мм, будет максимальной. Кнопки "ОСЛАБЛЕНИЕ, дБ" устанавливают в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала составляет 10-20 мм по экрану ЭЛТ. Вращая регулятор усиления блока дефектоскопического против часовой стрелки, устанавливают его в положение, при котором еще обеспечивается надежное срабатывание звукового индикатора от сигнала, отраженного от отверстия 40. При этом звуковой индикатор не должен срабатывать при озвучивании последующего отражателя (45 мм).

Пример 2

Настроить дефектоскоп с преобразователем $\beta=40^\circ$ на условную чувствительность $K_y=10$ дБ по контрольному образцу № 2.

Устанавливают переключатель "ОСЛАБЛЕНИЕ, дБ" в положение 6–8. Преобразователь - в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отверстия диаметром 6 мм будет максимальной. Кнопки "ОСЛАБЛЕНИЕ, дБ" устанавливают в положение N_0 , при котором амплитуда эхо-сигнала составляет 10-20 мм по экрану ЭЛТ. Вращением против часовой стрелки устанавливают регулятор усиления в положение, при котором еще обеспечивается надежное срабатывание звукового индикатора. Уменьшают показание N_0 "ОСЛАБЛЕНИЕ, дБ" на 10 дБ. При данном положении регулятора усиления и кнопок аттенюатора, равном $N_x=N_0-10$ дБ, условная чувствительность $K_y=10$ дБ.

4.5. К п.3.4.

Мертвую зону дефектоскопа с наклонными преобразователями проверяют по контрольному образцу № 3 при чувствительности, заданной в НТД на контроль. В данной работе мертвую зону определяют при условной чувствительности, которая должна быть (по образцу № 1) не менее 50 мм для преобразователя с $\beta=40^\circ$ и менее 40 мм для преобразователя с $\beta=50^\circ$. Мертвая зона считается соответствующей требованиям, если преобразователями типа П 121-2,5-40-Р выявляется отражатель диаметром 2 мм на глубине 8 мм, а преобразователями типа П 121-2,5-50-Р выявляется отражатель на глубине 3 мм в контрольном образце № 2. Маркировка преобразователей расшифрована на рис.4.1.

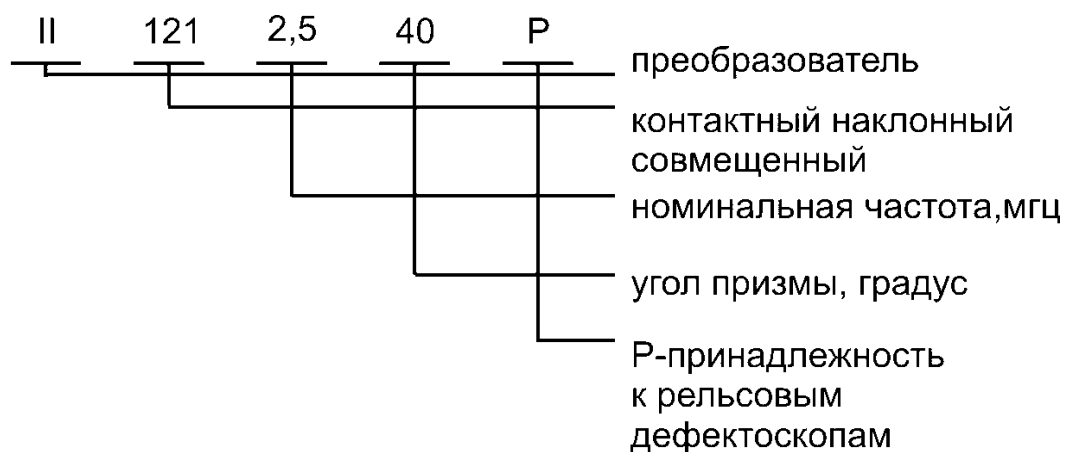


Рис.4.1. Обозначения наклонных преобразователей

4.6. К п.3.5.

Определение величины мертвой зоны следует начинать с регистрации сигналов от наиболее глубоко залегающих дефектов, поскольку они фиксируются лучше, а затем переходить к дефектам, более близким к поверхности.

4.7. К п.3.6.

Погрешность глубиномера определяют по контрольным образцам № 1 или № 2 путем измерения интервалов времени между зондирующим импульсом и донными эхо-сигналами при работе с прямым преобразователем.

По контрольному образцу № 1 фиксируют не менее двух отражений от прорези "20 мкс" ($n \geq 2$), а по контрольному образцу № 2 – не менее пяти отражений. Метку глубиномера поочередно совмещают с передним фронтом каждого из n полученных отражений и снимают отсчеты интервалов времени t_{un} в микросекундах по шкале "мкс".

Предел допускаемой основной погрешности измерения определяется по формуле

$$A_r = \frac{t_{un} - nt_0}{nt_0} 100\%, \quad (4.5)$$

где t_0 – интервал времени, мкс, указанный на контрольном образце.

4.8. К п.3.7.

Определение разрешающей способности по дальности производится прямым преобразователем при одновременном выявлении эхо-сигналов на экране ЭЛТ, фронты которых не сливаются, от дна и ступеньки глубиной 5 мм в контрольном образце № 1.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

Описание экспериментальной установки.

- Краткое описание прибора (функциональная схема, технические характеристики, используемые преобразователи).

Теоретическая часть.

- Методика проведения измерений.

Экспериментальные исследования.

- Экспериментально снятые зависимости, представленные графически (ГОСТ 2.319-81).
- Таблицы результатов измерений (ГОСТ 2.105-81).

Оценка погрешности результатов исследований.

- Оценка погрешности результатов измерений.
- Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. Чем определяется достоверность эхо-метода контроля?

6.2. Поясните по функциональной схеме принцип действия дефектоскопа.

6.3. Какие факторы ограничивают мертвую зону?

6.4. Опишите способ определения точки выхода и угла входа луча преобразователя.

6.5. Что такое разрешающая способность?

6.6. Зачем необходимо измерять условную чувствительность?

6.7. Назовите способы определения условной чувствительности.

6.8. Объясните назначение глубиномера.

5. Ультразвуковой резонансный метод контроля

Резонансный метод применяется чаще всего для дефектоскопии и измерения толщины тонких изделий при одностороннем доступе к ним. Резонансный метод основан на возбуждении в толще стенки изделия ультразвуковых колебаний и определений частот, на которых имеют место резонансы этих колебаний. В простейшем случае, представляя изделие как пластину, поверхности которой с обеих сторон свободны, условия возбуждения упругих резонансов можно записать в виде (5.1):

$$d = \frac{n \cdot \lambda}{2}, \quad (5.1)$$

т.е. при резонансе в толщине стенки изделия d укладывается целое число n полуволен ультразвука $\lambda/2$. Эту формулу можно также записать в виде

$$d = \frac{n \cdot C}{2 \cdot f_0}. \quad (5.2)$$

Как видно из формулы (5.2), для измерения толщины изделия из материала с известной скоростью звука C (табл. 5.1) нужно знать резонансную частоту f_0 и номер гармоники колебаний n .

При возбуждении колебаний высоких гармоник определить число n бывает довольно трудно. В этом случае находят вторую резонансную частоту f_0' , соответствующую гармонике m . Для нее можно записать аналогичное выражение (5.2).

Воспользовавшись известной алгебраической формулой

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_1 - a_2}{b_1 - b_2}, \quad (5.3)$$

получим

$$d = \frac{C(m - n)}{2(f_0' - f_0)}. \quad (5.4)$$

Для определения толщины по этой формуле достаточно знать разность частоты и разность гармоник двух резонансов колебаний изделия.

Момент установления резонансов обычно фиксируется по изменению амплитуды электрического сигнала приемного пьезоэлектри-

ческого преобразователя (ПЭП) на электронно-лучевой трубке дефектоскопа или осциллографа.

При установлении резонанса амплитуда колебаний резко возрастает вследствие совпадения частоты возбуждающего генератора с собственной частотой колеблющейся системы. Это приводит к тому, что потребляемая от генератора энергия не только не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. Эти явления обычно используют для фиксации моментов установления резонансов колебаний.

Признаком наличия дефектов в изделии является изменение частоты или исчезновение резонансов колебаний. Если дефект имеет вид расслоения, то частота резонансов изменяется таким образом, что измерения дают уменьшенное значение толщины изделия. Если дефект не параллелен поверхности изделия, то это приводит к исчезновению резонансов колебаний на толщине стенки.

Таблица 5.1

Акустические свойства различных сред

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	C_l , м/с
<i>Алюминий</i>	<i>2700</i>	<i>6260</i>
<i>Железо</i>	<i>7800</i>	<i>5910</i>
<i>Латунь</i>	<i>8500</i>	<i>4430</i>
<i>Медь</i>	<i>8900</i>	<i>4660</i>
<i>Оргстекло</i>	<i>1180</i>	<i>2679</i>
<i>Вода</i>	<i>998</i>	<i>1490</i>
<i>Масло трансформаторное</i>	<i>920</i>	<i>1400</i>
<i>Глицерин</i>	<i>1265</i>	<i>1923</i>
<i>Кварц</i>	<i>2200</i>	<i>5930</i>

Описание лабораторной работы №5 «Исследование ультразвукового резонансного метода контроля»

1. Цель работы

- 1.1. Освоить методику определения резонансных характеристик материалов.
- 1.2. Освоить методику измерений резонансным методом.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Блок-схема лабораторной установки представлена на рис.5.1. Установка состоит из высокочастотного генератора сигналов 1, осциллографа 2, исследуемого материала 3, пьезоэлектрических преобразователей 4. В случае (а) используются отдельные пьезоэлектрические преобразователи, в случае (б) – раздельно-совмещенные.

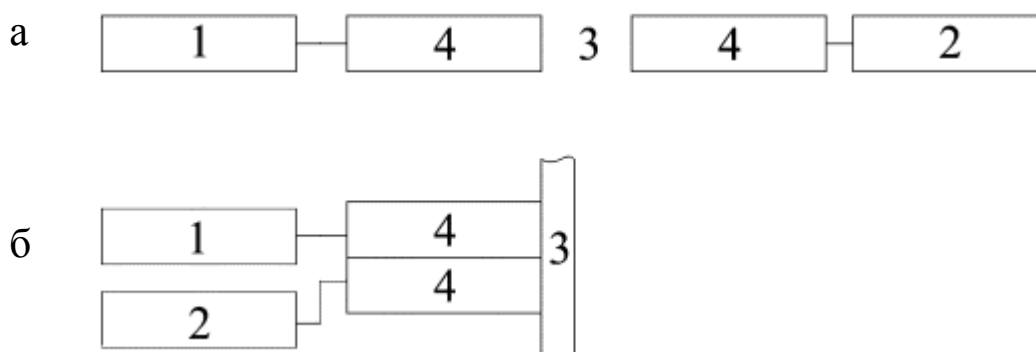


Рис.5.1. Блок-схема стенда для резонансных измерений

2.2. Используемые приборы.

При выполнении работы используются: генератор Г4-153, осциллограф, С1-49, набор пьезопреобразователей.

3. Программа работы

3.1. Исследование резонансных свойств жидкостей.

3.1.1. Собрать схему согласно рис.5.1, а.

3.1.2. Установить преобразователи друг на друга через слой контактной жидкости (вода, трансформаторное масло).

3.1.3. Измерения производить через 50 кГц в диапазоне 0,1-2,0 МГц.

3.1.4. По экспериментальным значениям построить амплитудно-частотную характеристику $A(f)$ и определить резонансную частоту f_0 .

3.1.5. При строгой параллельности излучающих (принимающих) поверхностей преобразователей в слое жидкости может установиться резонанс на частоте, определяемой из выражения (5.2). По ширине резонансной кривой на уровне 0,7 можно судить о затухании в системе, которое определяется из соотношения

$$\alpha = \frac{\Delta f}{f}, \quad (5.5)$$

где Δf – ширина полосы на уровне 0,7;

f_0 – резонансная частота;

или о добротности системы:

$$Q = \frac{1}{\alpha}. \quad (5.6)$$

3.1.6. По экспериментальным данным и согласно выражениям (5.2), (5.5), (5.6) определить затухание, добротность системы и толщину контактного слоя, считая $n=1$.

3.1.7. Повторить операции п.п. 3.1.2.–3.1.6 для другой контактной жидкости.

3.2. Измерение толщины изделия ультразвуковым резонансным методом.

3.2.1. Собрать схему согласно рис.5.1, б.

3.2.2. Рассчитать по формуле (5.2) и построить кривую зависимости $f(d)$ для первой гармоники ($n=1$), задаваясь значением толщины изделия.

3.2.3. Установить раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь через слой контактной жидкости (вода, трансформаторное масло).

3.2.4. Измерения производить через 10 кГц в диапазоне ± 100 кГц предлагаемой (рассчитанной из (5.2) при $n=1$) резонансной частоты. По экспериментальным значениям построить $A(f)$ и определить резонансную частоту f_0 .

3.2.5. Определить толщину изделия по формулам (5.2) и (5.7). Сравнить величины толщины изделия, определенные с учетом и без учета фазового набега.

4. Методические указания к выполнению работы

4.1 Порядок включения установки.

4.1.1. Включение высокочастотного генератора сигналов (Г4-153) производить **ТОЛЬКО ПРИ ПОДКЛЮЧЕННОЙ НАГРУЗКЕ**

«50 Ω»!!! Ручки «установка f » и «установка Θ » должны находиться в центральном положении. При включении тумблера «Сеть» должна загораться цифровая индикаторная панель.

4.1.2. Выставление сигнала 5 V осуществляется плавным сдвигом ручки «установка Θ » вправо. При этом не следует допускать резкого изменения напряжения (индикатор «контр. Θ » не должен мерцать).

4.1.3. Выставление сигнала заданной частоты осуществляется плавным сдвигом ручки «установка f » вправо (увеличение) или влево (уменьшение). При этом не следует допускать резкого изменения частоты сигнала (индикатор «контр. f » не должен мерцать).

4.1.4. Включить тумблер «Сеть» осциллографа (С1-49).

4.2. По формуле (5.2) можно приближенно определить значения резонансных частот колебаний образца по толщине. В действительности поверхности образца не являются свободными. Одна из поверхностей нагружена пьезопреобразователем. Уравнение, устанавливающее связь между резонансной частотой f_0 и параметрами трехкомпонентного пакета (кварцевая пластина – контактный слой – изделие), записывается в следующем виде:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{Z_2}{Z_3} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 + \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{1 - \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (5.7)$$

где $\varphi_i = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot d_i}{C_i}$ - фазовый набег в слое i ;

$Z_i = \rho_i \cdot C_i$ - характеристический импеданс слоя i ;

ρ_i, C_i, d_i - плотность, скорость УЗК и толщина слоя i ;

f_0 - резонансная частота.

4.3. При расчете по формуле (5.7) нужно полагать, что слой $i=1$ – кварцевая пластина, слой $i=2$ – контактная жидкость (вода, трансформаторное масло) и слой $i=3$ – контролируемый образец. Толщину слоя d_1 следует положить равной 0,23 мм. Толщину контактного слоя d_2 определяли в п.3.1.6.

4.4. Определение относительного расхождения значений толщин d_3 , рассчитанных по формулам (5.2) и (5.7), следует производить по формуле:

$$\Delta = \frac{d_3^{(2)} - d_3^{(1)}}{d_3^{(2)}}, \quad (5.8)$$

где индекс сверху соответствует номеру формулы 1-(5.2), 2-(5.7).

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.

- Приборы и вычислительная техника, используемые в работе (краткая техническая характеристика).
- Блок- схема установки.

2. Теоретическая часть.

- Расчет по формулам (запись физических величин и расшифровка буквенных обозначений в формуле согласно ГОСТ 8.417-81).
- Графические зависимости, используемые в расчете (выполнять согласно ГОСТ 2.319-81).
- Таблицы результатов расчета (ГОСТ 2.105-81).

3. Экспериментальное исследование.

- Методика проведения измерений.
- Экспериментально снятые зависимости, представленные графически (ГОСТ 2.319-81).
- Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).

4. Оценка погрешности результатов измерений.

- Методика расчета относительного расхождения толщины изделия.

5. Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список используемых источников по ГОСТ 7.1-84.

6. Контрольные вопросы

6.1. Какое физическое явление положено в основу резонансного метода контроля?

6.2. Объясните характер графиков зависимости $f(d_3)$ для однослойной и трехслойной систем.

6.3. Из каких основных узлов должен состоять резонансный толщиномер?

6.4. Как определить необходимый диапазон «качания» частоты генератора резонансного толщиномера для заданного диапазона изменения толщины контролируемого изделия?

6.5. Поясните смысл операций настройки стенда перед измерением толщины изделия?

6.6. Какие факторы влияют на точность измерения толщины изделий резонансным методом?

6.7. Какой диапазон толщин можно контролировать резонансным методом? Какие факторы ограничивают значения минимальной и максимальной толщин, контролируемых данным методом?

6. Применение эхо-метода для обнаружения и характеристики дефектов

При ультразвуковом контроле основными характеристиками выявленного дефекта являются следующие: максимальная амплитуда P_0 отраженного от дефекта сигнала или эквивалентная площадь $S_э$; координаты положения дефекта; условные размеры дефектов.

Если $\lambda/2 < d < D$, где D - диаметр пьезоэлемента преобразователя; d - размер дефекта; λ - длина волны ультразвуковых зондирующих колебаний, то размеры дефекта оцениваются по амплитуде P_d отраженного от дефекта сигнала или эквивалентной площади $S_э$.

Если $d > D$, то размеры дефекта оцениваются по условным длине ΔX , ширине ΔL и высоте ΔH .

6.1. Оценка размеров малых дефектов

Амплитуда эхо-сигнала - наиболее простая измеряемая характеристика, которая при прочих равных условиях определяется размерами, ориентацией, конфигурацией и шероховатостью отражающей поверхности, глубиной ее расположения. С увеличением размеров дефектов амплитуда эхо-сигнала растет до тех пор, пока размеры дефекта не превысят ультразвуковой пучок в сечении, в котором расположен дефект (рис.6.1, а). Амплитуда эхо-сигналов от дефектов одного и того же размера падает по мере увеличения расстояния r от источника до дефекта (рис.6.1, б). При одной и той же глубине залегания дефекта она в значительной степени определяется конфигурацией отражающей поверхности дефекта (рис.6.1, в) и соотношением размеров неровностей отражающей поверхности к длине волны (рис.6.1, г).

Возможны случаи, когда амплитуда эхо-сигнала от большего дефекта с зеркальной отражающей поверхностью существенно меньше амплитуды эхо-сигнала от небольшого дефекта с диффузно-отражающей поверхностью (рис.6.1, г).

Для приближенной оценки размеров дефектов по амплитуде эхо-сигнала от реальных дефектов последние заменяют эквивалентными моделями в виде отражателей правильной геометрической формы (сферы, цилиндра, диска, полосы и т.п.).

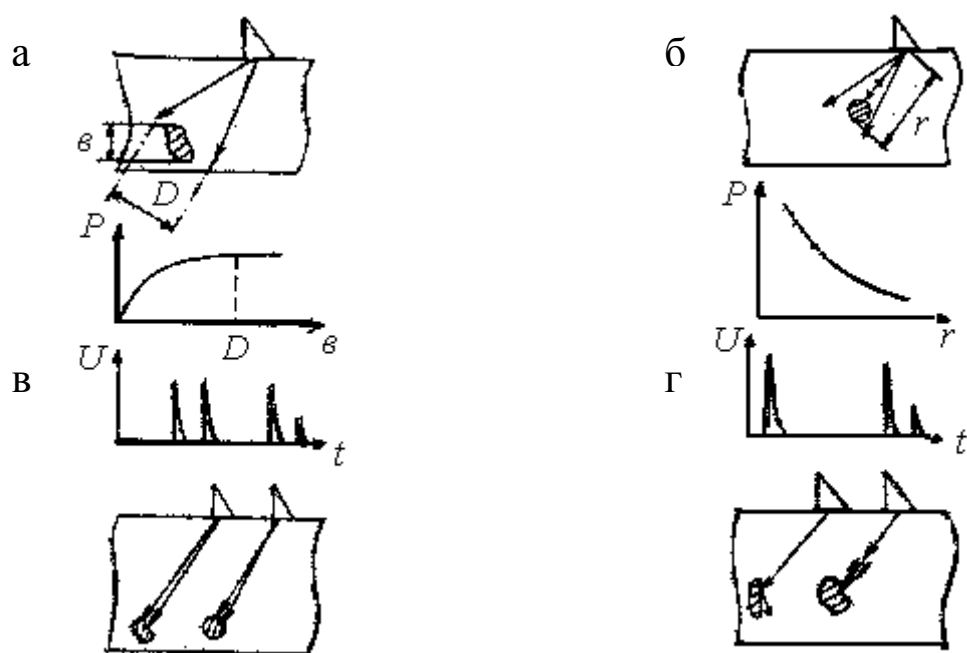


Рис.6.1. Зависимость амплитуды эхо-сигнала P : а – от размера дефекта; б - расстояний между дефектами и искателем; в - конфигурации дефекта; г - шероховатости дефекта

Моделью дефекта, дающей наиболее объективное представление о реальном дефекте, является отверстие с плоским дном. Однако в связи со сложностью изготовления отверстий с плоским дном, ориентированным строго перпендикулярно акустической оси искателя при контроле наклонным искателем, допускается (ГОСТ 14782-80) применение сегментных и угловых отражателей (рис.6.2).

Отверстия с плоским дном и сегментные отражатели должны изготавливаться для каждого угла ввода луча, а угловые отражатели выполняют независимо от угла ввода луча и поэтому наиболее широко применяют в производственных условиях. Плоскость 1-го сегмента (рис.6.2, б), так же как и плоскость 1-го отверстия (рис.6.2, а), должна быть перпендикулярна к акустической оси искателя. Для того чтобы амплитуда эхо-сигнала от сегментного отражателя приближалась к амплитуде эхо-сигнала от отверстия с плоским дном такой же площади, высота h_0 сегментного отражателя должна быть больше длины поперечной волны, а отношение $h_0/b_0 > 0,4$.

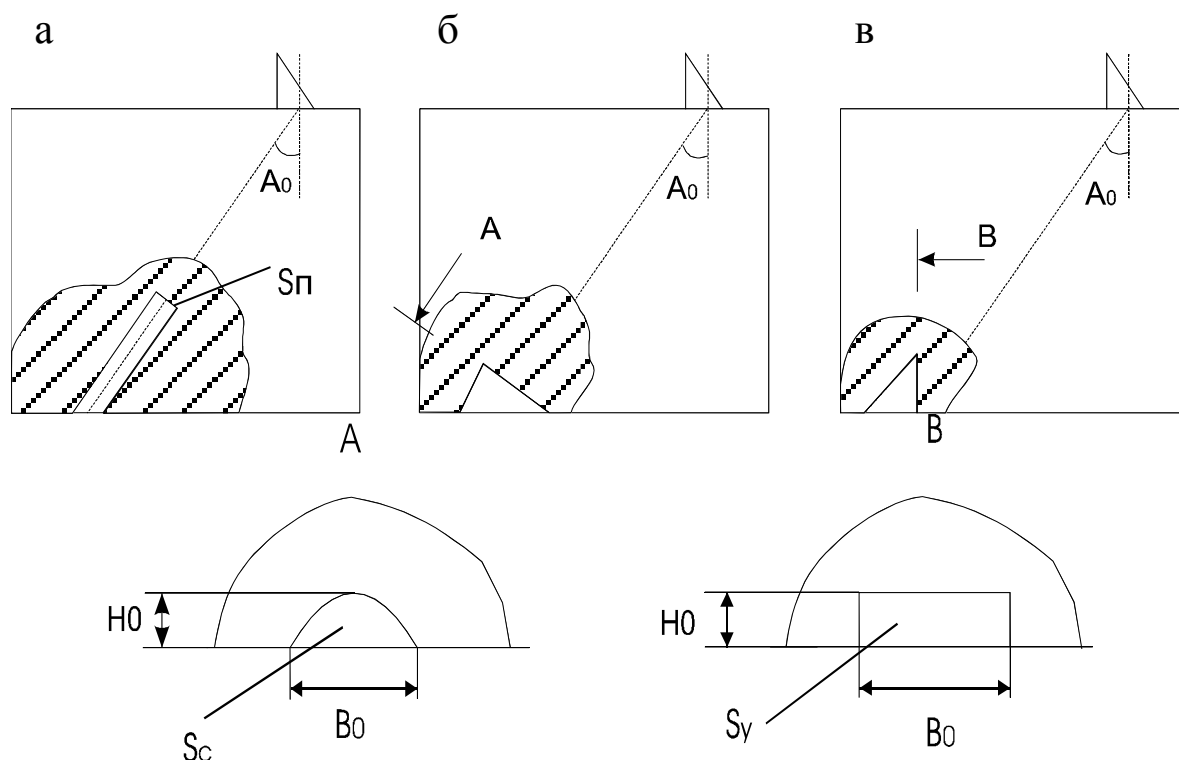


Рис.6.2. Основные искусственные отражатели для контроля наклонными искателями:

а- отверстия с плоским дном;

б - сегментный отражатель;

в - угловой отражатель

Размеры h_0 и b_0 углового отражателя должны быть больше длины поперечной волны и $4 > h_0/b_0 > 0,5$. Амплитуды эхо-сигналов от отверстия с плоским дном площадью $S_{\text{п}}$ и углового отражателя площадью $S_y = h_0 b_0$ будут близки, если $S_{\text{п}} = N S_y$, где коэффициент N определяется по графику (рис.6.3) с учетом диаграммы направленности применяемого искателя.

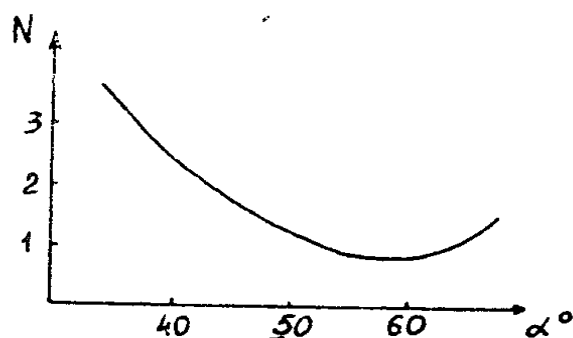


Рис.6.3. Экспериментальная зависимость коэффициента N от угла α_0 наклона акустической оси искателя

Таким образом, для приближенной оценки размеров дефектов ставится задача найти искусственный дефект (типа плоскодонного отверстия) с известными размерами, залегающий на той же глубине, что и естественный, и дающий эхо-сигнал такой же амплитуды. Полученные эквивалентная площадь S_3 отражателя, а также максимальная амплитуда P_d эхо-сигнала от отражателя являются главными измеряемыми характеристиками, по значению которых принимают решение об отсутствии или возможном наличии в контролируемом объекте дефектов.

Необходимость изготовления и использования наборов тест-образцов с моделями дефектов весьма затрудняет проведение ультразвукового контроля. В связи с этим разработана методика определения эквивалентных размеров дефектов без изменения тест-образцов.

Для расчета амплитуды эхо-сигнала от плоскодонного искусственного отражателя в широком диапазоне размеров отверстий, искателей, частот и глубин залегания применяется безразмерная номограмма амплитуда-расстояние - диаграмма (АРД-диаграмма).

На оси ординат этой диаграммы (рис.6.4) указаны значения амплитуды P_d отраженного от отверстия с плоским дном сигнала, отнесенные к амплитуде P_0 максимального сигнала, который может быть получен при полном возвращении к приемнику всей излученной в изделие энергии. Это отношение выражено в отрицательных децибелах. По оси абсцисс отложено расстояние до дефекта, причем за единицу принята длина ближней зоны искателя. Параметром семейства кривых является отношение диаметра дефекта к диаметру излучателя. Заштрихованные области в левой части диаграммы соответствуют изменению амплитуды, вызываемому различной длительностью ультразвуковых импульсов.

Рабочую АРД-диаграмму строят для конкретных параметров контроля: материала изделия, частоты упругих колебаний, радиуса преобразователя, угла ввода луча. В качестве основного сигнала (P_0) можно использовать эхо-сигнал от бокового цилиндрического отражателя или отражение от бесконечной плоскости (донного сигнала). В данной лабораторной работе необходимо будет построить рабочую АРД-диаграмму и с помощью ее и измерителя входных сигналов (прибора УД-13) научиться измерять эквивалентные площади дефектов.

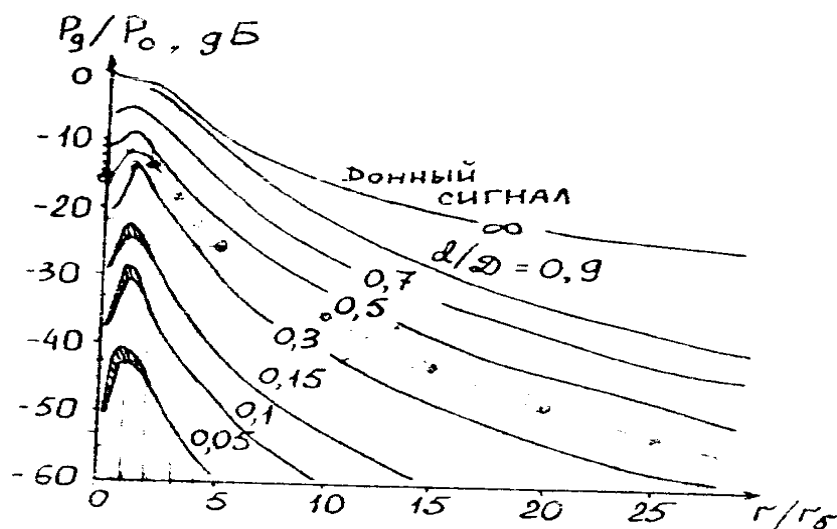


Рис. 6.4. Безразмерная АРД-диаграмма для плоскодонного отверстия в стали

6.2. Оценка размеров больших дефектов

Целью контроля является не только обнаружение дефектов (измерение S_0), но и распознавание их образца для оценки потенциальной опасности дефекта. Методы визуального контроля эффективны, но требуют применения довольно сложной аппаратуры. В практике контроля дефекты можно идентифицировать по условным размерам: протяженности ΔX , ширине ΔL , высоте ΔH (рис. 6.5). Условная протяженность ΔX и условная ширина ΔL дефекта определяются расстояниями между такими крайними положениями искателя, в которых амплитуда эхо-сигнала от дефекта уменьшается до определенного уровня (рис. 6.5, а).

Условная высота H дефекта определяется как разность показаний глубиномера в крайних положениях наклонного искателя (рис. 6.5, б).

Амплитуда эхо-сигнала при перемещении искателя вблизи края дефекта меняется по размеру в зависимости от формы и величины дефекта, причем часто это изменение происходит немонотонно, поэтому точно определить местоположение преобразователя над краем дефекта невозможно. Ввиду этого задачу можно поставить так: перемещая преобразователь по поверхности изделия, наблюдая за амплитудой эхо-сигнала и руководствуясь определенными критериями, определить расстояние между некоторыми крайними положениями искателя на поверхности. Это расстояние и называется условным размером дефекта. Далее необходимо найти связь между условными и истинными размерами дефектов.

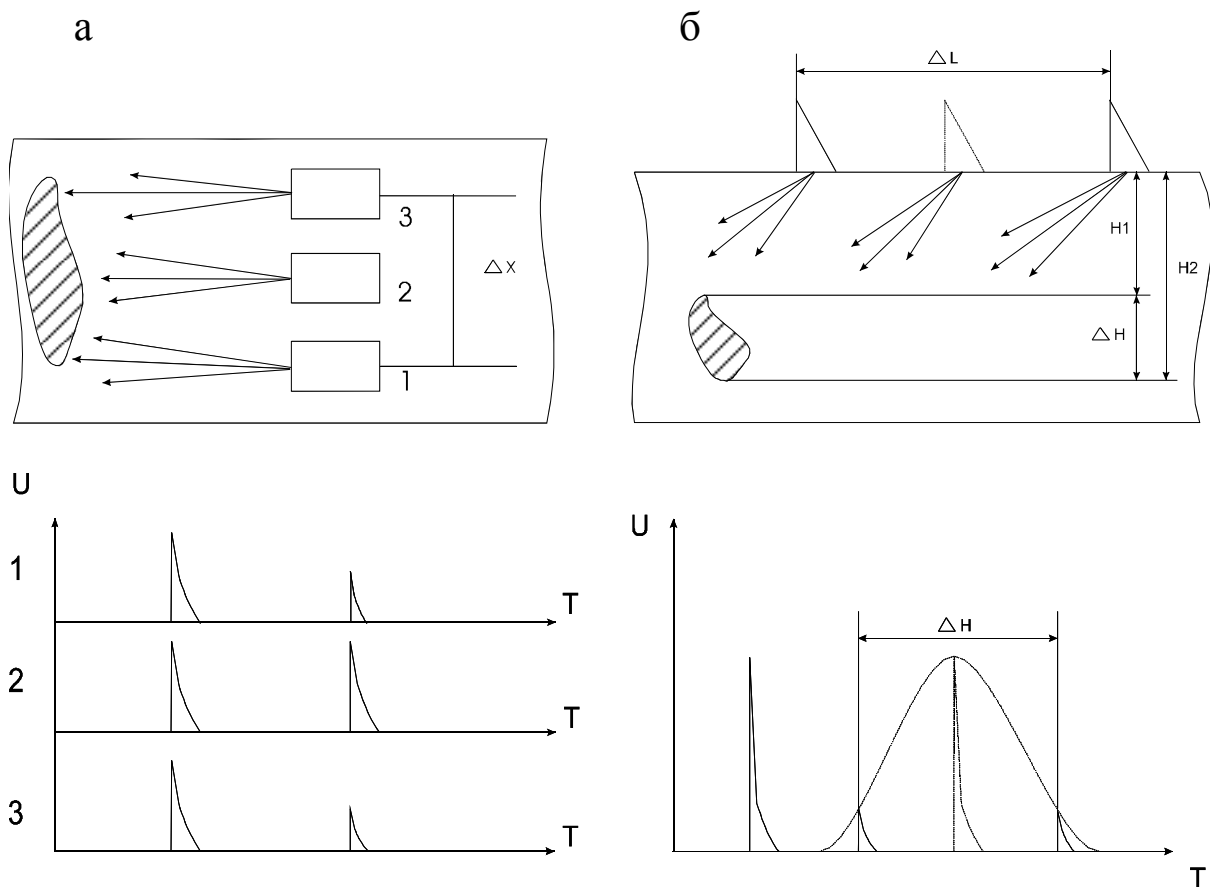


Рис.6.5 Схема измерения условных размеров дефекта

Возможны два способа задания крайних положений искателя при измерениях ΔX , ΔL , ΔH .

СПОСОБ 1. За крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала от выявляемого дефекта уменьшилась до значения $P_{\min}$, составляющего определенную часть A максимального значения $P_{\max}$, т.е. $P_{\min} = AP_{\max}$.

СПОСОБ 2. За крайние положения искателя принимают такие, при которых амплитуда эхо-сигнала достигала некоторого заданного абсолютного значения $U_{\min}$, не зависящего от максимальной амплитуды сигнала.

В зависимости от поставленной задачи принимается тот или иной способ задания крайних положений искателя при измерении условных размеров дефектов.

Экспериментальные многочисленные исследования показывают, что значения ΔX , ΔL , ΔH одного и того же дефекта существенно зависят от глубины его расположения и способа измерения. При измерении первым способом, например, условная ширина цилиндриче-

ских отражателей не зависит от истинных размеров дефекта (рис.6.6,а). Если применять второй способ, то условная ширина дефекта связана с его истинными размерами лишь потому, что они определяют амплитуду отраженного сигнала (рис.6.6, б).

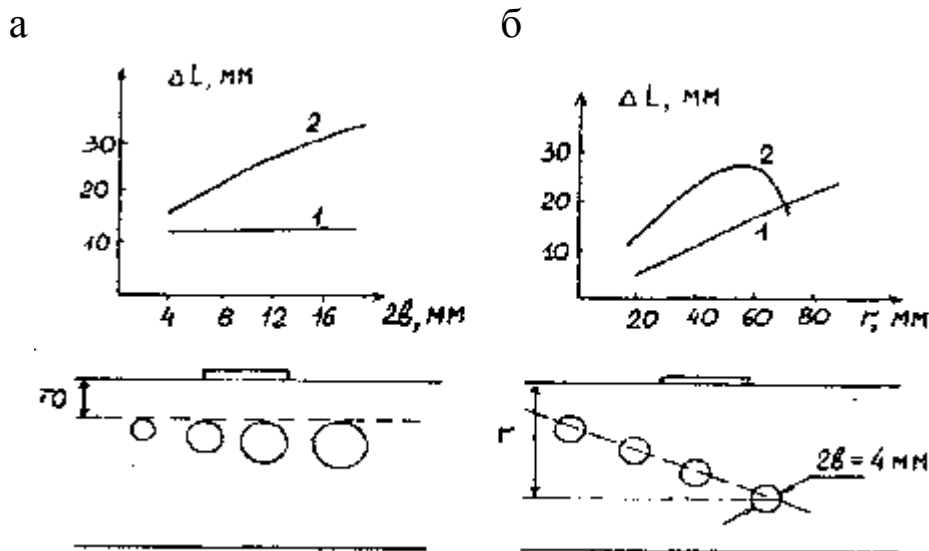


Рис.6.6. Зависимость условной ширины цилиндрического отверстия от его размера ΔL (а) и глубины расположения r (б):

1 – способ 1; 2 – способ 2

Если измерение ведется вторым способом, то между условной шириной и истинными размерами дефекта существует монотонная зависимость, практически повторяющая зависимость амплитуды эхо-сигналов от этих дефектов. Из сравнения способов измерения условной ширины видно, что наибольший объем информации о выявленном дефекте по его условной ширине может быть получен, если измерение выполнено по второму способу. Таким образом, условные размеры могут быть использованы как основная измеряемая характеристика дефекта взамен амплитуды эхо-сигнала.

Описание лабораторной работы №6 «Измерение размеров дефектов с помощью ультразвука»

1. Цель работы

- 1.1. Изучить способы измерения размеров дефектов.
- 1.2. Приобрести практические навыки определения размеров дефектов с помощью ультразвукового дефектоскопа.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из серийного дефектоскопа УД-13 УР В1П1, комплекта пьезопреобразователей, измерительной линейки и набора тест-образцов.

2.2. В комплект пьезопреобразователей входят совмещенный, прямой и наклонный пьезопреобразователи П111-2,5-КН, П 121-2,5-40°-Н.

2.3. В качестве тест-образцов используются искусственные отражатели в форме отверстий с плоским и сферическим дном, а также цилиндрических отверстий.

3. Программа работы

3.1. Ознакомиться с устройством дефектоскопа УД-13 УР В1П1 и его работой в режиме контроля эхо-методом.

3.1.1 Ознакомиться со структурной схемой дефектоскопа УД-13УР В1П1 и с назначением органов управления.

3.1.2. Проверить работоспособность дефектоскопа, используя преобразователи П 111-2,5-КН, П 121-2,5-40°-Н и стандартный образец № 1.

3.2. Построить рабочую АРД-диаграмму для конкретного размера модельных дефектов и параметров прямого преобразователя, взяв за исходную безразмерную АРД-диаграмму для стали.

3.3. Экспериментально снять зависимость отношения амплитуды P_d отраженного от отверстия с плоским дном сигнала к амплитуде P_o максимального сигнала, полученного при полном возвращении к приемнику всей излученной энергии, от глубины r залегания дефекта. Результаты занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений амплитуды отражения от плоскодонных отражателей

Номер измерения	Диаметр искусственного отражателя $d, \text{м}$	Диаметр пьезоэлемента преобразователя $D, \text{м}$	Глубина залегания отражателя $r, \text{м}$	P_d/P_o , дБ

3.4. Построить полученную зависимость $P_d/P_o = f(r)$ с параметром d/D .

Результаты эксперимента сравнить с построенной в п.3.2 рабочей АРД - диаграммой.

3.5. Определить условную ширину ΔL и условную высоту ΔH искусственного отражателя в форме цилиндрического отверстия, используя прямой и наклонный преобразователи. Результаты занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты измерений условных размеров дефектов

Номер измерения	Диаметр искусственного отражателя $d, \text{м}$	Глубина залегания отражателя $R, \text{м}$	Условная ширина $\Delta L, \text{м}$	Условная высота $\Delta H, \text{м}$

3.6. Построить зависимость условных ширины и высоты отражателя от глубины залегания:

$$\Delta L = f(r), \Delta H = f(r).$$

Сравнить экспериментальные результаты с истинными размерами отражателя.

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. К п.3.1.2.

Перед началом измерений поверхность контролируемых образцов покрыть слоем контактной смазки: масло, глицерин, вода. Пьезопреобразователь установить на поверхность с легким нажимом. Установить ручку ВРЧ в крайнее правое положение, кнопки "ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РАЗВЕРТКИ", "ПО СЛОЯМ" отпущены.

Получить на экране ЭЛТ с помощью органов управления «УСИЛЕНИЕ», «КООРДИНАТЫ ДЕФЕКТА» устойчивое изображение отраженного сигнала с амплитудой не менее стандартного уровня (половина шкалы ЭЛТ дефектоскопа).

Для прямого преобразователя получить 1-й «донный» сигнал, для наклонного - отраженный от модельных отражателей в форме цилиндрических отверстий.

4.2. К п.3.2.

При построении кривых размерных АРД-диаграмм следует считать скорость распространения продольных УЗ-колебаний в материале образца $C_l=2670$ м/с и максимальное значение расстояния до дефектов $r=150$ мм. Граница ближней зоны данного преобразователя определяется по формуле

$$R_0 = (D/2)^2 / \lambda,$$

$$\lambda = C_l / \nu;$$

где D – диаметр пьезоэлемента преобразователя, мм;

λ - длина волны УЗ-волн, мм;

ν - рабочая частота преобразователя, Гц .

Выбор определенной кривой АРД-диаграмм осуществляется по параметру d/D :

d - диаметр искусственного отражателя ($d = 5$ мм);

D - диаметр пьезоэлемента преобразователя ($D = 12$ мм).

4.3. К п.3.3.

Для определения P_0 в качестве отражателя бесконечно большого размера может использоваться противоположная поверхность (дно) образца, расположенная на той же глубине, что и дефект. Измерение P_d/P_0 проводится следующим образом.

4.3.1. Изменяя положение преобразователя, получить максимальный отраженный сигнал от дефекта и установить ручкой «УСИЛЕНИЕ» конкретное значение амплитуды P_d . Определить глубину залегания дефекта с помощью глубиномера.

4.3.2. Для образца того же материала толщиной, равной глубине залегания дефекта, получить изображение 1-го «донного» сигнала с амплитудой, равной P_d , используя только кнопки «ОСЛАБЛЕНИЕ ДБ» (ручка «УСИЛЕНИЕ» зафиксирована). Суммарная величина ослабления в ДБ, взятая со знаком «-», характеризует отношение P_d/P_0 .

4.4. К п.3.5.

4.4.1. Для прямого преобразователя условная ширина ΔL отражателя определяется как расстояние между крайними положениями датчика. Крайними положениями искателя называются положения, определенные способами 1 или 2 (см. п.6.2).

4.4.2. Для наклонного преобразователя условная ширина ΔL и высота ΔH отражателя определяются с помощью глубиномера дефектоскопа как разность показаний H и L при крайних положениях наклонного преобразователя.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.
 - Краткая техническая характеристика приборов, используемых в работе.
 2. Теоретическая часть.
 - Расчет по формулам (запись физических величин и расшифровка буквенных обозначений в формуле согласно ГОСТ 8.417-81).
 - Графические зависимости, используемые в расчете (выполнять согласно ГОСТ 2.319-81).
 - Методика проведения измерений.
 3. Экспериментальные исследования.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
 - Графические зависимости.
 4. Анализ результатов измерений.
- Заключение.
- Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. По каким измеряемым дефектоскопом характеристикам можно судить о наличии дефектов?
- 6.2. Нарисуйте блок-схему дефектоскопа УД-13 УР и объясните назначение и принцип работы каждого блока.
- 6.3. Какими способами можно оценить размеры малых дефектов?
- 6.4. Что такое ближняя и дальняя зоны искателя?
- 6.5. Что такое АРД-диаграмма?
- 6.6. Как с помощью АРД-диаграммы оценить размер дефекта?
- 6.7. Укажите последовательность проведения эксперимента в данной лабораторной работе.
- 6.8. Какие факторы влияют на точность экспериментальной проверки АРД-диаграмм ?
- 6.9. Что такое «условные размеры дефекта»?
- 6.10. Какие существуют способы определения условных размеров дефектов? В чем их различие ?

ЧАСТЬ III. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

7. Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевой осциллограф является универсальным измерительным прибором. С его помощью можно визуально наблюдать и документально фиксировать периодические непрерывные и импульсные сигналы, непериодические и случайные сигналы, а также мгновенные одиночные явления.

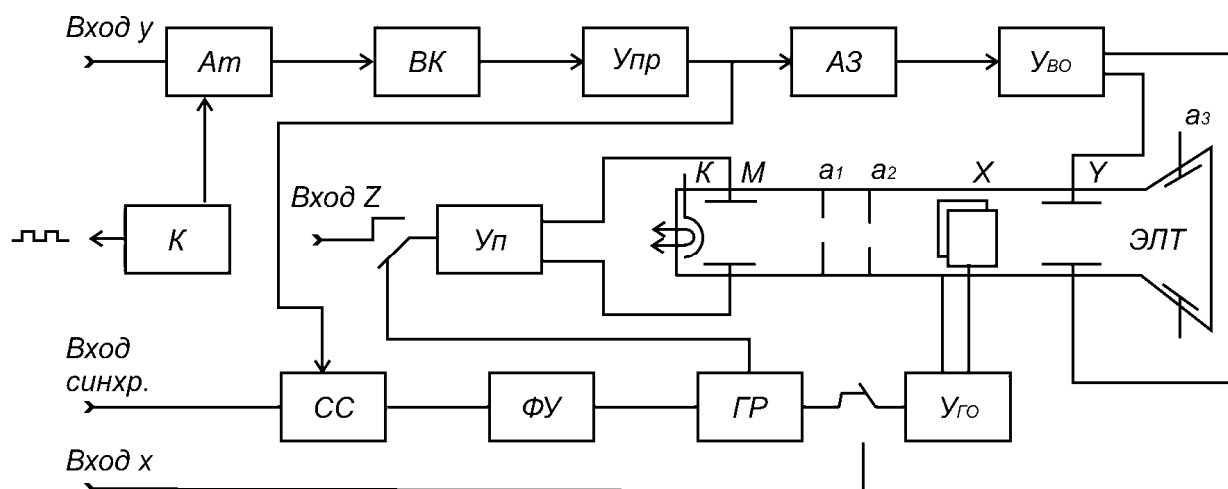


Рис.7.1. Структурная схема электронного осциллографа:

Ат - аттенюатор; ВК - входной каскад; Упр - усилитель предварительный; ЛЗ - линия задержки; Уво - усилитель вертикального отклонения; К - калибратор; Уп - усилитель подсвета; СС - селектор синхронизации; ФУ - формирующее устройство; ГР - генератор развертки; Уго - усилитель горизонтального отклонения

Исследуемый сигнал отражается на экране осциллографа в виде светящихся линий или фигур, называемых осциллограммами.

Электронно-лучевые осциллографы применяются для измерения напряжений, временных интервалов и длительности сигналов, частоты и фазового сдвига, параметров модулированных сигналов и многих физических величин, преобразованных в электрические сигналы.

Структурная схема электронного осциллографа представлена на рис.7.1. Электронный осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), трёх электрических каналов управления лучом и блока питания (на рисунке не представлен).

Электронно-лучевая трубка преобразует напряжение измеряемого сигнала в перемещение луча на экране. В ЭЛТ используется электростатическое управление и формирование луча. Она состоит из следующих частей:

- электронной пушки (катод К с нагревателем, управляющий электрод-модулятор М, 1-й анод – фокусирующий a_1 , 2-й анод – ускоряющий a_2);
- пары горизонтальных пластин канала У для создания электрического поля, отклоняющего луч по вертикальной координате экрана;
- пары вертикальных пластин канала Х для создания электрического поля, отклоняющего луч по вертикальной координате экрана;
- одного или нескольких электродов для создания поля, ускоряющего электроны луча после отклонения анода a_3 ;
- экрана с люминесцентным покрытием, который преобразует кинетическую энергию электронного луча в световое излучение;
- стеклянного баллона, обеспечивающего вакуум внутри ЭЛТ и жесткое крепление электродов.

Большинство ЭЛТ имеет экран прямоугольной или квадратной формы со шкалой, нанесенной на внутреннюю поверхность стекла. Основным параметром ЭЛТ для универсальных осциллографов – это чувствительность $S_{элт}$, лежащая в пределах 1-4 мм/В.

По каналу вертикального отклонения (канал У) поступает исследуемый сигнал U_y , вызывающий вертикальное отклонение луча в электронно-лучевой трубке.

Исследуемый сигнал подается на аттенюатор Ат, при помощи которого устанавливается необходимое ослабление сигнала. Это позволяет обеспечить работу усилителя вертикального отклонения $У_{во}$ в режиме минимальных нелинейных искажений. С выхода Ат исследуемый сигнал через входной каскад ВК (эмиттерный или истоковый повторитель) подается на вертикальный усилитель $У_{пр}$. Усиленный сигнал задерживается линией задержки на время, необходимое для срабатывания канала горизонтального отклонения, т.е. генератора развертки ГР и усилителя горизонтального отклонения $У_{го}$. Это делается для того, чтобы движение луча по горизонтали

началось раньше, чем усиленный сигнал поступит на вертикально отклоняющие пластины.

Важнейшей характеристикой канала является его чувствительность

$$S_y = \frac{h}{V_y} = S_{элт} K_{ус} K_{\partial} K_{лз}, \quad (7.1)$$

где h – отклонение луча;

V_y – выходной сигнал;

$S_{элт}$ – чувствительность ЭЛТ;

$K_{ус}$ – коэффициент усиления усилителя;

K_{∂} – коэффициент деления делителя (аттенюатора);

$K_{лз}$ – коэффициент передачи ЛЗ.

Величина, обратная чувствительности канала, – коэффициент отклонения:

$$K_y = S_y^{-1}. \quad (7.2)$$

По каналу горизонтального отклонения (канал X) поступает напряжение U_X , вызывающее горизонтальное отклонение луча. Одновременное воздействие двух напряжений U_X и U_Y на электронный луч трубки вызывает появление осциллограммы. Напряжение U_X называется развертывающим напряжением.

Главным узлом канала X является генератор развертки ГР, вырабатывающий напряжение, пропорциональное времени: $U_X = mt$. Для управления частотой развертывающего напряжения используется напряжение синхронизации, поступающее из канала Y или от внешнего источника через селектор синхронизации (СС) и формирующее устройство (ФУ). Генератор развертки формирует пилообразное линейное напряжение для временной развертки луча ЭЛТ. Время прямого хода луча $t_{пр}$ много больше времени обратного хода $t_{обр}$, поэтому период развертки $T_p \approx t_{пр}$.

Выходной сигнал генератора развертки поступает на выходной усилитель УГО, предназначенный для преобразования пилообразного напряжения, поступающего с ГР, в два противофазных сигнала, и усиления их до значения, достаточного для отклонения луча по горизонтали на весь экран ЭЛТ. В осциллографе предусмотрена возможность поступления внешнего сигнала на горизонтально отклоняющие

пластины при подаче его на вход X. При этом усилитель $У_{ГО}$ отключается от схемы генератора развертки и подключается к входу X.

Генератор развертки имеет автоколебательный и одиночный режимы работы. Автоколебательный используется для наблюдения синусоидальных сигналов и импульсов небольшой скважности. Для наблюдения импульсов большой скважности используется режим одиночной развертки.

Для получения устойчивого изображения применяют три вида синхронизации: внешним сигналом, исследуемым сигналом (внутренняя синхронизация) и сигналом от сети.

Устройство синхронизации и запуска развертки служит для выработки импульса синхронизации с крутым фронтом и постоянной амплитудой в момент, когда входной сигнал произвольной формы достигает определенного уровня.

При автоколебательном режиме работы генератора развертки этот импульс корректирует длительность обратного хода луча, а при ждущем – осуществляет запуск генератора развертки.

Канал X характеризуется чувствительностью

$$S_x = \frac{h_x}{V_x}, \quad (7.3)$$

и скоростью развертки

$$V_x = \frac{dh_x}{dt} = S_x \frac{dU_x}{dt}. \quad (7.4)$$

Величина, обратная скорости развертки, называется коэффициентом развертки:

$$K_x = V_x^{-1}. \quad (7.5)$$

По каналу управления яркостью луча (каналу Z) через усилитель подсвета $Уп$ подают напряжение от генератора развертки или внешнего источника через вход Z для увеличения яркости электронного луча.

Калибратор представляет собой встроенный в осциллограф генератор сигнала с точно известными параметрами (амплитудой и периодом). При проверке коэффициента развертки и коэффициента отклонения сигнал с калибратора подают на вход канала Y.

Описание лабораторной работы № 7 «Изучение электронного осциллографа»

1. Цель работы

Изучение принципа работы электронного осциллографа, исследование режимов его работы и технических характеристик, изучение и практическое освоение методов осциллографических измерений.

2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов:

- исследуемого осциллографа (типа CI-150),
- генератора сигналов (типа Г5-82),
- генератора импульсов (типа Г6-43),
- соединительных кабелей и проводов.

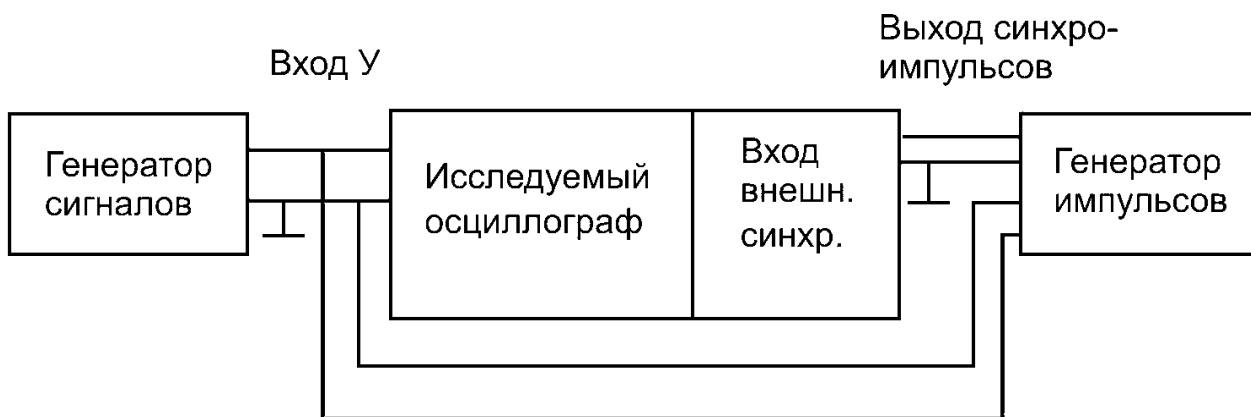


Рис. 7.2. Схема лабораторной установки

3. Программа работы

3.1. Проверка погрешности калибровки коэффициента развертки осциллографа.

Произвести проверку погрешности измерения временных интервалов осциллографом в различных положениях переключателя коэффициента развертки, охватываемых имеющимся измерительным генератором сигналов Г5-82. Данные занести в табл.7.1.

Таблица 7.1

Проверка погрешности калибровки K_x

№	K_x	T_{Γ} , мкс	T , мкс	γ_t , %
1	5000			
	...			
	5			

Максимальная погрешность $M=...$

3.2. Поверка погрешности калибровки коэффициента отклонения K_y .

Произвести поверку погрешности измерения напряжения при различных положениях переключателя коэффициента отклонения и при одном положении переключателя коэффициента развертки. Калиброванные напряжения на вход осциллографа подавать с выхода генератора импульсов Г6-43 (выставляемые значения напряжения генератора умножать на 1,2). Данные занести в табл.7.2.

Таблица 7.2

Проверка погрешности калибровки K_y

№	K_y , мВ/см	$1,2U_{\Gamma}$, мВ	U , мВ	γ_u , %
1	10000			
	...			
	100			

Максимальная погрешность $M=...$

3.3. Определение скважности прямоугольных импульсов по осциллографу.

Сигнал на вход осциллографа подать с выхода генератора импульсов Г6-43. Для синхронизации подаваемых на осциллограф импульсов использовать внешнюю синхронизацию от генератора импульсов. Исследовать импульсные сигналы скважностью 4 и 10.

Частоту исследуемых сигналов задавать: $1 \cdot 10^3$ Гц; $2,5 \cdot 10^3$ Гц; $1 \cdot 10^4$ Гц; $2,5 \cdot 10^4$ Гц; $1 \cdot 10^5$ Гц. Данные занести в табл.7.3.

Таблица 7.3

Определение погрешности скважности импульсов

№	F_{Γ} , Гц	T_{Γ} , мкс	τ_{Γ} , мкс	Q_{Γ}	T , мкс	τ , мкс	q	γ_q , %
1	10^{-3}			4				
	...							

Максимальная погрешность $M=...$

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. К п.3.1.

4.1.1. Перед измерениями включить приборы и прогреть их в течение 10-15 мин.

4.1.2. Соединить кабелем выход генератора Г5-82 и вход осциллографа.

4.1.3. Установить коэффициент развертки $K_x = 5$ мс/см. Подать на вход осциллографа сигнал частотой 30 Гц.

4.1.4. Увеличивая частоту исследуемого сигнала, добиться четкого его изображения. На экране ЭЛТ зафиксировать 1-2 периода колебаний. Период колебаний T_r синусоидального сигнала генератора определять по соотношению

$$T_r = \frac{1}{F_r}, \quad (7.6)$$

где F_r – частота исследуемого напряжения.

4.1.5. Погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \left| \frac{T_r - T}{T_r} \right| \cdot 100, \quad (7.7)$$

где T – измеренный осциллографом временной интервал, соответствующий установленному коэффициенту развертки.

4.2. К п.3.2.

4.2.1. Включить генератор прямоугольных импульсов и прогреть его 15 мин. Задержку установить равной 0.

4.2.2. После соединения выхода генератора импульсов с входом осциллографа зафиксировать коэффициент развертки с наиболее устойчивым изображением. Начиная с коэффициента отклонения $K_y = 10$ В/см по $K_y = 0.1$ В/см последовательно подавать соответствующие значения напряжения с генератора Г6-43 на вход осциллографа.

4.2.3. Погрешности калибровки вычислять по формуле, аналогичной (7.7).

4.3. К п.3.3.

4.3.1. Предварительно определить длительность основных импульсов τ_r при соответствующей скважности:

$$q_r = \frac{T_r}{\tau_r} \quad (7.8)$$

и соответствующей частоте исследуемых импульсов. Установивать скважности импульсов не менее 4.

4.3.2. При той же схеме соединения произвести измерения наблюдаемых длительностей и периодов импульсных сигналов.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.
 - Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
 - Структурная схема типового электронного осциллографа.
2. Теоретическая часть.
 - Методика проведения измерений.
 - Основные расчетные соотношения.
3. Экспериментальное исследование.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
4. Оценка погрешности результатов исследования.
 - Методика расчета погрешности.
 - Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. Вычертить блок-схему и объяснить принцип работы используемого осциллографа.

6.2. Назвать основные технические характеристики исследуемого осциллографа.

6.3. Для чего необходимы различные режимы работы генератора развертки?

6.4. Назвать виды синхронизации и их особенности.

6.5. Что такое коэффициент отклонения?

6.6. Что такое коэффициент развертки?

8. Вольтметры

8.1. Характеристика измеряемых параметров переменного напряжения

Напряжение переменного тока характеризуется несколькими параметрами: амплитудным (пиковым) U_m (рис.8.1), средневыпрямленным $U_{св}$, среднеквадратичным U . Пиковое значение – наибольшее мгновенное значение напряжения за период или время измерения. При равномерных несимметричных кривых напряжения выделяют положительное пиковое (максимальное) и отрицательное (минимальное) значения. Термин "амплитудное значение" применяют к гармоническим сигналам. К остальным сигналам – термин "пиковое значение".

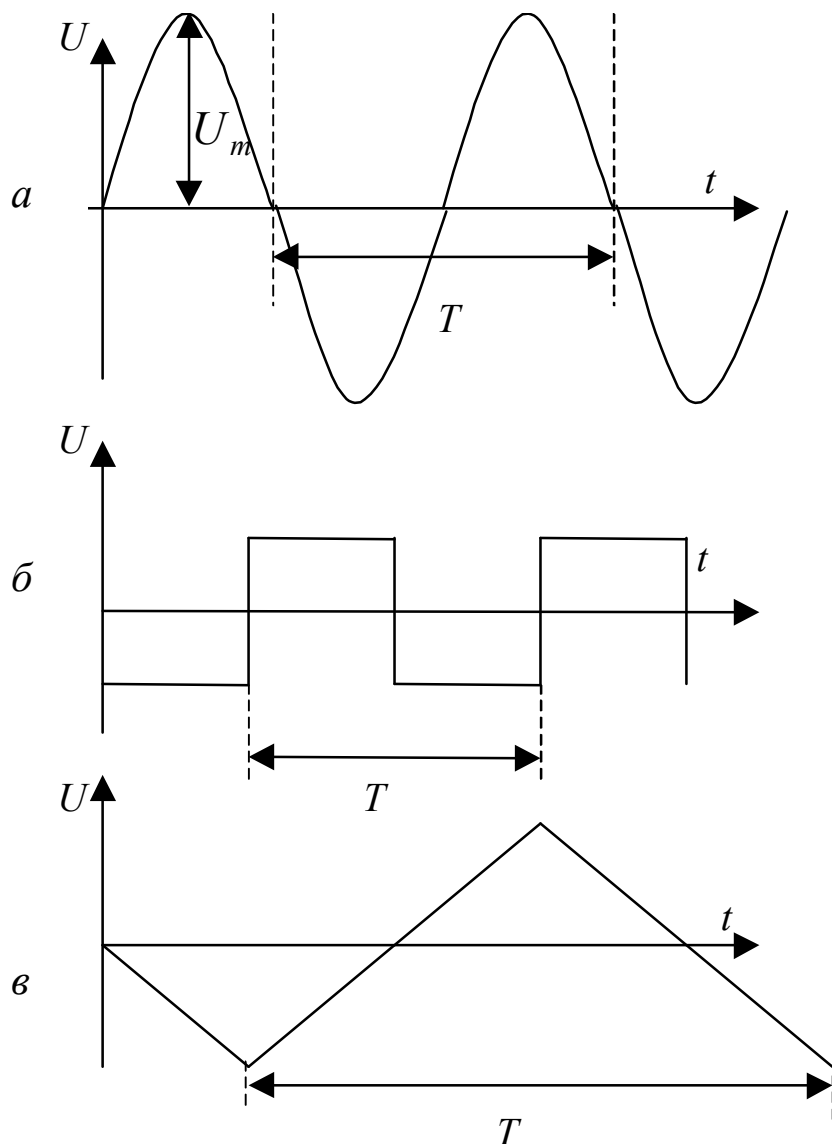


Рис.8.1. Вид измеряемых напряжений

Для измерения амплитудных (пиковых) значений применяются вольтметры амплитудных значений или пиковые (импульсные) вольтметры типа В4-... Средневыпрямленное значение – это среднее значение модуля напряжения

$$U_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt, \quad (8.1)$$

которое получается путём двухполупериодного выпрямления (возможны случаи и однополупериодного выпрямления). Для измерения средневыпрямленного значения служат вольтметры типа В3-... и универсальные вольтметры типа В7-... .

Среднеквадратичное значение напряжения U за период находится из выражения

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}. \quad (8.2)$$

Измерение среднеквадратичного напряжения осуществляется вольтметрами типа В3-... и В7-...

Связь между значениями U_m , $U_{св}$, U данной формы устанавливается посредством амплитуды и формы.

Коэффициент амплитуды кривой напряжения K_a (пифактор) – это отношение амплитудного (пикового) значения напряжения к среднеквадратичному:

$$K_a = \frac{U_m}{U}. \quad (8.3)$$

Коэффициент формы кривой напряжения K_ϕ – это отношение среднеквадратичного значения к средневыпрямленному:

$$K_\phi = \frac{U}{U_{св}}. \quad (8.4)$$

На рис. 8.1, а приведен вид синусоидальных сигналов $U(t) = U_m \sin(2\pi t/T)$, на рис. 8.1, б – прямоугольных $U(t) = \pm U_m$. В качестве примера определим значения K_a и K_ϕ для напряжения пилообразной формы $U(t) = U_m t/T$ (рис.8.1, в):

$$K_a = \frac{U_m}{U} = \sqrt{3} \approx 1,73; \quad K_\phi = \frac{U}{U_{св}} = 2\sqrt{3} \approx 1,16, \quad (8.5)$$

так как

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m^2}{T^2} t^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{3}},$$

$$U_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_m}{T} t dt = \frac{U_m}{2}.$$

Блок-схема универсальных вольтметров, способных измерять как постоянное, так и переменное напряжение, представлена на рис.8.2.

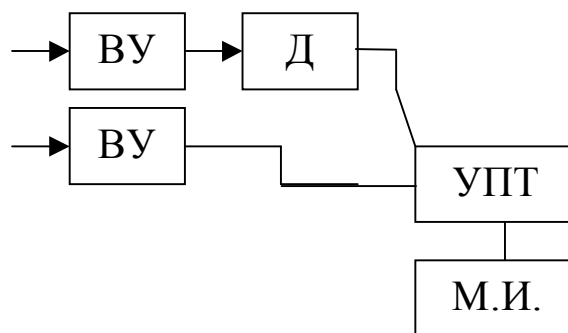


Рис. 8.2. Структурная схема универсального вольтметра:

ВУ – входное устройство;

Д – детектор (преобразователь);

УПТ – усилитель постоянного тока;

М.И. – магнитоэлектрический измеритель.

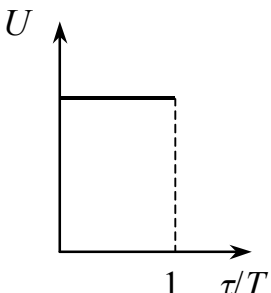
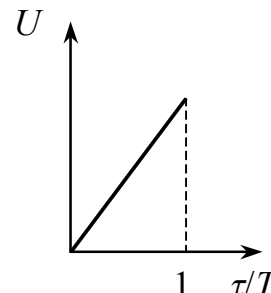
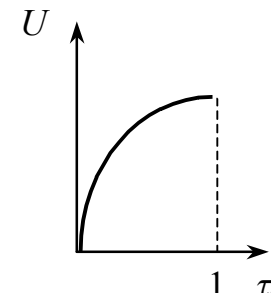
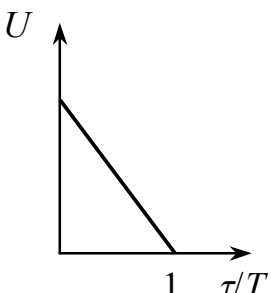
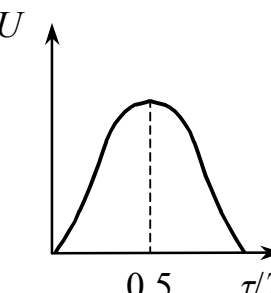
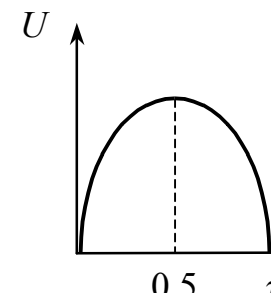
8.2. Характеристика детекторов электронных вольтметров

Детектор – это преобразователь переменного напряжения в постоянное, которое пропорционально какому-либо значению переменного напряжения: амплитудному, средневывпрямленному, среднеквадратичному. В зависимости от характера преобразования различают детекторы амплитудного, средневывпрямленного и среднеквадратичного значения. Кроме того, необходимо различать детекторы с открытым входом и с закрытым входом. Различие состоит в том, что закрытый вход детектора включает в себя разделительную ёмкость.

Тип детектора и входа вольтметра можно определить, измеряя зависимость показаний прибора от длительности электрического импульса (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Влияние типа детектора и входа вольтметра на его показания U в зависимости от длительности импульса τ , отнесенной к периоду T

Тип входа	Тип детектора		
	Амплитудный	Средневыпрямленный	Среднеквадратичный
Открытый	 $U = kU_m$	 $U = kU_m \tau / T$	 $U = kU_m \sqrt{\tau / T}$
Закрытый	 $U = kU_m(1 - \tau / T)$	 $U = kU_m[\tau / T - (\tau / T)^2]$	 $U = kU_m \sqrt{\tau / T - (\tau / T)^2}$

Амплитудный детектор

Показание вольтметра с амплитудным детектором соответствует амплитудному значению измеряемого напряжения. Наиболее распространённые схемы амплитудных детекторов представлены на рис.8.3.

Элементом, запоминающим амплитудное значение напряжения, служит конденсатор C . В зависимости от включения диода D амплитудный детектор может измерять положительное или отрицательное амплитудное значение напряжения.

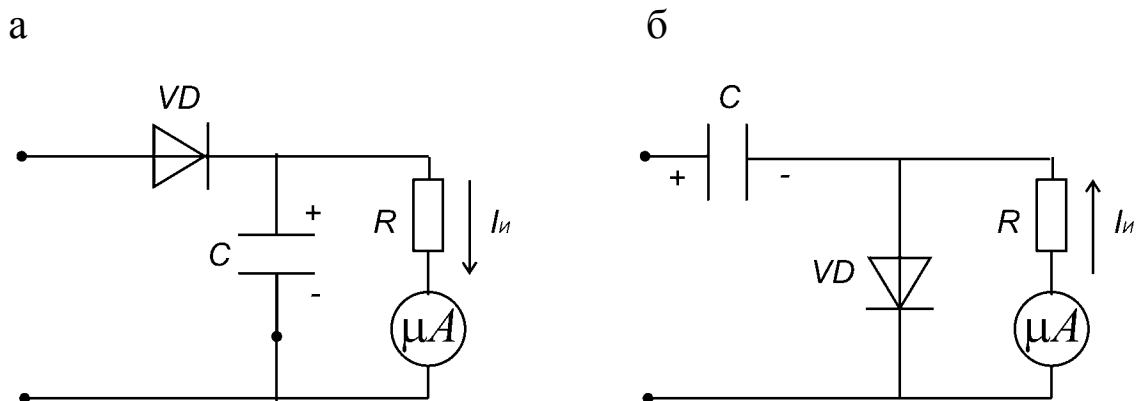


Рис.8.3. Схема амплитудного детектора с открытым (а) и закрытым (б) входом

Параметры детектора (преобразователя) с открытым входом (рис.8.3, а) подобраны таким образом, чтобы при первой полуволне через диод VD сопротивлением $R_{пр}$ осуществлялся быстрый заряд конденсатора до некоторого значения напряжения U_{C1} и медленный заряд на резистор R с момента, когда $U(t) < U_{C1}$. Постоянная времени заряда $R_{пр}C$ много меньше постоянной разряда RC :

$$RC \gg R_{пр}C. \quad (8.6)$$

Таким образом, за период T переменного напряжения конденсатор C не успевает полностью разрядиться. При второй положительной полуволне конденсатор C вновь разряжается до напряжения $U_{C2} > U_{C1}$. При значении постоянной разряда, много большей периода T , примерно через 3-4 T конденсатор зарядится до амплитудного значения, т.е. $U_C \approx U_M$. Показания магнитоэлектрического амперметра (измерителя) определяются средним разрядным током

$$I_U = \frac{U_C}{R} = \frac{U_M}{R}, \quad (8.7)$$

пропорциональным амплитудному значению измеряемого напряжения.

В детекторах среднев्यпрямленного значения показания α микрометра пропорциональны средневыпрямленному значению измеряемого напряжения:

$$\alpha = k U_{св}. \quad (8.8)$$

Детекторы выполняются на полупроводниковых диодах, работающих в цепях одно- и двухполупериодного выпрямления. Работа диодов осуществляется на линейном участке вольт-амперной характеристики.

Наиболее распространены мостовые схемы. Они работают следующим образом. Ток через микроамперметр протекает в одном и том же направлении в течение обоих полупериодов переменного напряжения (в положительный полупериод по цепи $VД_2-R-VД_3$). При использовании линейного участка характеристики диода и при открытом входе показания микроамперметра пропорциональны средневывпрямленному значению измеряемого напряжения. Если же вход детектора закрыт, то показания микроамперметра пропорциональны только средневывпрямленному значению переменной составляющей измеряемого напряжения.

В детекторах среднеквадратичного значения показания микроамперметра пропорциональны квадрату среднеквадратичного значения измеряемого напряжения:

$$\alpha = \kappa U^2.$$

Детекторы выполняются на элементах с квадратичной вольт-амперной характеристикой.

Простейший преобразователь – цепь $R_1-VД_1-\mu A$.

При $U(t) = U_M \sin \omega t$ ток

$$i_U = \beta U_M^2 \sin^2 \omega t = \beta U_M^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}. \quad (8.9)$$

Поскольку выходной прибор – магнитоэлектронный микроамперметр, он будет реагировать на среднее значение тока:

$$I_U = \beta \frac{U_M^2}{2} = \beta U^2. \quad (8.10)$$

Для увеличения протяжённости квадратичного участка вольт-амперной характеристики используются детекторы на диодных цепочках. Напряжение U_0 создаёт на резисторах R_4 и R_5 соответственно напряжения смещения U_1 и U_2 . Если входное напряжение $U(t)$ не превышает значения U_1 , то ток протекает через диоды $VД_1$ и $VД_2$, в результате чего крутизна зависимости тока от напряжения увеличивается. Ток через прибор при этом равен

$$i_U = i_1 + i_2. \quad (8.11)$$

Если $U(t) > U_2$, то ток протекает через диоды $VД_1, VД_2, VД_3$, и ток через прибор в этом случае равен

$$i_U = i_1 + i_2 + i_3. \quad (8.12)$$

Описание лабораторной работы № 8 «Измерение напряжений сложной формы»

1. Цель работы

1.1. Изучить принципы построения и работы электронных вольтметров переменного тока.

1.2. Приобрести практические навыки измерения переменного напряжения сложной формы.

2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов:

- электронный осциллограф (типа С1-150);
- генератор сигналов специальной формы (типа Г5-82).
- генератор импульсов (типа Г6-43).

Исследуемыми приборами являются:

- вольтметр переменного тока (типа В3-55);
- вольтметр импульсного тока (типа В4-12);
- вольтметр цифровой (типа РВ7-22А)

3. Программа работы

3.1. Теоретическая часть.

3.1.1. Рассчитать теоретические значения коэффициентов амплитуды и формы исследуемых напряжений по их аналитической записи. Виды измеряемых напряжений представлены на рис.8.1.

3.1.2. Проанализировать работу измерительных схем исследуемых приборов, вывести формулы для расчёта показаний приборов для представленных на рис.8.1 видов напряжений в зависимости от амплитудного значения сигнала.

3.2. Экспериментальная часть.

3.2.1. Для каждого вольтметра измерить по десять точек зависимости напряжения от длительности импульса. Период T оставлять постоянным. Длительность импульса τ изменять в диапазоне от 1 мкс через $T/2$ до $T-1$ мкс. Данные занести в табл.8.2. По результатам измерения построить зависимости $U(\tau)$. По зависимостям определить тип детектора (ампли-

тудный, средневыпрямленный или среднеквадратичный) и вход (открытый или закрытый) каждого вольтметра.

3.2.2. По результатам измерения напряжений различной формы определить: амплитудное, среднеквадратичное, средневыпрямленное значения напряжений; коэффициенты амплитуды и формы измеренных напряжений; погрешности измерений напряжений, коэффициентов амплитуды и форм. Данные занести в табл.8.3 и 8.4.

3.2.3. Для сигналов типа "синусоида" и "меандр" по результатам 10-ти чередующихся измерений напряжения вычислить среднеквадратичную погрешность определения амплитудного и среднеквадратичного значений сигналов. Данные занести в табл.8.5.

Таблица 8.2

Зависимость напряжения от длительности импульса

τ , мкс	Показания вольтметров, В		
	ВЗ-55	В4-12	РВ7-22А
1			
...			

Таблица 8.4

Расчет коэффициентов амплитуды и формы

K_a				K_f		
Вид напр.	Теор.	Эксп.	γ_k	Теор.	Эксп.	γ_k
						
						
						

Таблица 8.3

Зависимость напряжения от формы импульса

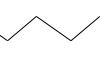
Вид напряжения	Показания вольтметров, В			Значения рассчитанных напряжений			Погрешности		
	ВЗ-55	В4-12	РВ7-22А	U_m	U	$U_{св}$	γ_{U_m}	γ_U	$\gamma_{U_{св}}$
									
									
									

Таблица 8.5

Определение случайной погрешности измерения напряжения для сигналов различной формы

Вид напряжения	№	U_M	U	$U_{св}$	σ_{U_M}	σ_U	$\sigma_{U_{св}}$
	1						
	2						
	3						
	...						
	1						
	2						
	3						
	...						

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. По теоретической части работы.

К п.3.1.1.

Для определения коэффициентов амплитуды и форм аналитически описать исследуемое напряжение как функцию параметров U_M , t , T и воспользоваться формулами для вычисления среднеквадратичных и средневывпрямленных значений.

4.2. По экспериментальной части работы.

К п.3.2.1.

4.2.1. Исследуемые напряжения различной длительности подавать с выхода генератора Г6-43. Установить выходной сигнал напряжением 0.8 – 1 В, периодом 50-90 мкс.

4.2.2. С помощью трех вольтметров снять зависимости исследуемых напряжений от длительности импульса.

К п.3.2.2.

4.3.1. Исследуемые напряжения сложных форм подавать с выхода генератора Г5-82. Установить выходной сигнал напряжением 1 В, частотой 1 МГц.

4.3.2. С помощью осциллографа С1-150 снять вид исследуемых напряжений, измерить их временные параметры. Осциллограммы зарисовать.

4.3.3. Измеряемые напряжения подавать на вход изучаемых вольтметров, последовательно меняя форму напряжения.

При подаче сигнала 1 В на амплитудный вольтметр В4-12 использовать ослабление сигнала с Г5-82 на 20 дБ.

4.3.4. Оценку погрешности измерения напряжений, коэффициентов амплитуды и формы провести по формулам

$$\gamma_U = \left| \frac{U_{теор} - U_{экспер}}{U_{теор}} \right| \times 100\%,$$
$$\gamma_k = \left| \frac{K_{теор} - K_{экспер}}{K_{теор}} \right| \times 100\%. \quad (8.13)$$

К п.3.2.

Оценку среднеквадратичной погрешности и измерения следует провести по формуле

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n(n-1)}}, \quad (8.14)$$

где U_i – измеренная величина напряжения, В;

$\bar{U}$ – среднее значение измеренного напряжения, В;

n – число проведённых измерений.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.
 - Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
 - Структурная схема типового электронного осциллографа.
2. Теоретическая часть.
 - Методика проведения измерений.
 - Основные расчетные соотношения.
3. Экспериментальное исследование.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
4. Оценка погрешности результатов исследования.

- Методика расчета погрешности.
- Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. Перечислить параметры напряжения, измеряемые электронными вольтметрами различных типов. Дать их определение.

6.2. Что такое коэффициент формы?

6.3. Что такое коэффициент амплитуды?

6.4. Вычертить и объяснить работу блок-схемы вольтметра переменного тока.

6.5. Назвать типы детекторов и начертить их принципиальные схемы.

6.6. Начертить и объяснить работу схем детекторов, исследуемых в лабораторной работе.

9. Приборы и методы измерения временных интервалов и частоты

9.1. Описание устройства и принципов работы электронно-счетного частотомера ЧЗ-35А

Частотомер электронно-счетный ЧЗ-35А предназначен для автоматического измерения частоты, периода электрических колебаний, интервалов времени, длительности импульсов, отношения частот.

Прибор измеряет частоту синусоидального сигнала на входе "→)А" в диапазоне частот 10 Гц-50 МГц и напряжений 0,1-1,5 В (аттенуатор 1:1). По входу "→)В" – измеряет период синусоидального напряжения с частотой 0,01 Гц – 100 кГц, напряжением 0,5-2 В. Предусмотрено также измерение частоты и периода импульсных сигналов и временных интервалов.

Принципы действия частотомера основаны на расчете числа периодов неизвестной частоты за определенный высокоточный отрезок времени, называемый временем измерения. При времени измерения в 1/с количество подсчитанных периодов и есть значение измеряемой частоты в герцах. Времена измерения формируются путем последовательного деления частоты опорного генератора декадными степенями.

При измерении периода время измерения равно измеряемому периоду, а подсчитываемые за это время колебания образуются доходным делением и умножением частоты опорного генератора и называются метками времени.

Функциональная схема прибора содержит: входные формирующие устройства (ФУ) "А" и "В"; селектор (С); блок счетных декад (БСД); генератор меток времени (ГМВ); схема автоматики (СА); блок индикации (И). Измерение частоты производится по схеме, приведенной на рис.9.1.

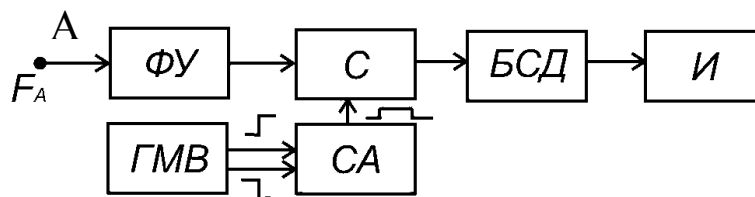


Рис.9.1. Блок-схема измерения частоты

Измеряемая частота через входное формирующее устройство А и селектор С поступает на блок счетных декад БСД с системой досчета. Селектор открывается импульсом, задающим время измерения (строб-импульсом), вырабатываемым схемой автоматики СА, которая управляется входными импульсами генератора меток времени ГМВ.

Измерение периода производится по блок-схеме, приведенной на рис.9.2.

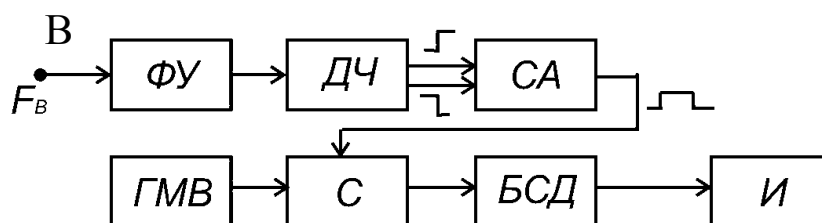


Рис.9.2. Блок-схема измерения периода

Измеряемый сигнал через входное формирующее устройство В поступает в схему автоматики СА, формирующую строб-импульс. Длительность строб-импульса равна периоду сигнала. На выход блока счетных декад БСД с системой досчета поступают импульсы с генератора меток времени ГСМ.

Более точное измерение периода производится с использованием декадных делителей частоты ДЧ: входной сигнал после формирования поступает на декадные делители, где его период умножается в $10-10^4$ раз, а затем на схему автоматики. В этом случае длительность строб-импульса равна периоду измеряемого сигнала, умноженному на коэффициент деления используемого делителя.

9.2. Описание устройства и принципа работы измерителя временных интервалов И2-26

Измеритель временных интервалов (ИВИ) предназначен для измерения временных интервалов периодических процессов микросекундного диапазона длительностей. ИВИ работает в режиме автоколебаний и обеспечивает измерение времени задержки ($\tau_{\text{зад}}$) между одинаковыми сигналами на одном уровне в диапазоне от $10 \cdot 10^{-9}$ /с до $10 \cdot 10^{-3}$ /с. Погрешность измерения задержки при амплитуде сигналов от 60 мВ до 30 В, периоде исследования от 10 до $10 \cdot 10^3$ мкс, крутизне

изображения в области точек измерения не менее 1 мм/нс, не более $\pm(5 \cdot 10^{-7} \tau_{\text{зад}} + 0,35 \cdot 10^{-9})$ с.

В основу работы прибора положен компенсационный метод измерения временных интервалов. Сущность его заключается в сравнении измеряемого интервала с эталонным. При этом эталонный временной интервал задается ИВС, а момент компенсации измеряемого временного интервала эталонным фиксируется с помощью осциллографического индикатора.

Процесс измерения временных интервалов сводится к следующему: начало измеряемого интервала, подаваемого на вход системы вертикального отклонения индикатора, совмещается с визирной отметкой на экране ЭЛТ. Изменением задержки задержанного импульса ИВС, запускающего развертку индикатора, производится совмещение конца временного интервала с той же отметкой. Измеряемый интервал равен величине измерения задержки, отсчитываемой по шкале ИВС.

На рис.9.3 приведена функциональная схема, поясняющая принципы действия ИВС.

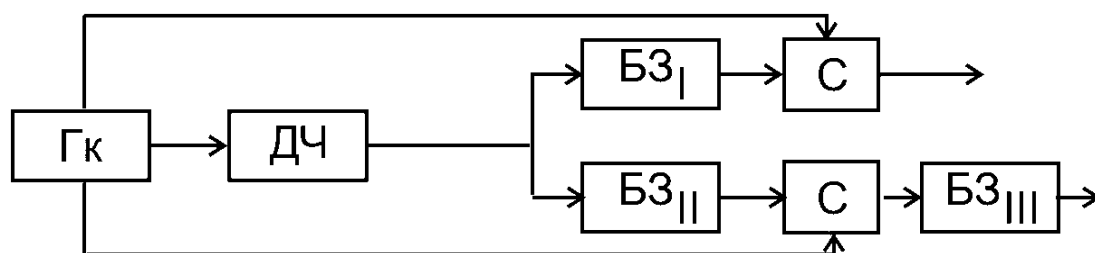


Рис.9.3. Функциональная схема ИВС

Кварцевый генератор Гк вырабатывает опорную последовательность импульсов, подаваемую на делитель частоты ДЧ. Период следования выходных импульсов делителя определяет интервал следования выходных импульсов.

Импульсы ИВС открывают входы блоков задержки БЗ I и II в каналах опорного и задержанного импульсов. Блоки осуществляют время-импульсное преобразование, отсчитывая количество импульсов, соответствующее установленной задержке, и открывают селекторы С. Происходит выбор импульсов, которые в канале опорного импульса поступают на выходной формирователь, а в канале задержанного импульса – на электронную схему задержки (III).

Функциональная схема индикатора приведена на рис.9.4.

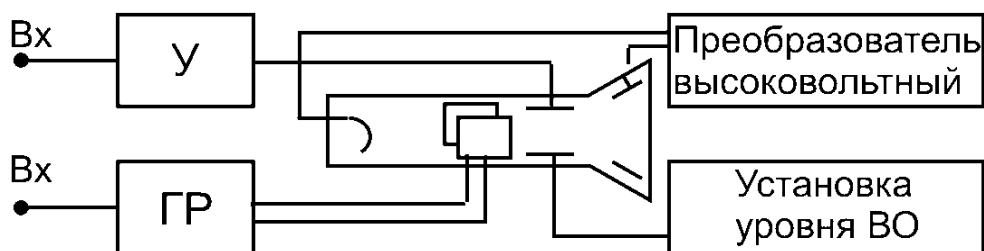


Рис.9.4. Функциональная схема индикатора

Описание лабораторной работы № 9 «Измерение временных интервалов и частоты»

1. Цель работы

1.1. Изучить принципы построения и работы электронных приборов для измерения частоты и временных интервалов.

1.2. Приобрести практические навыки измерения частот и периодов электрических колебаний, а также временных периодических процессов.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов и лабораторного макета "Линия задержки".

2.2. Исследуемыми приборами являются:

- частотомер электронно-счетный (типа ЧЗ-35 А);
- измеритель временных интервалов (типа И2-26).

Вспомогательный прибор – генератор сигналов (типа Г5-82).

2.3. Лабораторный макет для измерения длительности временных интервалов (рис.9.5) содержит стандартную линию задержки (ЛЗ) с согласованной нагрузкой по входу и выходу, гнезда "Вх" и "Вых" для подключения источника сигнала и измерительного устройства, а также гнезда отводов для измерения промежуточных значений времени задержки.

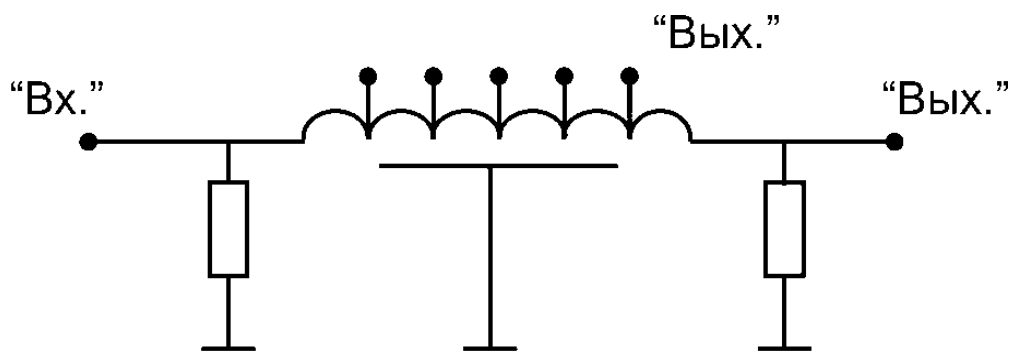


Рис.9.5. Схема макета "линия задержки"

3. Программа работы

3.1. Изучение работы частотомера в режиме измерения частоты периода гармонических колебаний.

3.1.1. Проверка работоспособности частотомера.

Произвести проверку работы основных узлов прибора. Изменяя частоту генератора меток времени, измерить значения частот при различных положениях переключателя "Метки времени" и "Время измерения". Данные занести в табл.9.1.

Таблица 9.1

Проверка работы частотомера

Метки времени	Время измерения				
	"1ms"	"10ms"	"0.1s"	"1s"	"10ms"
"0.1μs"					
"1μs"					
"10μs"					
"0.1ms"					
"1ms"					

Сравнить полученный результат с поверочной таблицей частотомера. Показания прибора могут отличаться от указанных не более чем на ± 1 ед. счета.

3.1.2. Измерение частоты сигналов.

Перед измерениями убедиться, что значения подаваемых на выходе частотомера сигналов не превышают допустимых. Подать измеряемый сигнал с генератора ($U_m \leq 1V$) на вход "→)А" частотомера. Изменяя значения частот в диапазоне

20-20000 Гц, выполнить измерения. Данные занести в табл.9.2.

Таблица 9.2

Результаты измерения частоты

Показания генератора	Показания частотомера		Погрешности	
частота, Гц	время изм.	частота, Гц	$\gamma_{\text{ч}}, \%$	$\gamma_{\text{и}}, \%$

Для частот измеряемых сигналов рассчитать относительную систематическую погрешность частотомера:

$$\gamma_{\text{ч}} = \pm \left(\gamma_0 + \frac{1}{f_x \cdot T_{\text{изм}}} \right) \cdot 100\%, \quad (9.1)$$

где γ_0 – основная относительная погрешность внутреннего кварцевого генератора ($\gamma_0 = 1 \cdot 10^{-7}$);

f_x – измеряемая частота, Гц;

$T_{\text{изм}}$ – время измерения, с.

Рассчитать относительную погрешность измерения:

$$\gamma_{\text{и}} = \left| \frac{f_{\text{Г}} - f_{\text{ч}}}{f_{\text{Г}}} \right| \cdot 100\%. \quad (9.2)$$

3.1.3. Измерение периода.

Изменяя значения частот в диапазоне 20-20000 Гц, выполнить измерения периодов колебаний. Данные занести в табл.9.3.

Для периодов исследуемых сигналов рассчитать относительную систематическую погрешность частотомера по формуле

$$\gamma_{\text{ч}} = \pm \left(\gamma_0 + \frac{0.003}{n} + \frac{T_0}{n \cdot T_x} \right) \cdot 100\%, \quad (9.3)$$

где T_x – измеряемый период, с;

T_0 –метки времени, с;

n –множитель периода;

0,003 – погрешность запуска формирующего устройства. Сравнить значения погрешностей определения частоты и длительности периода при одинаковом значении $f_x(T_x)$.

Рассчитать относительную погрешность измерения:

$$T_{\text{и}} = \left| \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{ч}}}{T_{\text{г}}} \right| \cdot 100\% . \quad (9.4)$$

Таблица 9.3

Результаты измерения периодов сигналов

Показания генер.	Показания частотомера			Погрешности	
период, с	множ. периода	метки времени	период, с	$\gamma_{\text{ч}}, \%$	$\gamma_{\text{и}}, \%$

3.2. Изучение работы измерителя временных сигналов И2-26 (измерение длительности задержки).

3.2.1. Подготовка к проведению измерений.

Подать задержанный сигнал с источника временных сдвигов (ИВС) на вход усилителя И2-26 и вывести на середину экрана электронно-лучевой трубки прибора изображение задержанного импульса. Произвести последовательное переключение переключателей "Задержка ns", при этом изображение импульса должно перемещаться на одинаковые расстояния.

3.2.2. Измерение задержки между импульсами.

Подать опорный сигнал на вход линии задержки, а задержанный сигнал – на вход усилителя (рис. 9.6).

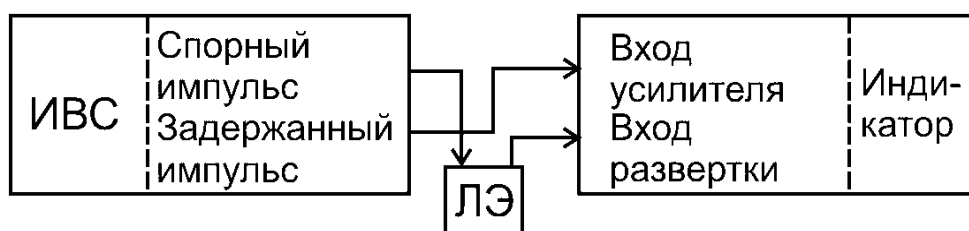


Рис.9.6. Блок-схема измерения задержки между импульсами

Выходной сигнал ЛЗ подать на вход развертки индикатора И2-26. Выполнить измерения задержки между импульсами в различных точках ЛЗ. Полученные данные занести в табл.9.4.

Таблица 9.4

Измеренные значения времени задержки импульсов

Параметры задержки	Номер вывода ЛЗ			
	1	2	. . .	19
Длительность, нс				
Погрешность, нс				

При крутизне изображения фронта импульса не менее 4 мм/нс рассчитать возникающую погрешность по формуле

$$\delta\tau_3 = \pm(\gamma_0\tau_3 + \sqrt{\delta_{c1}^2 + \delta_{c2}^2 + (\delta_{y1} + \delta_{y2})^2 + \delta_{\Gamma}^2}), \quad (9.5)$$

где γ_0 – относительная погрешность частоты кварцевого генератора ($5 \cdot 10^7$);

τ_3 - величина измеряемой задержки, нс;

δ_{c1}, δ_{c2} – погрешность совмещения, нс,

$$\delta_{c1,2} = 0.1kU / S_{1,2}, \quad (9.6)$$

где k – чувствительность тракта вертикального отклонения, мм/В; $S_{1,2}$ – соответствующая крутизна фронта и среза импульса, мм/нс; $\delta_{y1,y2}$ – погрешности установки уровня измерения, нс.

$$\delta_{y1,y2} = \frac{k(1.5 \cdot 10^{-2}U + 0.05)}{S_{1,2}}, \quad (9.7)$$

где U – величина уровня, В;

δ_{Γ} – погрешность установки задержки ($\pm 0,6$ нм).

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. Указания к выполнению п.3.1.1.

Включить тумблеры "Сеть" и "0 ◀" (включение работы внутреннего кварцевого генератора). Установить тумблер режима работы "Ручной-автом." в положение "Автомат", переключатель "Время индикации" - в положение, обеспечивающее удобное считывание показаний, переключатель "Род работы" – в положение "Частота-контроль".

4.2. К п.3.1.2.

Динамический диапазон входных напряжений при положении аттенуатора "1:1" составляет 0,1-1,5 В.

Установить переключатель "Род работы" в положение "Частота - Контроль", переключатель "Метки времени" – в положение "→)А"; режим работы канала:

"А"- "∞", "Время измерения" – "1S". Подать измеряемый сигнал на гнездо "→)А". Перевести переключатель "Время измерения" в положение, обеспечивающее необходимую точность измерений.

4.3. К п.3.1.3.

Установить переключатель "Род работы" в положение "Т_в", переключатель "Раздельно-совместно" – в "Раздельно", "Метки времени" – в "0.1 μS", "Множитель периода" – в "1". Измеряемый сигнал подать на гнездо блока интервалов времени "→)В". Перевести переключатели "Метки времени" и "Множитель периода" в положение, соответствующее заданной точности измерений.

4.4. К п.3.2.1.

Соединить кабелем гнездо "Опорный импульс (→" ИВС с гнездом "→)В 1kΩ20pF" Индикатора для запуска развертки индикаторного устройства. Для подачи импульса на усилитель индикатора соединить кабелем гнездо "Задержанный импульс (→" ИВС с гнездом "→) 100kΩ40pF" индикатора. Переключателями "Задержка nS" и "Задержка x1000 ns" вывести в центр экрана ЭЛТ изображение импульса.

Определить крутизну фронта импульса, мм/нс:

$$S = \frac{V}{t}, \quad (9.8)$$

где V – амплитуда фронта, мм;
 t – длительность фронта импульса, нс.

4.5. К п.3.2.2.

С помощью переключателя "Задержка nS " вывести изображение фронта импульса в центр экрана ЭЛТ. Органами управления луча совместить изображение фронта импульса с визирной отметкой. Записать значение задержки.

Изображение фронта импульса после ЛЗ совместить с визирной отметкой, пользуясь регулированием времени задержки "Задержка nS ". Длительность задержки импульса равна разности полученных значений задержки.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.
 - Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
 - Структурная схема типового электронного осциллографа.
2. Теоретическая часть.
 - Методика проведения измерений.
 - Основные расчетные соотношения.
3. Экспериментальное исследование.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
4. Оценка погрешности результатов исследования.
 - Методика расчета погрешности.
 - Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Принцип действия электронно-счетного частотомера.
- 6.2. Принципы измерения частоты и периода.
- 6.3. Принципы действия измерителя временных интервалов.
- 6.4. Способы измерения временных интервалов.
- 6.5. Основные погрешности измерения временных интервалов прибором И2-26.

10. Приборы и методы измерения электрического сопротивления

10.1. Описание устройства и принципа работы вольтметра цифрового В7-58

В качестве одной из возможностей вольтметра является определение методом закона Ома электрического сопротивления исследуемого резистора в диапазоне $0,1\text{--}2 \cdot 10^7$ Ом.

Систематическая погрешность измерения в диапазоне до 200 Ом составляет $\pm 0,1$ Ом, до 2 кОм – ± 1 Ом, до 20 кОм – ± 10 Ом, до 200 кОм – $\pm 0,1$ кОм, до 2 МОм – ± 1 кОм, до 20 МОм – ± 10 кОм. В вольтметре предусмотрено переключение диапазонов сопротивлений для повышения точности измерения.

Вольтметр состоит из следующих блоков: измерительная схема, управляющее устройство, блок питания, сравнивающее устройство.

Управляющее устройство осуществляет управление, обработку и вывод информации на индикаторное устройство. Для определения электрического сопротивления исследуемого резистора используется закон Ома:

$$R_x = U / I .$$

При этом измеряемыми величинами являются напряжение U и сила тока I , определение которых осуществляется с помощью измерительной схемы вольтметра.

Сравнивающее устройство выполняет операции интегрирования сигнала, импульсного усиления проинтегрированного сигнала и формирования сигнала управления.

10.2. Описание устройства и принципы работы моста постоянного тока измерительного Р5053

Мост предназначен для измерения электрического сопротивления в лабораторных и цеховых условиях. Он представляет собой одинарный мост с двухзажимным и четырехзажимным подключением измеряемых резистивных элементов.

Для измерения электрического сопротивления в диапазоне от 1,000 до 99,000 Ом применена измерительная схема одинарного моста с четырехзажимным подключением измеряемого сопротивления (рис.10.1), позволяющая уменьшить влияние соединительных проводов на результат измерения.

Класс точности при измерении сопротивлений от 1,000 до 99,999 Ом равен 2,0; предел допустимой систематической погрешности моста δR_m , %, определяется выражением

$$\delta R_m = 0.1 + 0.01(100/R_x - 1). \quad (10.1)$$

Для применения электронного сопротивления в диапазоне от 10^2 до 10^{15} Ом применена измерительная схема одинарного моста с двухзажимным подключением измеряемого сопротивления (рис.10.2). В качестве первого индикатора используется электрометр с динамическим конденсатором.

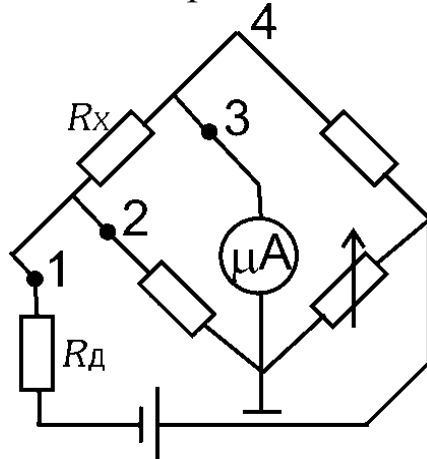


Рис.10.1. Одинарный мост постоянного тока с четырехзажимным подключением прямого резистора:

R_6 - балластное сопротивление; 1,2,3,4 – подсоединительные зажимы моста; μA - микроамперметр типа M136

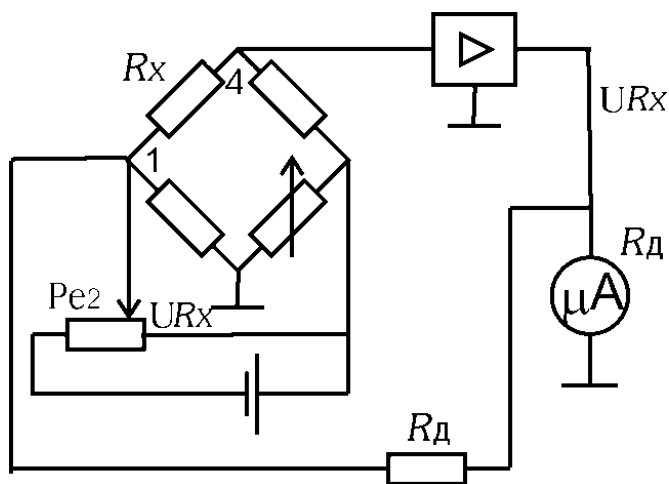


Рис.10.2. Одинарный мост с динамическим электрометром в качестве нулевого индикатора: VR_x - переменный резистор для установки напряжения на измеряемом сопротивлении;

R_d - добавочное сопротивление в цепи вольтметра;

1,4 - присоединительные зажимы моста

В мосте Р4053 отсчет измеряемого сопротивления дается в цифровых значениях с автоматическим указанием положения десятичной запятой на измеряемом пределе.

Нулевой индикатор является динамическим электрометром, в котором для преобразования входного сигнала в переменное напряжение служит динамический конденсатор.

Описание лабораторной работы № 10 «Измерение сопротивления мостовым способом»

1. Цель работы

1.1. Изучить принципы построения электронных приборов для измерения сопротивлений.

1.2. Приобрести практические навыки измерения электрических сопротивлений в лабораторных условиях.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов и лабораторного макета.

2.2. Исследуемыми приборами являются:

- вольтметр цифровой В7-58;
- мост постоянного тока измерительный Р403.

2.3. Вспомогательными средствами измерения являются катушки электрического сопротивления образцовые Р4023.

2.4. Лабораторный макет для измерения сопротивлений содержит набор резисторов с сопротивлениями в диапазоне $10\text{-}10^8$ Ом и гнездо для подключения измерительных приборов.

3. Программа работы

3.1. Изучение работы цифрового вольтметра.

3.1.1. Проверка режима работы вольтметра. Вольтметр пригоден для эксплуатации, если при разомкнутых контактах на отчетном устройстве отображается "1", а при замкнутых – сопротивление контактов.

3.1.2. Измерение сопротивлений.

Определить с помощью вольтметра значения сопротивлений R46-R90 на лабораторном макете в соответствии с п.4.1. Данные занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Определение значений сопротивлений цифровым вольтметром

Разъем	Номер резист.	Показания вольтметра R_x , Ом	Среднее сопротивление по одному номиналу, $\bar{R}$, Ом	Абсолютная случайная погрешность ΔR , Ом	Относит. случайная погрешность δR , %

3.2. Изучение работы измерительного моста постоянного тока.

3.2.1. Проверка режима работы моста постоянного тока.

Произвести проверку работы основных узлов прибора в соответствии с п.4.2. Выполнить контрольные измерения значения сопротивлений образцовых мер (катушек Р4023) и резисторов R1-R9 лабораторного макета.

3.2.2. Измерение сопротивлений. Произвести измерение сопротивлений резисторов R73-R90 лабораторного макета с помощью моста постоянного тока в соответствии с п.4.3. Полученные данные занести в табл.10.2.

Таблица 10.2

Измерение значений сопротивлений мостом постоянного тока

Разъем	Номер резист.	Показания вольтметра R_x , Ом	Среднее сопротивление по одному номиналу, $\bar{R}$, Ом	Абсолютная случайная погрешность ΔR , Ом	Относит. случайная погрешность δR , %

3.3. Обработка результатов измерений.

Выполнить статистическую обработку результатов измерений для каждого ряда сопротивлений одного номинала: определить среднее значение, СКО и погрешности разброса значений сопротивлений в соответствии с п.4.4. Данные занести в табл. 10.1 и 10.2. Оценить систематическую погрешность при-

боров в диапазоне измеряемых сопротивлений (см. п.10.1 и п.10.2). Сравнить ее с погрешностью результатов измерения.

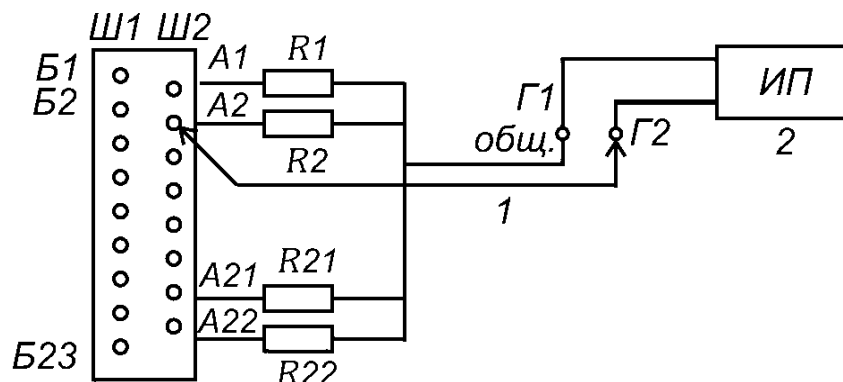


Рис.10.3. Схема расположения контактов на разъемах Ш1, Ш2 лабораторного макета: 1 - соединительная перемычка; 2 - измерительный прибор

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. К п.3.1.2.

Включить тумблер "Сеть". Подключить к вольтметру соединительные провода и встроенный магазин сопротивлений согласно рис. 10.3. Установить диапазон измерения сопротивлений "2 кОм". Считать показание прибора. В случае, когда величина измеряемого сопротивления станет меньше 0,2 кОм, установить диапазон измерения "200 Ом".

4.2. К п.3.2.1.

Измерение сопротивлений в диапазоне 10^5 - 10^{12} производится в следующей последовательности:

- а) подключить измеряемый объект к зажимам 1 и 4 при помощи соединительного высокоомного кабеля. Зажим " $\overline{\text{T}}$ " моста соединить с зажимом "Экран" катушки сопротивления;
- б) отпустить кнопку "Точно";
- в) установить переключатель схемы измерения в положение $10^{12} - 10^{15}$;
- г) установить переключатель "Род работы" в положение "К₀" (контроль нуля);
- д) установить световой указатель микроамперметра на отметку "0" рукояткой "Уст.0"; нажать кнопку "Точно";

- е) повторить операцию;
- ж) установить рукоятку "VR_x" в среднее положение;
- з) отпустить кнопку "Точно";
- и) установить переключатель "Род работы" в положение "Изм";
- к) установить переключатель пределов измерения в "мΩ";
- л) уравновесить мост рукоятками магазина сопротивлений;

ВНИМАНИЕ! При измерении сопротивления в пределах от 1 до 10¹² Ом первую декаду, отмеченную знаком "!", установить в нулевое положение.
Данная декада используется при измерении сопротивления в диапазоне 10¹² – 10¹⁵ Ом.

- м) установить переключатель схемы измерения в среднее положение.

4.3. К п.3.2.2.

Измерение сопротивления до 99,999 Ом производится по четырех-зажимной схеме одинарного моста.

Для измерения:

- подключить измеряемый объект к зажимам 1, 2, 3, 4 моста;
- установить рукоятку переключателя схемы измерения в положение "1-10² Ом";
- установить рукоятку "Рег.VR_x" в крайнее правое положение;
- установить переключатель "Род работы" в положение "Изм.";
- уравновесить мост декадными переключателями – световой указатель микроамперметра установить на нуль;
- нажать кнопку "Точно", зафиксировать ее поворотом относительно оси, окончательно уравновесить мост;
- произвести отсчет.

ВНИМАНИЕ! При переключении сопротивлений на макете кнопку "Точно" отпускать!

4.4. Расчет результатов измерений (среднего значения $\bar{R}$ и случайных погрешностей ΔR и δR) осуществлять по формулам

$$\bar{R} = \sum_{x=1}^n R_x, \quad (10.2)$$

$$\Delta R = t_s \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n (R_x - \bar{R})^2}{n(n-1)}}, \quad (10.3)$$

$$\delta R = 100 \Delta R / \bar{R}, \quad (10.4)$$

где $t_s = 2,3$ – коэффициент Стьюдента для 9 измерений при доверительной вероятности 0.95.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.
 - Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
 - Структурная схема типового электронного осциллографа.
2. Теоретическая часть.
 - Методика проведения измерений.
 - Основные расчетные соотношения.
3. Экспериментальное исследование.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
4. Оценка погрешности результатов исследования.
 - Методика расчета погрешности.
 - Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Объяснить принцип действия вольтметра цифрового.
- 6.2. Как зависит точность измерения вольтметра от установленного диапазона измеряемых сопротивлений?
- 6.3. Изложить принцип действия моста измерительного Р4053.
- 6.4. В чем различие двухзажимной и четырехзажимной измерительных схем?
- 6.5. Связана ли определяемая в работе погрешность величины сопротивления с погрешностью измерения приборов?

ЧАСТЬ IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

11. Измерение параметров электротехнических цепей

11.1. Резонансный метод

Принцип резонансного метода заключается в определении резонансной частоты колебательного контура, состоящего из образцового и измеряемого элементов. Значение измеряемого параметра вычисляется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (11.1)$$

На основе резонансного метода разработаны и выпускаются приборы для измерения параметров элементов схем в диапазоне рабочих частот от 1 кГц до 300 МГц. К удобным и распространенным приборам относятся измерители добротности.

Любой измеритель добротности (рис.11.1) состоит из генератора высокой частоты Γ , измерительного контура и индикатора резонанса – электронного вольтметра Q . Генератор позволяет устанавливать нужное значение частоты по шкале. Измерительный контур образуется исследуемой L_x или вспомогательной (образцовой) катушкой и образцовым конденсатором $C_{обр}$ с градуированной шкалой. В измерительный контур через делитель напряжения вводят последовательно небольшую известную часть u_1 выходного напряжения генератора u_2 .

На образцовом конденсаторе возникает напряжение u_2 :

$$u_2 \approx \frac{u_1}{1 - \omega^2 L_x C_{обр} + j\omega C_{обр} R_x}. \quad (11.2)$$

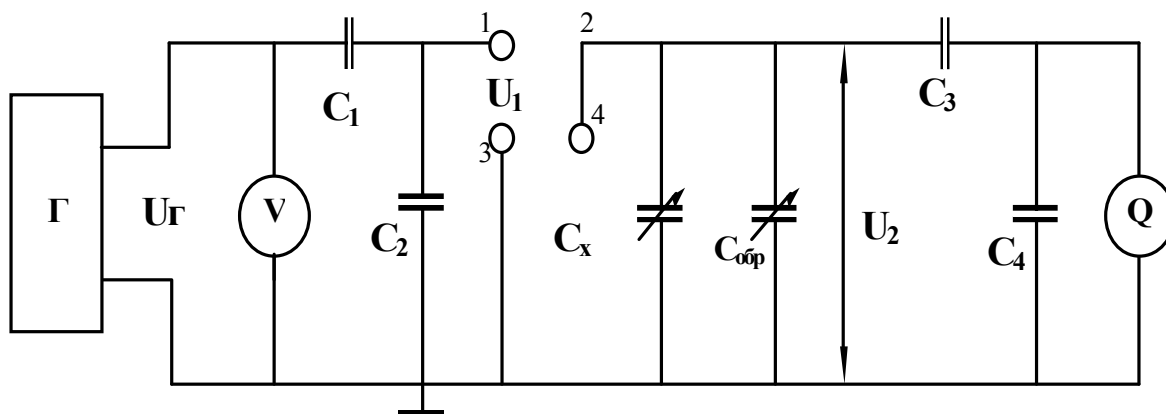


Рис.11.1. Схема измерителя добротности

Наибольшее напряжение на конденсаторе будет в том случае, когда знаменатель выражения (11.2) станет минимальным. Это условие выполняется при емкости

$$C_m = \frac{L}{r^2 + \omega^2 L^2} \approx \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (11.3)$$

Отношение $\frac{u_2}{u_1}$ будет иметь максимальное значение, когда $C_m \approx \frac{1}{\omega^2 L}$:

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \frac{1}{\omega C_{обр} R_x} = \frac{\omega L_x}{R_x} = Q_x. \quad (11.4)$$

Таким образом, если входное напряжение u_1 поддерживать во время измерений постоянным, то шкалу индикатора резонанса можно отградуировать непосредственно в единицах добротности Q , поэтому измерители добротности часто называют куметрами. Применяя куметр, путем вычислений можно определить индуктивность, емкость, сопротивление потерь, полные сопротивления двухполюсников, затухания и волновое сопротивление коаксиального кабеля. При измерении отсчет производят только в момент резонанса, на шкалах куметра получают связанные друг с другом значения: f – частоты генератора, $C_{обр}$ – емкости образцового конденсатора и Q – добротности.

Любой двухполюсник можно представить одной из эквивалентных схем, приведенных на рис.11.2. Если измерения емкости и индуктивности куметром не вызывают особого труда, то измерения параметров двухполюсников имеют некоторые особенности.

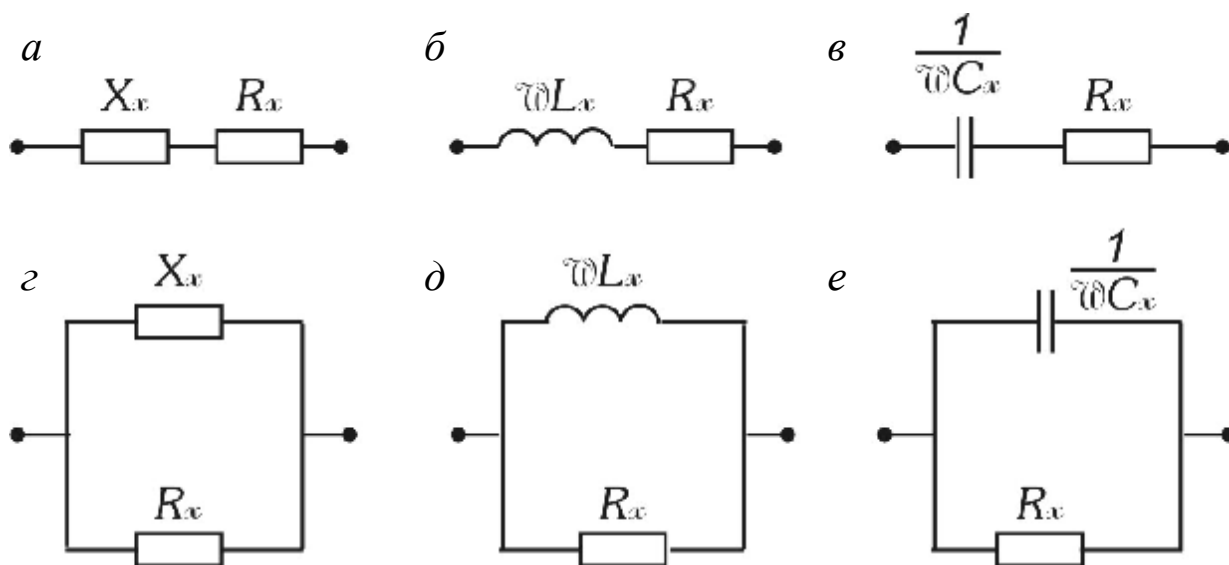


Рис.11.2. Эквивалентные схемы двухполюсников

Последовательные двухполюсники (рис.11.2, а, б, в) соответствуют малым реактивным сопротивлениям, т.е. большим емкостям, малым индуктивностям и активным сопротивлениям; параллельные (рис.11.2, г, д, е) – малым емкостям, большим индуктивностям и активным сопротивлениям. Последовательные двухполюсники подключают соответственно со вспомогательной катушкой индуктивности (см. рис.11.1), параллельные - к зажимам 3, 4, параллельно образцовому конденсатору.

11.2. Мостовой метод

Для измерения индуктивностей и емкостей используют мосты переменного тока. Мост переменного тока состоит из четырех двухполюсников с полными сопротивлениями $\dot{Z}$ (рис.11.3).

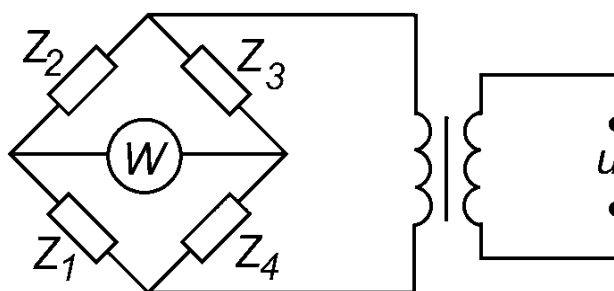


Рис.11.3. Схема моста переменного тока

В одну диагональ моста включают источник переменного напряжения (генератор низкой частоты) U , в другую – нулевой индикатор переменного напряжения I . В качестве нулевых индикаторов применяют избирательные вольтметры, индикаторы с электронно-лучевой трубкой или головные телефоны.

Равновесие моста достигается при условии равенства произведений комплексных сопротивлений противоположных плеч:

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_4 . \quad (11.5)$$

Это условие можно представить иначе, подставив в формулу (11.5) выражения полных сопротивлений в показательной форме:

$$|\dot{Z}_1|e^{j\varphi_1} \cdot |\dot{Z}_3|e^{j\varphi_3} = |\dot{Z}_2|e^{j\varphi_2} \cdot |\dot{Z}_4|e^{j\varphi_4} . \quad (11.6)$$

Равенство (11.6) распадается на два условия равновесия:

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_1| \cdot |\dot{Z}_3| &= |\dot{Z}_2| \cdot |\dot{Z}_4| , \\ \varphi_1 + \varphi_3 &= \varphi_2 + \varphi_4 . \end{aligned} \quad (11.7)$$

Отсюда следует, что мост переменного тока нужно уравнивать регулировкой активной и реактивной составляющих плеч, т.е. равновесие осуществляется по модулям и по фазам. Нужно иметь в виду, что

при изменении значений активных и реактивных составляющих одновременно изменяются и модуль, и фаза, поэтому мост переменного тока можно привести в равновесие лишь методом последовательных приближений к нулевому показанию индикатора.

Для убыстрения процесса измерения характеристик элементов электрических цепей с сосредоточенными параметрами и для повышения точности измерений разработаны и широко используются автоматические мосты с цифровым отсчетом результата измерения в соответствующих единицах измеряемой величины.

Уравновешивание моста переменного тока достигается регулировкой двух органов. Сигналы управления формируются из напряжения разбаланса двумя фазовыми детекторами, знаки выходных сигналов которых определяют направление изменения регулировок. Реализация процесса уравновешивания зависит от схемы моста. В мостах, плечи которых состоят из двухполюсников, регулируются сопротивления, а в трансформаторных мостах – число витков. Одна из возможных структурных схем автоматического моста переменного тока приведена на рис.11.4.

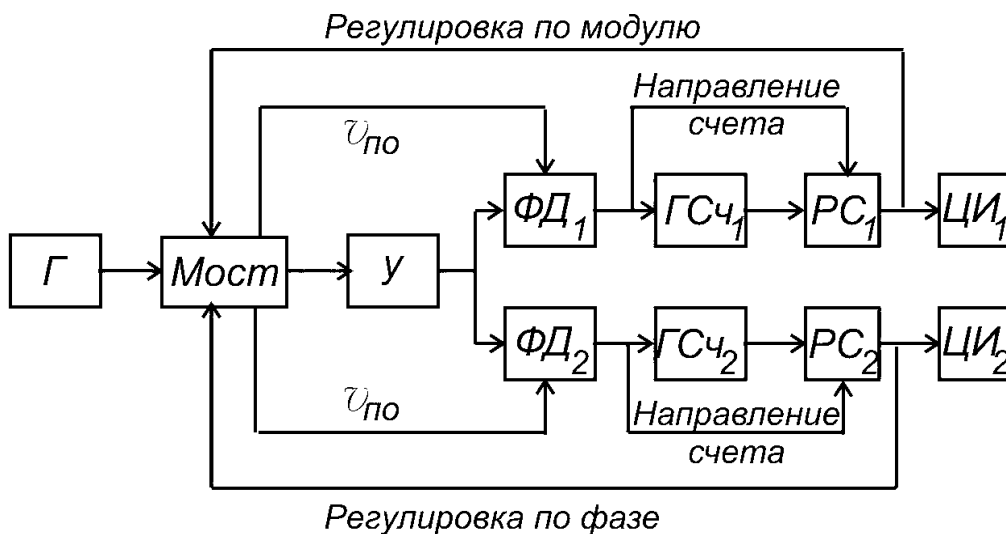


Рис.11.4. Схема автоматического моста переменного тока с цифровой индикацией по модулю и фазе

Автоматическая регулировка осуществляется реверсивными счетчиками РС, управляемыми генераторами счетных импульсов ГСЧ, частота которых изменяется пропорционально напряжению разбаланса, которое получается на выходах двух фазочувствительных детекторов ФД. Направление счета определяется знаком напряжения разбаланса. По мере приближения к состоянию равновесия напряжение разбаланса уменьшается и скорость уравновешивания замедляется. Процесс уравновешивания прекращается, когда напряжение разбаланса уменьшается до значения, соответствующего отклонению регулиру-

щего органа от состояния равновесия на 0,5 единицы младшего разряда цифрового индикатора ЦИ. Результат измерения представляет собой число импульсов, прошедших через реверсивные счетчики за время уравнивания. Мост питается напряжением генератора Г; для повышения чувствительности напряжение разбаланса усиливается усилителем У. Время измерения составляет 0,03-2 с; погрешность – 0,1-0,2 %.

Описание лабораторной работы № 11 «Измерения угла диэлектрических потерь»

1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с приборами и методами измерений угла диэлектрических потерь; получить навыки работы с приборами.

2. Описание лабораторной установки

2.1. Лабораторная установка состоит из стандартных измерительных приборов и лабораторных макетов.

2.2. Исследуемыми приборами являются: цифровой автоматический мост переменного тока Р591 для измерения индуктивностей и тангенса угла потерь, измеритель добротности Е4-11.

2.3. Лабораторные макеты состоят из набора индуктивностей и емкостей.

3. Программа работы

3.1. Изучение резонансных методов и использующих их приборов для измерения L , C , Q , $\operatorname{tg}\delta$. Проведение измерений с помощью куметра.

3.1.1. Измерение куметром Е4-11 добротности, индуктивности, емкости катушек индуктивности. Все измерения производить не менее трех раз:

- 1) произвести измерения добротности катушек индуктивности № 1, № 2, № 3 соответственно на частотах 32, 100 и 150 МГц. Рассчитать тангенс угла потерь: $\operatorname{tg}\delta=1/Q$. Данные занести в табл. 11.1;
- 2) рассчитать индуктивности и емкости катушек по соответствующим формулам. Результаты занести в табл. 11.1;
- 3) провести измерения добротности катушек № 1, № 2, № 3 методом расстройки и рассчитать индуктивности катушек. Рассчитать тангенс угла потерь. Данные занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Измерения параметров катушек индуктивности

Номер катушки	Прямой резонансный метод				Резонансный метод с применением расстройки контура			
	$\bar{Q} \pm \Delta Q$	$\overline{tg\delta}$	$\bar{L}_x \pm \Delta L_x$, мкГн	C_0 , пФ	$\bar{Q} \pm \Delta Q$	$\overline{tg\delta}$	C_1 , пФ	C_2 , пФ
1								
2								
3								

3.1.2. Измерение куметром Е4-11 емкости конденсаторов. Измерения емкости одного конденсатора повторить три раза:

- 1) измерить емкости предложенных преподавателем конденсаторов на трех различных частотах: 32, 100 и 150 МГц, используя соответственно три вспомогательные катушки № 1, № 2 и № 3;
- 2) рассчитать тангенс угла потерь. Полученные данные занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Измерения параметров конденсаторов

Конденсаторы	Част. генер., МГц	$\bar{C}_{обp1} \pm \Delta C$, пФ	$\overline{tg\delta}_1 \pm \Delta tg\delta_1$	$\bar{C}_{обp2} \pm \Delta C$, пФ	$\overline{tg\delta}_2 \pm \Delta tg\delta_2$	$\bar{C}_x \pm \Delta C$, пФ
№ 1	32					
	100					
	150					
№ 2	32					
	100					
	150					
№ 3	32					
	100					
	150					

3.1.3. Определение параметров предложенного преподавателем двухполюсника.

3.2. Изучение мостовых методов измерения L , C , Q , $\operatorname{tg} \delta$.

Провести измерения индуктивности и тангенса угла потерь предложенных дросселей с помощью моста переменного тока Р591. Рассчитать их добротности. Данные занести в табл. 11.3.

3.3. Обработка экспериментальных результатов с помощью методов математической статистики.

Таблица 11.3

Измерения параметров катушек индуктивности мостовым методом

Катушки индуктивности	$\bar{L} \pm \Delta L$, мкГн	$\overline{\operatorname{tg} \delta} \pm \Delta \operatorname{tg} \delta$	$\bar{Q}$
L_{x1}			
L_{x2}			
L_{x3}			
L_{x4}			
L_{x5}			

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. Подготовка к проведению измерений на куметре Е4-11. После 30-минутного прогрева прибор Е4-11 готов к работе. Проведите установку нуля прибора, для чего установите:

- переключатель " ΔQ - Q " в положение " Q ";
- переключатель "ПРЕДЕЛЫ Q " в положение "НУЛЬ Q ";
- ручкой установки нуля "НУЛЬ Q " стрелку измерительного прибора – на риску "0" шкалы " Q ";

Проведите калибровку прибора, для чего установите:

- переключатель "ПРЕДЕЛЫ Q " в положение "КАЛИБР Q ";
- переключатель поддиапазонов генератора – на требуемый поддиапазон;
- ручкой "Част. МГц" – требуемую частоту генератора;
- ручкой "КАЛИБР $Q \nabla$ " – стрелку прибора измерительного точно на риску под знаком " ∇ ".

4.2. К п.3.1.1.

Измерение добротности, индуктивности, емкости катушек индуктивности произведите следующим образом:

- подключите измеряемый объект (катушки № 1, № 2, № 3) к клеммам L_x ;

- произведите установку нуля и калибровку прибора при измерении параметров катушек индуктивности № 1, № 2, № 3 соответственно при частоте 32, 100 и 150 МГц;
- поставьте переключатель "ПРЕДЕЛЫ Q " в положение "30";
- настройте контур в резонанс. Глубокая настройка в резонанс осуществляется нажатием кнопки включения электрического привода измерительного конденсатора " $\updownarrow$ ". Точечная настройка производится ручкой "ЕМКОСТЬ pF". При необходимости переключите "ПРЕДЕЛЫ Q " на более грубые диапазоны. Момент настройки измеряемого объекта в резонанс соответствует максимальному отклонению стрелки измерительного прибора;
- отсчитайте добротность Q по шкале измерительного прибора и емкость C_1 , соответствующую моменту резонанса;
- определите индуктивность катушек № 1 и № 2 по номограмме, расположенной на верхней крышке прибора. Индуктивность L катушки № 3 рассчитайте по формуле, исходя из условий резонанса;
- увеличьте частоту генератора в $n = \sqrt{2}$ раз и настройте контур в резонанс, запишите емкость C_2 . Емкость катушки C_0 определите по следующей формуле:

$$C_0 = \frac{C_1 - n^2 C_2}{n^2 - 1}. \quad (11.8)$$

4.3. К п.3.1.1.

Измерение добротности методом расстройки контура по емкости производите следующим образом:

- подключите ее к клеммам L_x ;
- настройте контур на резонанс измерительным конденсатором и произведите отсчет добротности Q по шкале прибора и емкости C_0 по шкале измерительного конденсатора;
- расстройте контур ручкой "ЕМКОСТЬ pF", уменьшив показания измерительного прибора до уровня 0,707 от значений измеренной добротности. Эту операцию проделайте дважды: при расстройке как в сторону больших, так и малых емкостей, и произведите при этом отсчет емкостей C_1 и C_2 .

Добротность измеряемого объекта определяется по формуле

$$Q = \frac{2C_0}{C_1 - C_2}, \quad (11.9)$$

где $C_1 > C_2$.

4.4. К п.3.1.2.

Если значение измеряемой емкости не выходит за пределы перекрытия ее образцовым конденсатором, то установив $C_{обр1}$ вблизи максимального значения, изменяя частоту генератора, настраивают контур в резонанс, например, с катушкой L_1 . Затем параллельно образцовому конденсатору к зажимам C_x подключают измеряемый конденсатор и не меняя частоты генератора, настраивают контур в резонанс изменением емкости образцового конденсатора. Записывают значение $C_{обр2}$. Неизвестная емкость определяется следующим образом:

$$C_x = C_{обр1} - C_{обр2} \quad (11.10)$$

Если емкость измеряемого конденсатора больше максимальной емкости образцового, то измеряемый конденсатор включают последовательно с вспомогательной катушкой индуктивности; контур настраивают в резонанс изменением частоты генератора при максимальном значении $C_{обр1}$. Затем измеряемый конденсатор отключают, вновь настраивают контур образцовым конденсатором на ту же частоту f ; записывают значение $C_{обр2}$. Измеряемая емкость

$$C_x = \frac{C_{обр1} \cdot C_{обр2}}{C_{обр1} - C_{обр2}} \quad (11.11)$$

4.5. К п.3.1.3.

Измерения полных сопротивлений двухполюсников могут проводиться как при параллельном, так и при последовательном подключении к измерительному контуру (подробно с методикой необходимо ознакомиться по книге: Кушнер Ф.В. Электрорадиоизмерения. Л.: Энергоатомиздат, 1983. С.266-267).

4.6. К п.3.3.

Расчет случайной погрешности измерений производить по формуле

$$\Delta X = t_s \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (11.12)$$

где $t_s = 4,3$ – коэффициент Стьюдента для трех измерений при доверительной вероятности 0.95.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.

- Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
- Структурная схема типового электронного осциллографа.
- 2. Теоретическая часть.
 - Методика проведения измерений.
 - Основные расчетные соотношения.
- 3. Экспериментальное исследование.
 - Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).
- 4. Оценка погрешности результатов исследования.
 - Методика расчета погрешности.
 - Анализ результатов измерений.
- Заключение.
- Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. В чем суть резонансного метода измерения индуктивности, добротности, емкости? Предложите способ непосредственного (без промежуточных вычислений) измерения емкости и индуктивности резонансным методом.

6.2. Как измерить емкость (индуктивность) куметром? Какие погрешности при этом необходимо учитывать?

6.3. Выведите формулу для напряжения на емкости (см. рис.11.1). В момент резонанса определите значение емкости образцового конденсатора.

6.4. Приведите методику и формулу для измерения параметров двухполюсников резонансным методом.

6.5. Напишите уравнение баланса моста переменного тока. Как им пользоваться при конструировании мостовых измерений емкости (индуктивности)?

6.6. Изобразите структурную схему куметра.

6.7. Изобразите структурную схему цифрового измерителя индуктивности (емкости).

12. Термочувствительные преобразователи

12.1. Термоэлектрические преобразователи

Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Зеебеком и заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) А и В, соединив их между собой концами (рис.12.1, а), причем температуру T_1 одного места соединения сделать отличной от температуры T_2 другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников.

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или иначе термопарой, проводники, составляющие термопару, – термоэлектродами, а места их соединения – спаями.

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников значение термоЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры вдоль проводников. Термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников.

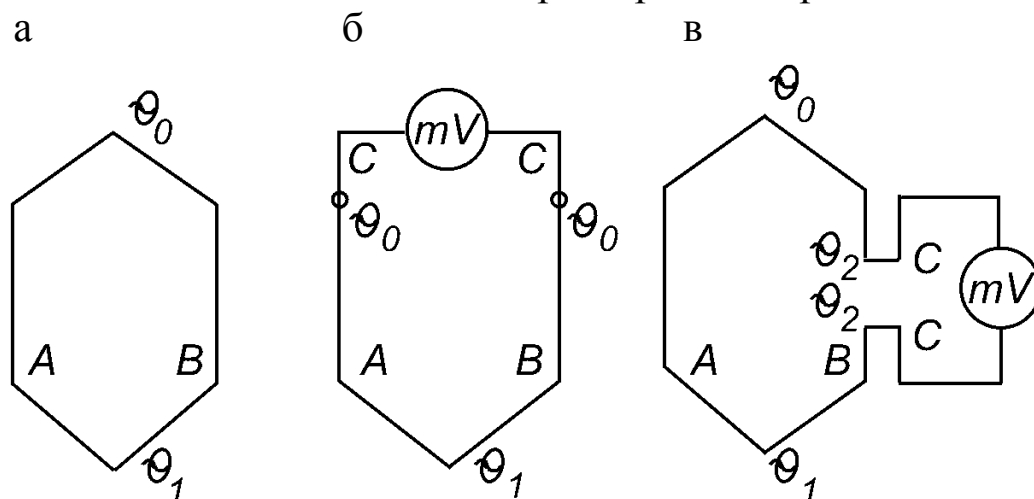


Рис.12.1. Термопары и способы подключения измерительных приборов

Можно разомкнуть контур в месте контактирования термоэлектродов А и В и вставить дополнительный проводник С между ними (рис. 12.1, б). Значение термоЭДС в этом случае определится как

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) = E_{AB}(T_1) + E_{BA}(T_0) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_0),$$

так как два любых проводника А и В имеют по отношению к третьему С термоЭДС E_{AC} и E_{BC} , то термоЭДС термопары $E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$.

Можно разорвать также один из термоэлектродов и вставить дополнительный проводник в место разрыва (рис.12.1, в). Значение термоЭДС в этом случае останется таким же. Действительно,

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BC}(T_2) + E_{CB}(T_2) + E_{BA}(T_0) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_0).$$

Таким образом, прибор для измерения термоЭДС может быть включен как между свободными концами термопары, так и в разрыв одного из термоэлектродов.

12.1.1. Материалы, применяемые для термопар

В табл.12.1 приведены термоЭДС, которые развиваются различными термоэлектродами в паре с платиной при температуре рабочего спая $T_1 = 100^\circ\text{C}$ и температуре свободных концов $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

Таблица 12.1

ТермоЭДС различных термоэлектродов в паре с платиновым термоэлектродом при $T_0 = 0^\circ\text{C}$

Материал	ТермоЭДС, мВ	Материал	ТермоЭДС, мВ
Хромель	+2.4	Свинец	+0.44
Молибден	+1.2	Алюминий	+0.40
Вольфрам	+0.8	Никель	-1.5
Манганин	+0.76	Алюмель	-1.7
Медь	+0.76	Константан	-3.4
Серебро	+0.72	Копель	-4.5

Зависимость термоЭДС от температуры в широком диапазоне температур обычно нелинейна, поэтому данные табл.12.1 нельзя распространить на более высокие температуры. В качестве примера в табл.12.2 приведены значения термоЭДС стандартных термопар для $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

12.1.2. Удлинительные термоэлектроды

Измерительные цепи

Свободные концы термопары должны находиться при постоянной температуре. Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды термопары настолько длинными и гибкими, чтобы ее свободные концы размещались в достаточном удалении от рабочего спая. Кроме того, при использовании благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно, поэтому приходится применять провода из другого материала. Соединительные провода, идущие от зажимов в головке термопары до сосуда, температура в котором поддерживается постоянной, называют удлинительными термоэлектродами. Далее для соединения с измерительным прибором можно использовать обычные провода.

Таблица 12.2

Основные значения термоЭДС стандартных термопар

Температура, °С	Медь-копель	Медь-медно-копель	Железо-медно-никель	Хромель-копель (ХК)	Никель-хром-медно-никель	Хромель-алюмель (ХА)	Платино-родий (10 %)- платиновая (ПП)	Платино-родий (30 %)- платино-родий (6 %), (ПР)	Вольфрам-рений (6 %)-воль- фрам-рений (20 %), (БР)
-200	-6.153	-5.603	-7.890	-	-8.824	-5.892	-	-	-
-100	-3.715	-3.378	-4.632	-	-5.237	-3.553	-	-	-
0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
100	4.721	4.277	5.268	6.88	6.317	4.095	0.645	-	1.330
200	-	9.286	10.777	14.59	13.419	8.137	1.440	-	2.869
300	-	14.860	16.325	22.88	21.033	12.207	2.323	0.431	4.519
400	-	20.869	21.846	31.49	28.943	16.395	3.260	0.786	6.209
500	-	-	27.388	40.28	36.999	20.640	4.234	1.241	7.909
600	-	-	33.096	49.11	45.085	24.902	5.237	1.791	9.598
700	-	-	39.130	27.85	53.110	29.128	6.274	2.430	11.273
800	-	-	45.498	66.47	61.022	33.277	7.345	3.154	12.929
900	-	-	51.875	-	68.783	37.325	8.448	3.957	14.556
1 000	-	-	-	-	-	41.269	9.585	4.833	16.136
1 100	-	-	-	-	-	45.108	10.754	5.777	17.666
1 200	-	-	-	-	-	48.828	11.947	6.783	19.146
1 300	-	-	-	-	-	52.398	13.155	7.845	20.576
1 400	-	-	-	-	-	-	14.368	8.952	21.963
1 500	-	-	-	-	-	-	15.576	10.094	23.303
1 600	-	-	-	-	-	-	16.771	11.257	24.590
1 700	-	-	-	-	-	-	-	12.246	25.820
1 800	-	-	-	-	-	-	-	13.585	26.999
2 000	-	-	-	-	-	-	-	-	29.177
2 200	-	-	-	-	-	-	-	-	31.136
2 500	-	-	-	-	-	-	-	-	33.636

Для того чтобы при включении удлинительных термоэлектродов из материалов, отличных от материалов основных термоэлектродов, не изменилась термоЭДС термопары, необходимо выполнить два условия. Первое – места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным термоэлектродам в головке термопары должны иметь одинаковую температуру. И второе – удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны основной термопаре, т.е. иметь ту же термоЭДС в диапазоне возможных температур места соединения термоэлектродов в головке термопары (примерно в диапазоне от 0 до 200°C).

Для термопары платинородий–платина применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную термопаре платинородий–платина в пределах до 150°C. Для термопары хромель–алюмель удлинительные термоэлектроды изготавливаются из меди и константа. Для термопары хромель–копель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводов.

12.1.3. Погрешности при измерении температуры термопарами

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов, равной нулю. Если при практическом использовании термоэлектрического термометра температура свободных концов будет отличаться от 0°C на величину T_0 , то измеренная ЭДС будет меньше, и необходимо ввести соответствующую поправку в показания термометра.

Однако следует иметь в виду, что из-за нелинейной зависимости между термоЭДС и температурой рабочего спая поправка к показаниям указателя T' , градуированного непосредственно в градусах, не будет равна температуре T_0 свободных концов.

Для определения температуры необходимо воспользоваться градуировочной таблицей для данной термопары, определить ЭДС E как $E = E_{\text{изм}} + E(T_0)$ и затем по скорректированному таким образом значению E найти T .

В термоэлектрических термометрах для измерения термоЭДС применяют как обычные милливольтметры, так и потенциометры с ручным или автоматическим уравниванием на предел измерения до 100 мВ.

В тех случаях, когда термоЭДС измеряется милливольтметром, может возникнуть погрешность из-за изменения сопротивлений всех элементов, составляющих цепь термоЭДС.

12.2. Терморезисторы

Принцип действия термометров сопротивления основан на способности различных материалов изменять свое электрическое сопротивление

ние с изменением температуры. Для измерения температур используются терморезисторы из материалов, обладающих высокостабильным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), хорошей воспроизводимостью свойств и инертностью к воздействиям окружающей среды; к таким материалам в первую очередь относится платина. Благодаря своей дешевизне широко распространены медные терморезисторы.

Полупроводниковые терморезисторы (ПТР) отличаются от металлических меньшими габаритами и большими значениями ТЕС.

ТКС полупроводниковых терморезисторов отрицателен и уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры: $\alpha = \beta/T^2$. При 20°C ТКС составляет 0,02-0,08 K⁻¹.

Температурная зависимость сопротивления ПТР достаточно хорошо описывается формулой

$$R_T = Ae^{B/T},$$

где T - абсолютная температура;

A - коэффициент, имеющий размерность сопротивления;

B - коэффициент, имеющий размерность температуры.

Если для применяемого ПТР не известны коэффициенты A и B , но известны сопротивления R_1 и R_2 при T_1 и T_2 , то сопротивление и коэффициент B для любой другой температуры можно определить из соотношений

$$R_2 = R_1 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right) \right]; \quad B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}.$$

Недостатками полупроводниковых терморезисторов, существенно снижающими их эксплуатационные качества, являются нелинейность зависимости сопротивления от температуры и значительный разброс от образца к образцу как номинального сопротивления, так и постоянной B . Кроме того, диапазон рабочих температур ПТР значительно меньше -100 - +300°C, чем у термопар и платиновых термометров сопротивления.

12.3. Другие разновидности

Кроме широко распространенных и описанных выше термочувствительных термопреобразователей – термопар и терморезисторов - в последние годы в измерительных устройствах находят применение термочувствительные элементы, основанные на иных физических эффектах.

В высокоточных термометрах и вакуумметрах используются пьезорезонаторы, в преобразователях тепловых излучений – пироэлектрические преобразователи, в приборах температурного контроля – сегнетоэлектрические емкостные преобразователи. Для измерения сверхнизких температур и для измерения очень высоких температур разрабатывают-

ся термошумовые преобразователи, выходной величиной которых является ЭДС шума резистивных элементов.

Термодиоды и термотранзисторы находят применение в датчиках температуры, работающих в диапазоне от -80 до $+150^{\circ}\text{C}$. Верхняя граница температурного диапазона ограничивается тепловым пробоем p - n перехода. Нижняя граница температурного диапазона определяется уменьшением концентрации основных носителей.

Из элементарной теории транзисторов известно, что напряжение база - эмиттер ($U_{бэ}$) определяется следующим выражением:

$$U_{бэ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_k}{I_{о.н.}}, \quad (12.1)$$

(при условии, что отношение $I_k/I_{о.н.}$ гораздо больше единицы), где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – элементарный заряд; I_k – ток коллектора транзистора; $I_{о.н.}$ – обратный ток насыщения.

Если пара транзисторов подвергается одинаковому температурному воздействию окружающей среды (т.е. транзисторы находятся на одной и той же монокристаллической подложке), то можно представить уравнение (12.1) в виде

$$U_{бэ1} - U_{бэ2} = \Delta U_{бэ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{k1}}{I_{о.н.1}} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{k1}}{I_{о.н.2}}$$

или

$$\Delta U_{бэ} = \frac{kT}{q} \left[\ln \frac{I_{k1}}{I_{k2}} - \ln \frac{I_{о.н.1}}{I_{о.н.2}} \right]. \quad (12.2)$$

Но для хорошо согласованных транзисторов, подвергающихся одинаковому температурному воздействию, величина $I_{о.н.1}/I_{о.н.2}$ близка к единице, поэтому уравнение (12.2) можно преобразовать следующим образом:

$$\Delta U_{бэ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{k1}}{I_{k2}}. \quad (12.3)$$

Из анализа уравнения (12.3) видно, что измерение температуры возможно при использовании транзисторов, находящихся под одинаковым температурным воздействием.

Так как транзисторы одинаковы и расположены близко, то при изменении температуры их ток коллектора будет изменяться в равной степени, а $\Delta U_{бэ}$ будет пропорционально абсолютной температуре. При отношении значений коллекторного тока $I_{k1}/I_{k2}=3,2$ цифровой вольтметр на шкале 200 мВ будет показывать температуру в кельви-

нах. Реализовать такой термометр можно с помощью схемы, представленной на рис.12.2.

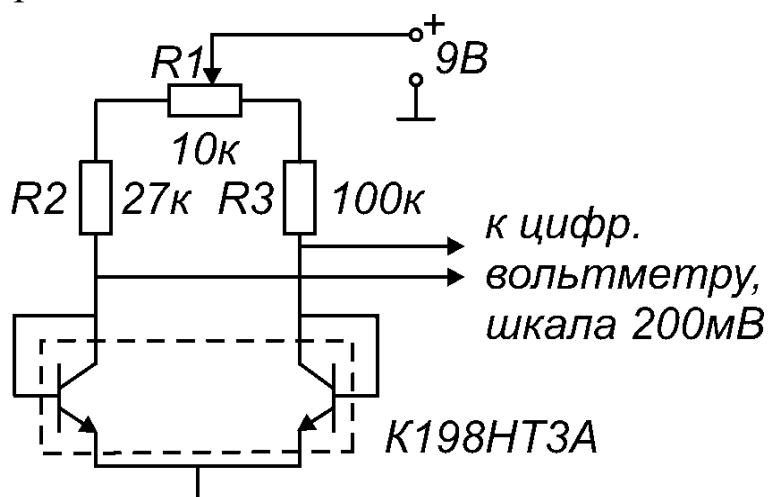


Рис.12.2. Электронный датчик температуры

Калибровка датчика проста. Его помещают в среду с температурой $+20^{\circ}\text{C}$ и подстроечным резистором $R1$ устанавливают на цифровом табло 29,3 мВ ($20^{\circ}\text{C}=293\text{ K}$). Этот датчик позволяет получать точность $\pm 1\text{ K}$ в температурных пределах $-55 - +125^{\circ}\text{C}$.

Описание лабораторной работы № 12 «Термочувствительные преобразователи»

1. Цель работы

1.1. Изучение теории и работы термоэлектрических преобразователей, их типов, способов измерения термоЭДС и градуировки термопар. Ознакомление с принципами построения приборов для контроля и регулирования температуры, использующих в качестве датчиков термопары.

1.2. Изучение принципов действия термометров сопротивления. Исследование характеристик полупроводниковых термосопротивлений.

1.3. Изучение возможности использования полупроводниковых приборов в качестве термочувствительных преобразователей.

2. Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки представлена на рис.12.3. Установка состоит из нагревательной печи сопротивления R_m блока питания ($\sim 36\text{ В}$); системы регулирования температуры, в которую

входят тиристорный ключ, электронный регулятор температуры Щ4530, термопара хромель-алюмелевая. В качестве исследуемых

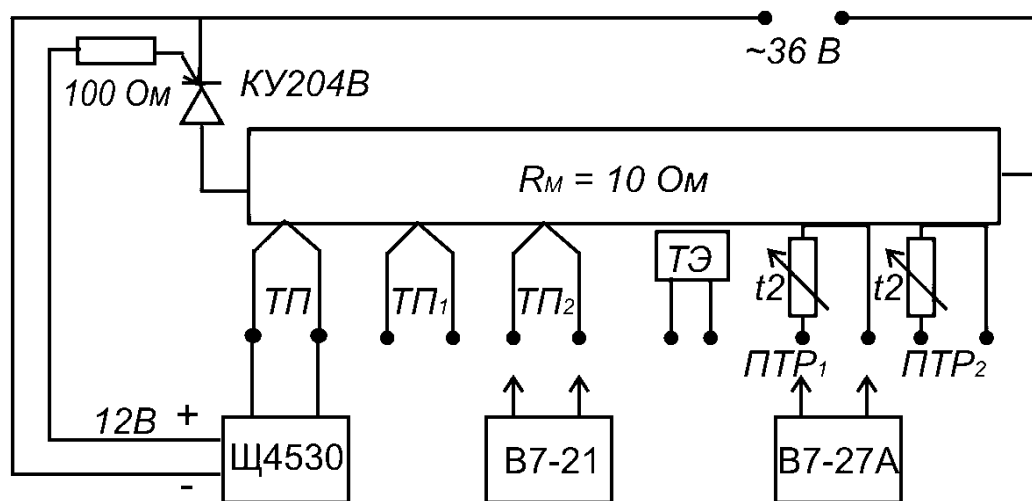


Рис.12.3. Схема лабораторной установки

термочувствительных преобразователей используются термопара (ТП), полупроводниковый терморезистор (ПТР), транзисторная сборка (ТС) К198НТ3А. Регистрирующими приборами являются цифровые вольтметры В7-35 и В7-27А.

2.1. Порядок включения установки.

- 2.1.1. Установите нулевое значение на электронном регуляторе Щ4530.
- 2.1.2. Подключите термопару к зажимам вольтметра В7-35. Переключатель переведите в положение измерения напряжений.
- 2.1.3. Терморезистор подсоедините к вольтметру В7-27А. Переключатель переведите в положение измерения сопротивлений.
- 2.1.4. Подключите вольтметры, блок питания установки, электронный регулятор к сети переменного тока ~ 220 В.

3. Программа работы

3.1. Изучение термоэлектрических преобразователей.

- 3.1.1. Произведите градуировку неизвестной термопары измерения (не менее трех раз через каждые 10°C до 150°C).
- 3.1.2. Постройте градуировочную кривую термопары. В каждой измеренной точке определите абсолютную чувствитель-

ность термопары. Идентифицируйте термопару. Экспериментальные и расчетные данные внести в табл.12.3.

Таблица 12.3

Градуировка термопары

Заданная температура в печи (по Щ4530) T , °C	$E_{\text{изм}}$, мВ	$\bar{E} \pm \Delta E$, мВ	Истинная температура в печи $T_{\text{ист}}$, °C	Чувствительность, мВ·град ⁻¹

3.2. Измерения температуры с помощью полупроводниковых терморезисторов.

3.2.1. Проведите измерения сопротивления терморезистора при комнатной температуре. Поместите терморезистор с термопарой в печь. За изменением сопротивления терморезистора наблюдайте через каждые 10°C до 150°C. Значения для режимов "нагрев" и "охлаждение" усреднить.

3.2.2. Определите значения коэффициентов А и В для пяти пар температур. Данные занесите в табл.12.4.

Таблица 12.4

Параметры полупроводникового терморезистора

Истинная температура в печи $T_{\text{ист}}$, °C	$R_{\text{изм}}$, Ом	А, Ом	В, К	Чувствительность, Ом·град ⁻¹

3.2.3. Постройте температурные зависимости $R(T)$, $B(T)$.

3.2.4. Проведите измерения постоянной времени τ для исследуемых терморезисторов во время нагрева, считая термопару безынерционным датчиком.

3.2.5. Определите дифференциальную чувствительность терморезистора при 50, 80 и 100°C.

3.3. Измерения температуры с помощью дифференциальной пары транзисторов.

3.3.1. Подключите, как показано на рис.12.3, цифровой вольтметр к коллекторам транзисторов. Если нужно, подкорректируйте калибровку прибора с помощью потенциометра R1. Показания вольтметра В17-21 на шкале 1В должны равняться 29,3 мВ при $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$.

3.3.2. Поместите транзисторную сборку вблизи термопары терморегулятора внутри печи. Снимите показания вольтметра через каждые 10°C в пределах от 30 до 120°C . Постройте зависимость $u = f(T)$, где T – абсолютная температура. Определите чувствительность электронного термометра и его постоянную времени.

4. Методические указания по выполнению работы

4.1. При проведении экспериментов на лабораторной установке не поднимайте температуру в печи выше 150°C . Термопара регулятора во время нагрева должна находиться внутри печи, в противном случае установка может выйти из строя. Выбор термопары и терморезистора для градуировки определяется преподавателем.

4.2. К п.п.3.1 и 3.2.

Пункты 3.1.1 и 3.2.1 можно выполнять одновременно.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП УГТУ-УПИ 1.96.

5.2. Структура отчета.

Название и цель работы

1. Описание экспериментальной установки.

- Краткая теоретическая характеристика приборов, используемых в работе.
- Структурная схема типового электронного осциллографа.

2. Теоретическая часть.

- Методика проведения измерений.
- Основные расчетные соотношения.

3. Экспериментальное исследование.

- Таблицы результатов эксперимента (ГОСТ 2.105-81).

4. Оценка погрешности результатов исследования.

- Методика расчета погрешности.
- Анализ результатов измерений.

Заключение.

Список использованных источников.

6. Контрольные вопросы

6.1. Для какого температурного диапазона устанавливается международная температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)?

6.2. Будет ли изменяться термоЭДС термоэлектрического термометра типа ХК, К и S при изменении температуры рабочего конца, но при сохранении разности температур рабочего конца и свободных концов, например E (300, 50°C) и E (600, 350°C)?

6.3. Изобразить, каким образом будет изменяться зависимость термоЭДС термопары типа К от температуры T при $T_{01}=0$, $T_{02}=50^\circ\text{C}$, $T_{03}=200^\circ\text{C}$.

6.4. Рассчитать погрешность измерения температуры термопарой ХК милливольтметром, если в качестве удлинительных проводов используются медные, а температура рабочего спая и температура места присоединения к термопаре удлинительных проводов равны соответственно 500 и 100°C.

6.5. Каким образом вводят поправку на температуру свободных концов термопары при определении температуры объекта?

6.6. Изобразить семейство вольт-амперных характеристик ПТР при различных его температурах.

6.7. Назвать основные недостатки и преимущества ПТР в сравнении с термопарами.

6.8. Как изменяется сопротивление медных и платиновых термометров сопротивления в зависимости от температуры (качественно)?

6.9. Какие физические эффекты могут быть использованы для измерения температуры?

Библиографический список

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
2. Выборнов В.И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Metallurgy, 1985. 256 с.
3. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
4. Ермолов И.Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М.: Московский горный институт. 1967. 267 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В.Б.Клюева. М.: Машиностроение, 1986. Ч.2. 351 с.
6. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 460 с.
7. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
8. Электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. А.В. Фремке и Е.М. Душина. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1980. 392 с.
9. Атамальян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. М.: Высшая школа, 1982. 220 с.
10. Справочник по радиоизмерительным приборам. Т.3. Измерение электромагнитных полей. Анализ спектра. Осциллография. Импульсные измерения / Под ред. В.С. Насонова. М.: Сов. радио, 1979.
11. Справочник по радиоизмерительным приборам. Т.1. Измерение напряжений, параметров элементов и цепей. Источники питания / Под ред. В.С. Насонова. М.: Сов. радио, 1979.
12. Эссаулова И.А., Блохина М.Е., Гонцов Л.Д. Руководство к лабораторным работам по физике. М.: Высшая школа, 1983. 159 с.
13. Ушкова В.И., Кортон В.С. Метрологическое обеспечение УИРС, лабораторных, курсовых и дипломных работ: Методические указания. Свердловск: УПИ, 1988. 23 с.
14. Драксел. Р. Основы электроизмерительной техники. М.: Энергоиздат, 1982. 296 с.
15. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергоатомиздат, 1984. 232 с.

16. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи). Л.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
17. Куин Т. Температура. М.: Мир, 1985. 448 с.
18. Линавеч Ф. Измерения температур в технике: Справочник. М.: Металлургия, 1980.
19. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. М.: Энергоатомиздат, 1984. 220 с.
20. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под общ. ред. Р.В. Бычковского. Львов: Вища школа, 1978. 20 с.
21. Кар. Дж. Проектирование и изготовление электронной аппаратуры. М.: Мир, 1960. 398 с.

Учебное издание

Бирюков Дмитрий Юрьевич
Зацепин Анатолий Федорович
Сюрдо Александр Иванович

**АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Редактор издательства – И.Г. Южакова
Компьютерные верстка и дизайн
И.В. Дубровской, Т.Н. Хисамиевой
Корректор – М.Ю. Петров

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать 11.06.2003	Формат 60x84 1/16
Бумага типографская	Офсетная печать
Уч.-изд.л. 6,9	Усл.печ.л. 7,38
Тираж 100	Заказ
	Цена "С"

Издательство ГОУ УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ ГОУ УГТУ-УПИ,
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19