

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

Д.Ю. Бирюков А.И. Сюрдо

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебно-методические указания к
лабораторному практикуму

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

Екатеринбург
2012

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Б 64

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

Рецензенты: кафедра общей и молекулярной физики УрГУ

(зав. каф. проф. д-р физ.-мат. наук);

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

Б 64 Физические основы измерений / Д.Ю. Бирюков, А.И. Сюрдо.
Екатеринбург: УрФУ, 2012. 57 с.

ISBN

Учебно-методические указания по курсу «Физические основы измерений» рассчитаны на студентов специальностей 200503 – 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. В конце каждого раздела приведено описание лабораторных работ, посвященных пьезоэлектрическим и тепловым преобразователям.

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

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Подготовлено кафедрой "Физические методы и приборы контроля качества".

ISBN

© ГОУ ВПО "Уральский федеральный университет", 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. СВОЙСТВА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ..	5
1.1. Мертвая зона.....	5
1.2. Точка выхода луча.....	8
1.3. Угол ввода луча	8
1.4. Разрешающая способность	9
Описание лабораторной работы № 1 «Изучение пьезоэлектрических преобразователей»	9
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН	15
2.1. Скорость распространения ультразвуковых колебаний	15
2.2. Методы измерения скорости распространения продольных и поперечных колебаний.....	17
Описание лабораторной работы №2 «Измерение скорости распространения ультразвука в твердых телах»	19
3. ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В МАТЕРИАЛАХ	27
3.1. Причины затухания	27
3.2. Звуковое поле дискового излучателя.....	28
2.3. Метод определения коэффициента затухания	30
Описание лабораторной работы № 3 «Измерение затухания ультразвука в материалах»	31
4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ.....	36
4.1. Понятие коэффициента преобразования	36
Описание лабораторной работы № 4 «Измерение коэффициента пьезоэлектрического преобразования»	38
5. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	44
5.1. Термоэлектрические преобразователи	44
5.2. Терморезисторы	47
5.3. Другие разновидности	48
Описание лабораторной работы № 5 «Термочувствительные преобразователи»	50
Библиографический список.....	55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящие учебно-методические указания содержит основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также описание методов измерений.

Учебно-методические указания рассчитаны на студентов специальности 200503 – Стандартизация и сертификация в приборостроении слушающих курс «Физические основы измерений». В конце каждого раздела приведено описание работ к лабораторному практикуму по данному курсу. 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, 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 средств измерений; четко представлять физику процессов, происходящих в преобразователях физических величин; уметь использовать ЭВМ для расчетов и обработки результатов измерений.

1. СВОЙСТВА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Достоверность работы пьезоэлектрических преобразователей зависит от их основных параметров. 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.

1.1. 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

$$T = \frac{2H}{C_l}; \quad (1.1)$$

– для наклонного искателя

$$T = \frac{2H}{C_t \cos \alpha} + 2t_{\Pi}, \quad (1.2)$$

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.

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

– для прямых искателей

$$M_{\min} = [(\tau + \tau_y)/2]C_l, \quad (1.3)$$

– для наклонных искателей

$$M_{\min} = [(\tau + \tau_y - 2t_{\Pi})/2]C_t \cos \alpha. \quad (1.4)$$

Из выражений (1.3) и (1.4) 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 величине, 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.

1.2. 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°.

1.3. 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.

1.4. 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 № 1 «Изучение пьезоэлектрических преобразователей»

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.

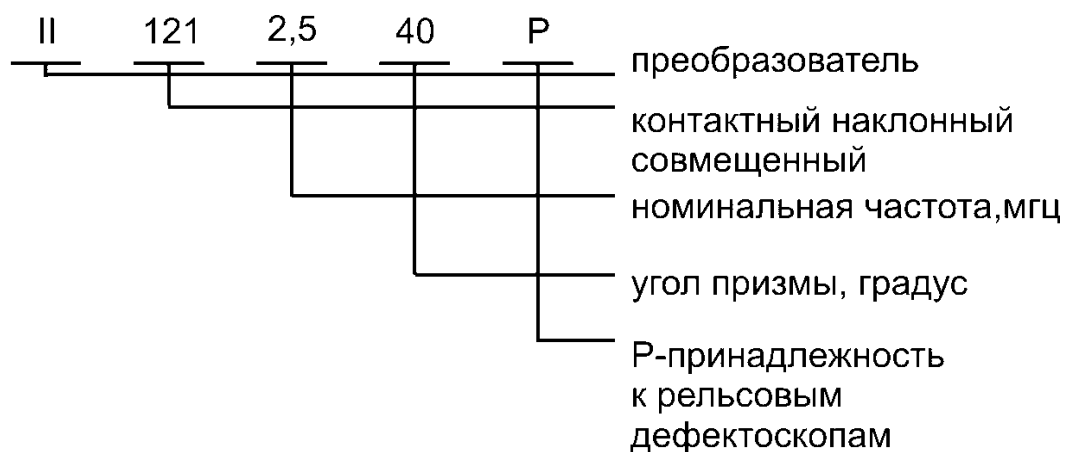


Рис.1.1. Обозначения наклонных преобразователей

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 акустических измерений?

6.2. Поясните по функциональной схеме принцип действия пьезопреобразователя.

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. Изложите способ измерения толщины.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

2.1. 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 :

$$C_l = \sqrt{E(1-\nu)/[\rho(1+\nu)(1-2\nu)]}. \quad (2.1)$$

Скорость поперечных волн определяется модулем сдвига G и плотностью среды:

$$C_t = \sqrt{G/\rho}. \quad (2.2)$$

Коэффициент Пуассона характеризует отношение констант объемной упругости и сдвига:

$$\nu = E/2G - 1. \quad (2.3)$$

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.

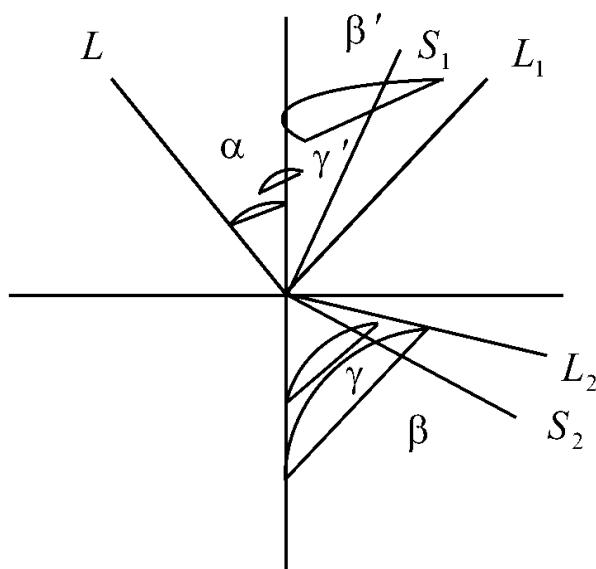


Рис.1.1. Отражение и преломление ультразвука на границе двух сред: L – падающая продольная волна; L₁, L₂ – отраженная и преломленная продольные волны; S₁, S₂ – отраженная и преломленная поперечные волны

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

$$\frac{\sin \alpha}{C_{l1}} = \frac{\sin \beta'}{C_{l1}} = \frac{\sin \gamma'}{C_{t1}} = \frac{\sin \beta}{C_{l2}} = \frac{\sin \gamma}{C_{t2}}. \quad (2.4)$$

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 $\alpha_{кр.I} \approx 30^\circ$, $\alpha_{кр.II} \approx 51^\circ$.

2.2. Методы измерения скорости распространения продольных и поперечных колебаний

2.2.1. Определение скорости распространения продольных волн можно осуществить при нормальном вводе УЗ-сигнала, используя прямой пьезопреобразователь и плоскопараллельный образец (рис.2.2).

Очевидно, что $C_l = 2D/t$.

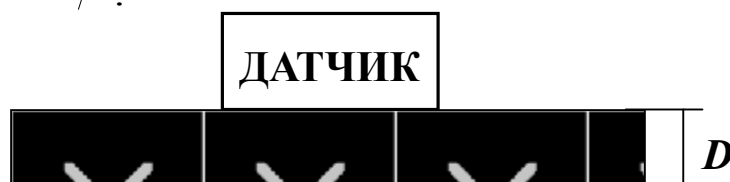


Рис.2.2. Схема распространения продольных волн

2.2.2. 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 (прямого угла образца) – рис.2.3.

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.2.3.

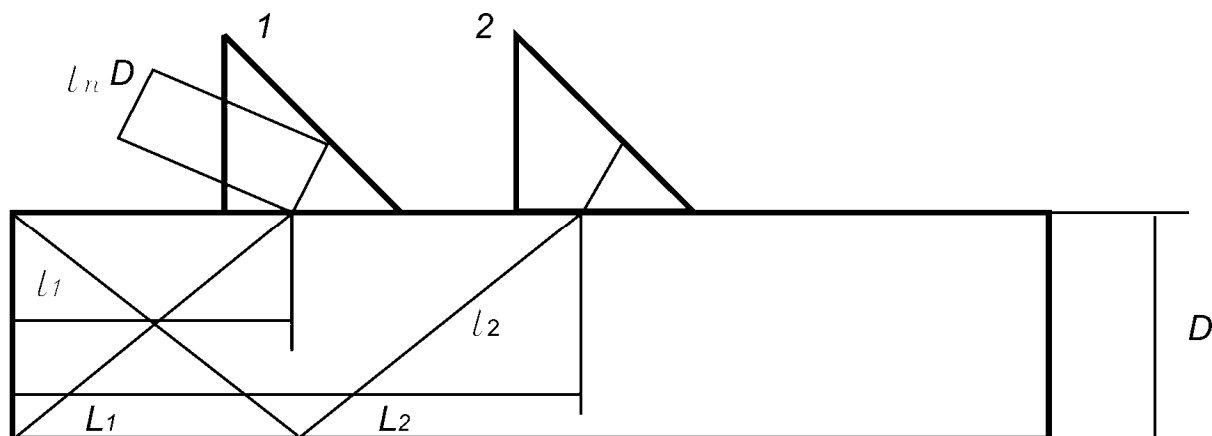


Рис.2.3. Схема распространения поперечных волн

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

$$t_1 = t_n + t_{обp.1} = 2l_n / C_l + 2L_1 / C_t, \quad (2.5)$$

$$t_2 = t_n + t_{обp.2} = 2l_n / C_l + 2L_2 / C_t, \quad (2.6)$$

где l_n – расстояние, проходимое импульсом в призме;

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

Вычитая (2.6) из (2.5), получим:

$$t_1 - t_2 = t_{обp.2} - t_{обp.1} = \frac{2(L_2 - L_1)}{C_t}. \quad (2.7)$$

Из формулы (2.7) 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.

Описание лабораторной работы №2 «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.2.5.

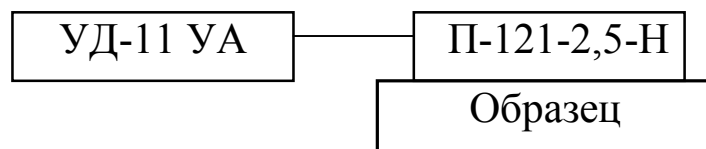


Рис.2.5. Схема лабораторной установки

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 2.1

Результаты измерения скорости распространения продольных волн

Материал	Тип пьезопреобразователя	Номер измерений	Время $t, 10^{-6} \text{ с}$	Толщина $D, \text{ м}$	Скорость распространения продольных волн $C_l, \text{ м/с}$
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 (2.9) и (2.10).

$$L_1 = \sqrt{D^2 + l_1^2}, \quad (2.9)$$

$$L_2 = 2\sqrt{D^2 + l_2^2/4}, \quad (2.10)$$

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.2.2.

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 2.2

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:

$$\bar{C}_t = 2(\bar{L}_2 - \bar{L}_1) / (\bar{t}_2 - \bar{t}_1). \quad (2.11)$$

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

3.8. Вычислить динамические упругие модули исследуемых материалов по формулам (2.12), (2.13), (2.14)

$$G = \rho \cdot \bar{C}_t^2, \quad (2.12)$$

$$E = \rho \cdot \bar{C}_t^2 \left(3 - 4 \bar{C}_t^2 / \bar{C}_l^2 \right) / \left(1 - \bar{C}_t^2 / \bar{C}_l^2 \right); \quad (2.13)$$

$$\nu = \left(\bar{C}_l^2 - 2 \bar{C}_t^2 \right) / \left(\bar{C}_l^2 - \bar{C}_t^2 \right), \quad (2.14)$$

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 2.3

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 обработки сигналов)	"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 :

$$\Theta^{HCP} = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial C}{\partial x} \cdot \Theta_i \right]^2}, \quad (2.15)$$

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 работы пьезопреобразователя.

6.2. Типы ультразвуковых колебаний.

6.3. Какой тип волн возбуждается прямым преобразователем?

6.4. Какой тип волн возбуждается наклонным преобразователем?

6.5. Какой тип волны имеет наибольшую скорость?

6.6. Характеристика упругих модулей твердого тела.

6.7. Методика измерения скорости звука продольных волн.

6.8. Методика измерения скорости звука поперечных волн.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В МАТЕРИАЛАХ

3.1. 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

$$U = U_0 e^{-j\omega t - kx}, \quad (3.1)$$

то с учетом затухания

$$U = U_0 e^{-\delta x} e^{-j\omega t - kx}, \quad (3.2)$$

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

$$U = U_0 (G/r) e^{-\delta x} e^{-j\omega t - kr}, \quad (3.3)$$

где G – размерный коэффициент, м.

В формуле (3.3) 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 .

3.2. 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. 3.1) с углом 2θ при вершине (дальняя зона, зона дифракции Фраунгофера).

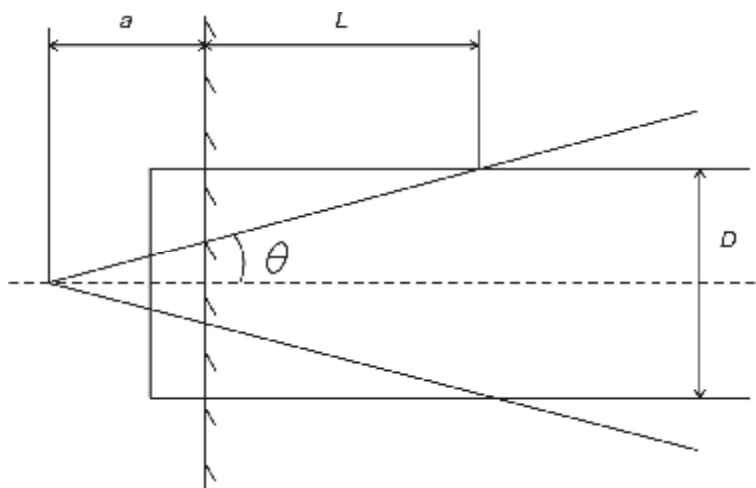


Рис.3.1. Звуковое поле дискового излучателя

Протяженность ближней зоны может быть определена по формуле

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4C}, \quad (3.4)$$

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.3.1.

Таблица 3.1

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

$$\sin \theta = 1,22 \lambda / D. \quad (3.5)$$

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 (3.3) принимает вид

$$U_1 = U_0 (G/r_1) e^{-\delta r_1} e^{-j\omega t_1 - kr_1}, \quad (3.6)$$

для расстояния r_2

$$U_2 = U_0 (G/r_2) e^{-\delta r_2} e^{-j\omega t_2 - kr_2}. \quad (3.7)$$

Разделив (3.6) на (3.7), имеем

$$U_1/U_2 = r_2/r_1 e^{\delta(r_2 - r_1)} \quad (3.8)$$

(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 (3.8):

$$U_1/U_2 \cdot r_1/r_2 = e^{\delta(r_2 - r_1)}; \ln(U_1/U_2) - \ln(r_1/r_2) = \delta(r_2 - r_1) \quad (3.9)$$

и окончательно получим

$$\delta = [\ln(U_1/U_2) - \ln(r_1/r_2)] / (r_2 - r_1). \quad (3.10)$$

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

$$\begin{aligned} r_1 &= 2a + 2A; \\ r_2 &= 2a + 2A + 2A = 2a + 4A; \\ r_2 - r_1 &= 2A, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где a – расстояние от поверхности до эффективного акустического центра - см. рис.3.1).

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 № 3 «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 3.2

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,

$$N, dB = 20 \lg U_1/U_2 = 20 / 2,3 \ln U_1/U_2, \quad (3.12)$$

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 (3.10) с учетом (3.12) и (3.11), 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?

4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

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

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

Передаточная функция совмещенного режима

$$K_{\text{ип}} = \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{и}}} \quad (4.1)$$

есть коэффициент преобразования ПП.

Параметр $U_{\text{п}}$ 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

$$\overline{K}_{\ell m} = \overline{K}_{\ell m}(j\omega) e^{-j\varphi(j\omega)}, \quad (4.2)$$

где $\overline{K}_{\ell m}(j\omega)$ и $\varphi(j\omega)$ – модуль и фаза передаточной функции; $K_{\ell m}$ – коэффициент преобразования, равный значению модуля на частоте максимального преобразования $\omega_{\ell m} = 2\pi f_{\ell m}$ 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.4.1, б. Для этого случая коэффициент двойного преобразования

$$\overline{K}_{uu} = \frac{\beta^2 (1 - \overline{R}_{12}^2)}{x \omega C_{\Pi}} \cdot \frac{(1 - a_1)^2 (1 - R_{13} a_1)^2}{(1 - \overline{R}_{12} \overline{R}_{13} a_1^2)^2} \cdot \frac{(Z_{\Pi} Y_{\mathfrak{Z}} + 1)^{-1} K_{FF}^2}{[Z_{\Pi} (1 + R_{\Gamma} Y_{\mathfrak{Z}}) + R_{\Gamma}]}, \quad (4.3)$$

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

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

β – коэффициент электромеханической связи.

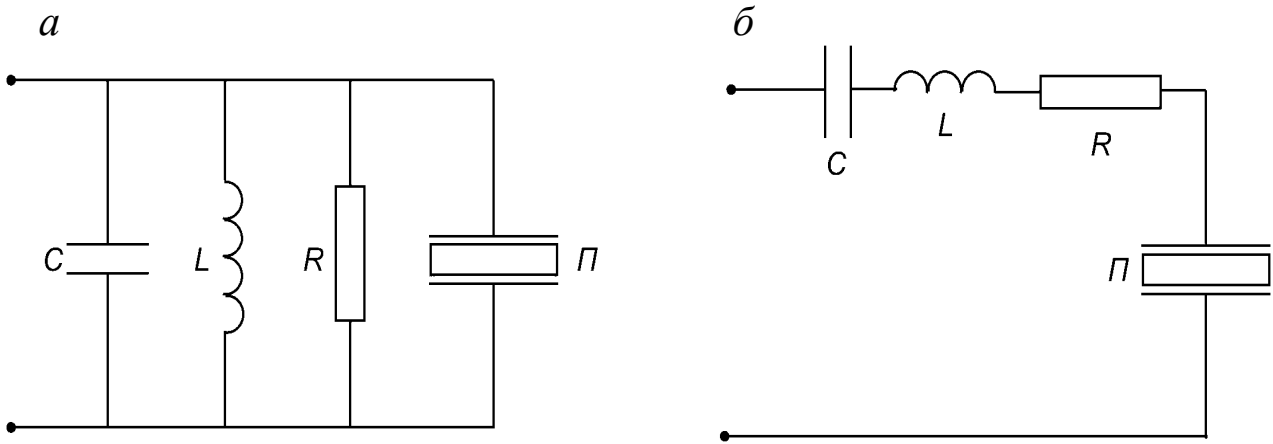


Рис.3.1. Схема включения преобразователей

В формуле (4.3) $a_1 = e^{-p\tau_1}$; $\tau_1 = \frac{l_1}{C_1} - l_1$ – 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 № 4 «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.

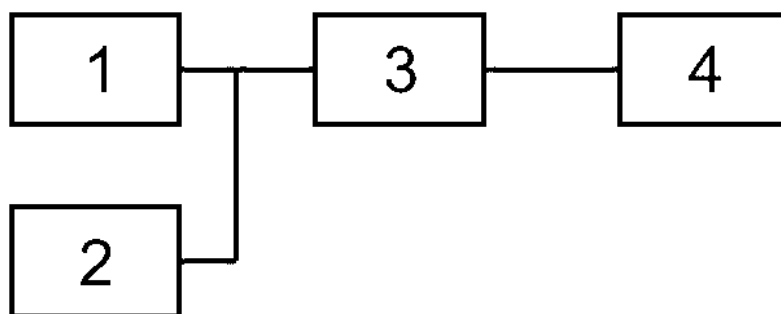
2. Описание лабораторной установки

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.4.2).



*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 4.1

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:

$$A = \frac{2\lambda \cdot r \cdot \exp(\delta r)}{S_a}, \quad (4.4)$$

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

$$t = \frac{2D}{C}, \quad (4.5)$$

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 $\sim 10^2 V$). 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 :

$$\theta^{исп} = K \sqrt{[(\partial K / \partial U_{\Pi}) \theta_{\Pi}]^2 + [(\partial K / \partial U_r) \theta_r]^2}, \quad (4.7)$$

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.

5. ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

5.1. 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.5.1, 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.

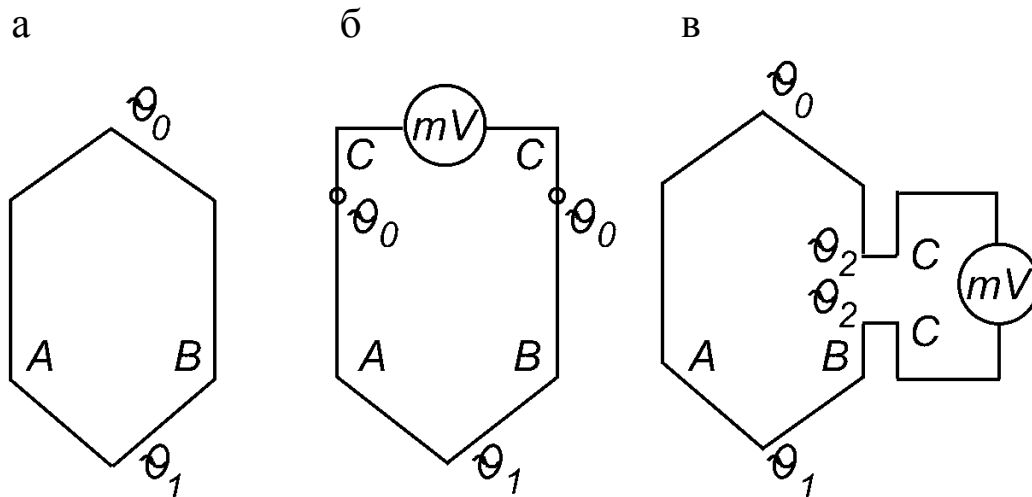


Рис.5.1. Термопары и способы подключения измерительных приборов

Можно разомкнуть контур в месте контактирования термоэлектродов А и В и вставить дополнительный проводник С между ними (рис. 5.1, 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.5.1, 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.

5.1.1. Материалы, применяемые для термопар

В табл.5.1 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 5.1

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 $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

5.1.2. 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 5.2

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.

5.1.3. 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.

5.2. 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.

5.3. 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:

$$U_{бэ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_k}{I_{о.н.}}, \quad (5.1)$$

(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 (5.1) 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

$$\Delta U_{бэ} = \frac{kT}{q} \left[\ln \frac{I_{k1}}{I_{k2}} - \ln \frac{I_{о.н.1}}{I_{о.н.2}} \right]. \quad (5.2)$$

Но для хорошо согласованных транзисторов, подвергающихся одинаковому температурному воздействию, величина $I_{о.н.1}/I_{о.н.2}$ близка к единице, поэтому уравнение (5.2) можно преобразовать следующим образом:

$$\Delta U_{бэ} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{k1}}{I_{k2}}. \quad (5.3)$$

Из анализа уравнения (5.3) 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.5.2.

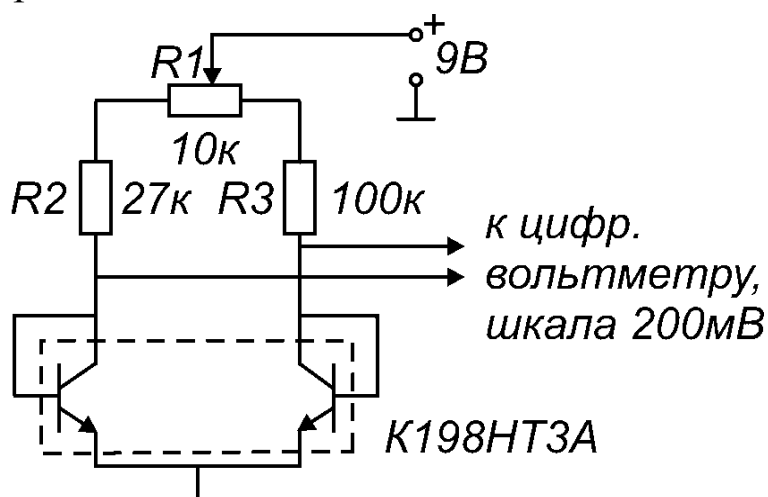


Рис.5.2. Электронный датчик температуры

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 № 5 «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.5.3. Установка состоит из нагревательной печи сопротивления R_m блока питания ($\sim 36\text{ V}$); системы регулирования температуры, в которую

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

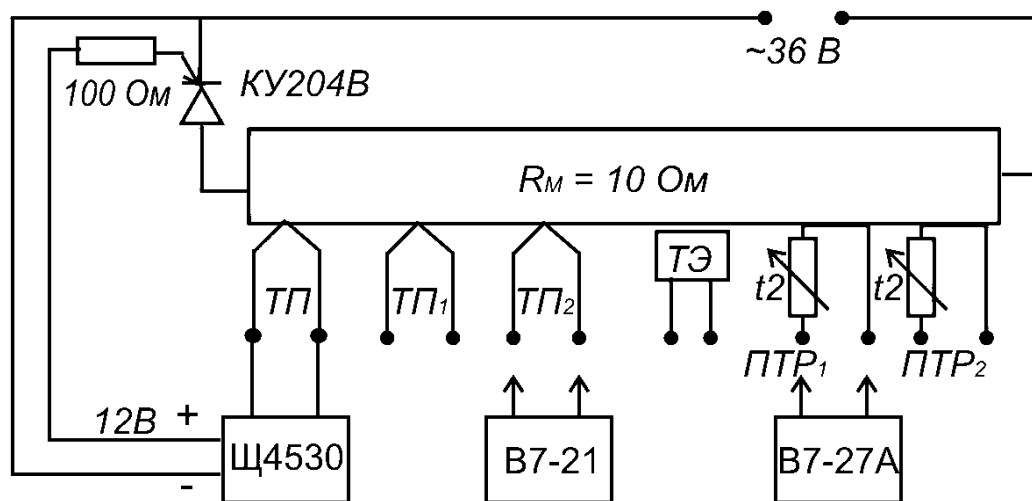


Рис.5.3. Схема лабораторной установки

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.5.3.

Таблица 5.3

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.5.4.

Таблица 5.4

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.5.3, 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
Сюрдо Александр Иванович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Редактор издательства – И.Г. Южакова
Компьютерные верстка и дизайн
Д.Ю. Бирюков

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать 11.06.2012	Формат 60x84 1/16
Бумага типографская	Офсетная печать
Уч.-изд.л. 6,9	Усл.печ.л. 3,38
Тираж 100	Заказ
	Цена "С"

Издательство УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

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