

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»
очной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 681.2
ББК 34.9
Ф50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «12» декабря 2023 г.,
протокол № 4

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. О. Парашков

Методические рекомендации по выполнению практических заданий по дисциплине «Физические основы получения информации» студентами направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» очной формы обучения.

Учебное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Информация. Информационные каналы и расчет их характеристик.....	5
2 Представление информации	11
3 Основы информационного обмена в звуковых полях.....	16
4 Расчет интерференционных преобразователей линейных и угловых перемещений.....	18
5 Расчет характеристик измерительных преобразователей.....	22
6 Расчет преобразователей неэлектрических величин.....	26
Список литературы	32

Введение

Информация – понятие, включающее обмен сведениями между людьми, человеком и автоматом, автоматом и автоматом. Получение информации (каких-либо сведений) об окружающем нас мире может происходить в результате общения с окружающими, чтения книг, приема и обработки сигналов, передаваемых по каналам связи и т. д. Основным способом получения количественной информации о том или ином объекте, системе, их состоянии и происходящих в них процессах является способ, связанный с процессом измерения.

Целью изучения дисциплины «Физические основы получения информации» является изучение физических принципов различных видов получения информации в науке и технике; основ взаимодействия физических полей с веществом; физических явлений и эффектов, используемых для получения измерительной и управляющей информации; основных фундаментальных и прикладных положений, лежащих в основе разнообразных приборов, предназначенных для получения информации об окружающем человека мире.

В данном курсе рассматриваются:

- основы взаимодействия физических полей с веществом;
- физические явления и эффекты, используемые для получения измерительной и управляющей информации: механические, электрические, магнитные, оптические, химические, ядерные и др.;
- области применения физических явлений и эффектов в технике измерений;
- закономерности проявления физических эффектов, их техническая реализация, понятия преобразователя информации;
- измерение физических величин различной природы.

Целью практических занятий по дисциплине «Физические основы получения информации» является постановка задач анализа измерительных трактов различной природы, решение задач информационного поиска, анализа и синтеза физических явлений и эффектов для создания средств измерения, диагностики.

1 Информация. Информационные каналы и расчет их характеристик

Информационным называется процесс, возникающий в результате установления связи между двумя объектами материального мира.

Один из объектов называют генератором сообщений или источником информации, другой – получателем или приемником информации.

Понятие **информации** имеет много определений, от наиболее широкого (информация есть формализованное отражение реального мира) до практического (сведения и данные, являющиеся объектом хранения, передачи, преобразования, восприятия и управления). В настоящее время мировая наука все больше склоняется к точке зрения, что информация, наряду с материей и энергией, принадлежит к фундаментальным философским категориям естествознания и относится к одному из свойств объективного мира, хотя и несколько специфичному. Что касается «данных» (от лат. datum – факт), то это совокупность фактов, результатов наблюдений, измерений о каких-либо объектах, явлениях или процессах материального мира, представленных в формализованном виде, количественном или качественном. Это не информация, а только атрибут информации – сырье для получения информации путем соответствующей обработки и интерпретации (истолкования) [1, 2].

Важнейшим вопросом теории информации является установление меры количества и качества информации. Становление категорий информационных мер отвечает трем основным направлениям в подходах теории информации: структурному, статистическому и семантическому.

Структурная теория – рассматривает структурное строение информации и ее измерение на основе простого подсчета информационных элементов (квантов) или с использованием элементарных способов кодирования.

Статистическая теория – оперирует понятием энтропии как меры неопределенности, учитывающей вероятность появления, а следовательно, и информативность тех или иных событий.

Семантическая теория – опирается на принципы установления связи между информативностью и категориями целесообразности, ценности, полезности, существенности и др. Указанные направления имеют свои области преимущественного использования:

- структурная теория – применяется для оценки аппаратных возможностей каналов связи, запоминающих и других устройств вне зависимости от условий их применения;

- статистическая теория – дает оценки применимости информационных систем в конкретных условиях, например, при передаче в системе связи информации с определенными статистическими свойствами и находящейся под воздействием шумов;

- семантическая теория – применима, например, к оценке эффективности опыта, осуществляемого логическим путем.

Одной из закономерностей, проявляющихся при оценке количества информации, является зависимость этого количества от неопределенности ситуации, сообщение о которой передается.

При этом предполагается, что получение информации осуществляется в результате определенного сообщения, т. е. в результате наступления какого-либо события.

До получения сообщения имеется большая или меньшая неопределенность тех или иных сообщений. После поступления сообщения ситуация становится полностью определенной. Из совокупности первоначальных предположений остается одно.

Вторая фундаментальная закономерность, на которой основывается количественное определение информации, является принцип аддитивности. Он представляет собой зависимость количества информации от длины сообщения. С учетом этого принципа вводимая мера информации должна монотонно возрастать с увеличением длительности сообщения.

Конкретным воплощением концепции неопределенности является так называемый алфавит сообщения. Под алфавитом сообщения понимают количество состояний элемента, из которого производится выбор в случае передачи сообщения.

С увеличением алфавита увеличивается неопределенность ситуации.

Таким образом, увеличение алфавита ведет к увеличению неопределенности ситуации и, следовательно, к увеличению количества информации в сообщении [2].

Количество информации, содержащейся в одном элементе сообщения может быть определено по соотношению:

$$H = \log_2 m,$$

где m – размерность алфавита.

Впервые количественная оценка неопределенности была введена американским инженером-связистом Р. Хартли в 1928 г.

Логарифмическая мера наиболее удобна по различным причинам:

- она практически более пригодна. Параметры, имеющие техническое значение, такие как время, ширина полосы частоты и т. д., зависят линейно от логарифма;

- она ближе к нашему интуитивному представлению о подходящей мере. Это обстоятельство тесно связано с первой причиной, т. к. мы интуитивно измеряем количества с помощью линейного сравнения с принятыми эталонами;

- она является более подходящей с математической точки зрения. Многие предельные переходы весьма просты при использовании логарифмов, но потребовали бы сложных приемов при использовании числа сообщений.

Выбор основания логарифмов соответствует выбору единицы измерения информации. Единицы измерения, получающиеся при использовании основания два, могут быть названы двоичными единицами или сокращенно битами. Бит является единицей количества информации и представляет собой инфор-

мацию, содержащуюся в одном дискретном сообщении источника равновероятных сообщений с объемом алфавита, равным двум. Название bit образовано из двух начальных и последних букв английского выражения binary unit, что значит двоичная единица [2].

Кроме бита, существуют еще следующие единицы измерения информации.

Дит – это энтропия системы с десятью равновероятными состояниями, вычисленными с помощью логарифма с основанием десять:

$$H = \lg m .$$

Если взять физическую систему с e состояниями, то получим натуральную единицу количества информации, называемую нитом:

$$H = \ln m .$$

Взаимосвязь между единицами количества информации

$$1 \text{ бит} = \frac{1}{1,51} \text{ нит} = \frac{1}{3,32} \text{ дит} .$$

Величина H характеризует неопределенность ситуации, сообщение о которой передается и носит название *энтропии*.

Если об одной и той же ситуации передается n сообщений, то количество информации

$$I = n \log_2 m .$$

Эта формула носит название формулы Хартли и позволяет по длине сообщения и размерности алфавита определить количество информации при условии, что сообщения равновероятны.

Если сообщения о некоторой ситуации носят не равновероятный характер, то для определения количества информации используется понятие вероятности.

Материальная среда, которая обеспечивает взаимодействие между источником информации и приемником, называется каналом связи. Передача информации осуществляется через канал связи.

Общими элементами большинства каналов связи систем обработки данных являются (рисунок 1.1):

- источник информации – 1;
- кодирующее устройство – 2;
- передатчик – 3;
- приемник информации – 4;
- устройство хранения и обработки информации – 5;
- устройство отображения информации – 6.

Также в канале связи может действовать источник помех – 7.

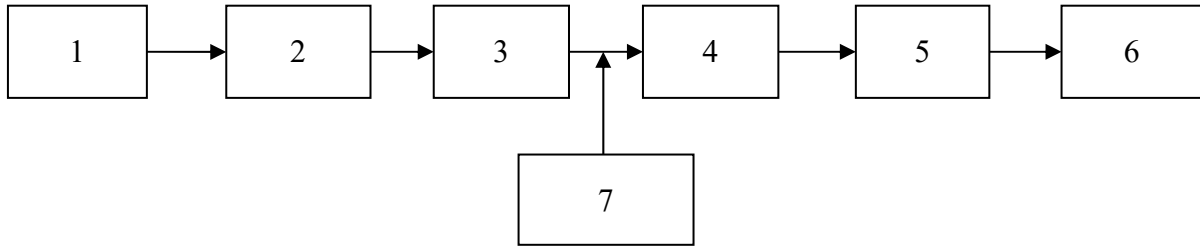


Рисунок 1.1 – Структурная схема устройства обработки информации

В зависимости от среды передачи данных информационные каналы разделяются на следующие:

- проводные (воздушные);
- кабельные (медные и волоконно-оптические);
- радиоканалы наземной и спутниковой связи.

К основным характеристикам информационных каналов относятся:

- амплитудно-частотная характеристика;
- полоса пропускания;
- затухание;
- помехоустойчивость;
- пропускная способность;
- достоверность передачи данных.

В первую очередь разработчика информационного канала интересуют **пропускная способность** и **достоверность** передачи данных, поскольку эти характеристики прямо влияют на производительность и надежность создаваемого канала. Пропускная способность и достоверность – это характеристики как канала передачи, так и способа передачи данных.

Амплитудно-частотная характеристика показывает, как затухает амплитуда синусоиды на выходе линии связи по сравнению с амплитудой на ее входе для всех возможных частот передаваемого сигнала. Вместо амплитуды в этой характеристике часто используют также такой параметр сигнала, как его мощность.

Полоса пропускания (bandwidth) – это непрерывный диапазон частот, для которого отношение амплитуды выходного сигнала ко входному превышает некоторый заранее заданный предел, обычно 0,5.

Затухание (attenuation) определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передаче по линии сигнала определенной частоты.

Пропускная способность (throughput) характеризует максимально возможную скорость передачи данных по линии связи. Пропускная способность измеряется в битах в секунду, а также в производных единицах, таких как килобит в секунду, мегабит в секунду, гигабит в секунду и т. д.

Информационный канал можно характеризовать также тремя соответствующими параметрами: временем использования канала T_k , шириной полосы частот, пропускаемых каналом F_k , и динамическим диапазоном канала D_k , характеризующим его способность передавать различные уровни сигнала.

Величина $V_k = T_k F_k D_k$ называется емкостью канала.

Неискаженная передача сигналов возможна только при условии, что сигнал по своему объему «вмещается» в емкость канала.

Следовательно, общее условие согласования сигнала с каналом передачи информации определяется соотношением $V_C \leq V_k$.

Однако соотношение выражает необходимое, но недостаточное условие согласования сигнала с каналом. Достаточным условием является согласование по всем параметрам: $T_C \leq T_k$; $F_C \leq F_k$; $D_C \leq D_k$.

Для информационного канала пользуются понятиями: скорость ввода информации, скорость передачи информации и пропускная способность канала.

Под скоростью ввода информации (поток информации) $I(X)$ понимают среднее количество информации, вводимое от источника сообщений в информационный канал в единицу времени. Эта характеристика источника сообщений и определяется только статистическими свойствами сообщений.

Скорость передачи информации $I(Z, Y)$ – среднее количество информации, передаваемое по каналу в единицу времени. Она зависит от статистических свойств передаваемого сигнала и от свойств канала.

Пропускная способность C – наибольшая теоретически достижимая для данного канала скорость передачи информации. Это характеристика канала и не зависит от статистики сигнала.

С целью наиболее эффективного использования информационного канала необходимо принимать меры к тому, чтобы скорость передачи информации была как можно ближе к пропускной способности канала. Вместе с тем скорость ввода информации не должна превышать пропускную способность канала, иначе не вся информация будет передана по каналу.

Это основное условие динамического согласования источника сообщений и информационного канала.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками каналов связи, решить следующие задачи.

1 Производится стрельба по двум мишеням: по первой мишени сделано два выстрела (событие А), по второй – три (событие В). Вероятность попадания при одном выстреле равна, соответственно, $1/2$ и $1/3$. В каком соотношении находятся количества информации об этих событиях?

Указание – Вероятность попадания в мишень подчинена биномиальному закону распределения $P(X = m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m}$.

2 Вероятность появления события при одном испытании равна p , вероятность не появления события $q = 1 - p$. При каком p количество информации о событии будет наибольшим?

3 Определите максимальное количество информации в сообщении, состоящем из трех пятибуквенных слов, причем общее число букв в алфавите равно 32.

4 Спектр частот сигнала определяется полосой 1 МГц. Время, необходимое для передачи сигнала, составляет 1 мкс. Мощность сигнала превышает мощность помехи в 16 раз.

Определите объем передаваемого сигнала, а также, может ли данный сигнал быть передан по каналу со следующими характеристиками:

- время использования – 1 мкс; 1 мкс;
- полоса частот – 1 МГц; 2 МГц;
- максимальное соотношение сигнал – шум – 32; 8.

5 Найдите спектр частот сигнала, обеспечивающий его передачу со скоростью 10^3 бит/с по каналу с максимальным соотношением сигнал – шум, равным 1023.

6 Какое минимальное время передачи сигнала должно быть обеспечено для получения 100 бит информации, если спектр его частот 10000 Гц, а соотношение сигнал – шум составляет 128?

7 Для передачи восьми равновероятных сообщений используется двоичный код. Длительности кодовых символов одинаковы. Найдите скорость передачи сообщений, если длительность каждого символа равна 10^{-6} с.

8 Определите пропускную способность канала передачи данных, если для передачи используется код с основанием m (т. е. m различных символов) Длительность всех символов одинакова и равна τ , а по каналу передается сообщение из M символов, которые имеют одинаковые вероятности.

9 Пропускная способность канала связи 100 Мбит/с. Канал не подвержен воздействию шума (например, оптоволоконная линия). Определите, за какое время по каналу будет передан текст, информационный объем которого составляет 100 Кбайт.

10 Алфавит состоит из букв А, В, С, D. Вероятности появления букв равны соответственно $p_A = p_B = 0,25$; $p_C = 0,34$; $p_D = 0,16$. Определите количество информации на символ сообщения, составленного из такого алфавита.

11 Буквы русского алфавита передаются при помощи четырехчастотных кодов. Длительность кода буквы равна 0,1 с. Определите скорость передачи информации и скорость передачи сигналов.

12 Число символов алфавита $m = 4$. Вероятности появления символов равны соответственно $p_1 = 0,15$; $p_2 = 0,4$; $p_3 = 0,25$; $p_4 = 0,2$. Длительности символов $\tau_1 = 3$ с; $\tau_2 = 2$ с; $\tau_3 = 5$ с; $\tau_4 = 6$ с. Чему равна скорость передачи сообщений, составленных из таких символов?

Контрольные вопросы

1 Дайте определение понятий «информация», «информационный канал».

2 Какие направления выделяются в теории информации? Поясните каждое направление.

3 Как определить количество информации в сообщении?

- 4 В каких единицах измеряется информация?
- 5 Что такое энтропия?
- 6 Из каких элементов состоит канал связи?
- 7 Какими величинами можно охарактеризовать канал связи?
- 8 Назовите основное условие согласования канала связи и сигнала.
- 9 Что такое пропускная способность канала связи?

2 Представление информации

Информация – сведения об окружающем нас мире, событиях, явлениях, воспринимаемые, хранимые и передающиеся человеком.

В обыденной жизни под информацией понимают сведения о предметах, явлениях, фактах, действиях, процессах, передаваемые людьми устным, письменным или другим образом. Сведения о внешнем мире человек воспринимает с помощью органов чувств (зрения, слуха, вкуса, обоняния, осязания). Таким образом, информация – это знания, сведения, которые человек получает из окружающего мира с помощью органов чувств.

Формы (виды) представления информации [2]:

- 1) по способу восприятия: визуальная, аудиальная, тактильная, обонятельная;
- 2) по форме представления: звуковая, текстовая, числовая, графическая, сигнальная;
- 3) по назначению: массовая, специализированная, личная.

Свойства информации: полнота; актуальность; понятность; достоверность; полезность.

Понятность. Этим свойством обладает только та информация, которая выражена в форме, понятной тем, кому она предназначена, в противном случае информация становится бесполезной.

Полезность. Это комплексный показатель качества информации. Зависит от того, какие задачи можно решить, используя эту информацию. Однако ценность информации – это понятие субъективное, т. к. информация, полезная для одного человека, может быть совершенно бесполезной для другого.

Достоверность. Информация достоверна, если она содержит сведения, отражающие истинное положение дел. Часто из-за искажений информации это свойство утрачивается. Кроме того, достоверная информация со временем может стать недостоверной, т. к. она обладает свойством устаревать, т. е. перестает отражать истинное положение дел.

Актуальность. Она определяется степенью сохранения ценности информации в момент ее использования. Актуальную информацию очень важно иметь при работе в изменяющихся условиях, т. к. в таком случае только вовремя полученная (или обновленная) информация может принести пользу.

Полнота и точность. Полнота информации означает, что она содержит минимальный, но достаточный для принятия правильного решения состав.

Нарушение полноты информации сдерживает принятие решений и может повлечь ошибки.

Информацию можно представлять с помощью знаков. Знаковые системы – это наборы знаков определенного типа. Примерами знаковых систем являются разговорные языки, системы счисления, нотная грамота, математические формулы.

Системой счисления называется совокупность приемов обозначения (записи) чисел. Или, в общем случае, это специальный язык, алфавитом которого являются символы, называемые цифрами, а синтаксисом – правила, позволяющие однозначно сформировать запись чисел [2]. Запись числа в некоторой системе счисления называют кодом числа. Кратко число записывается следующим образом:

$$A = a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1 a_0 . \quad (2.1)$$

Отдельную позицию в изображении числа принято называть разрядом, а номер позиции – номером разряда. Число разрядов в записи числа называется разрядностью и совпадает с его длиной.

Каждой цифре a_i данного числа A однозначно соответствует ее количественный (числовой) эквивалент – $K(a_i)$. Количественный эквивалент числа A , заданного в определенной системе счисления, является некоторой функцией числовых эквивалентов всех его цифр, т. е.

$$K(A) = f[K(a_n), \dots, K(a_1)]. \quad (2.2)$$

Диапазон представления (D) чисел в данной системе счисления – это интервал числовой оси, заключенный между максимальными и минимальными числами, представленными заданной разрядностью:

$$D = K(A)_{(p)\max} - K(A)_{(p)\min} . \quad (2.3)$$

Существует бесчисленное множество способов записи чисел цифровыми знаками. Однако любая система счисления, предназначенная для практического использования, должна обеспечивать:

- возможность представления любого числа в заданном диапазоне чисел;
- однозначность представления;
- краткость и простоту записи чисел;
- легкость овладения системой, а также простоту и удобство оперирования ею.

В основном системы счисления строятся по следующему принципу:

$$A_{(p)} = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_n p_n , \quad (2.4)$$

где $A_{(p)}$ – запись числа в системе с базисом p_n ;

a_n – база или последовательность цифр системы счисления с p_n алфавитом;

$\{p_n\}$ – базис системы счисления (совокупность весов отдельных разрядов системы).

Основанием системы счисления называется количество различных символов (цифр), используемых в каждом из разрядов числа для его изображения в данной системе счисления.

Базис системы счисления – это совокупность весов отдельных разрядов системы счисления.

Непозиционными называются такие системы счисления, алфавит которых содержит неограниченное количество символов (цифр), причем количественный эквивалент любой цифры постоянен и зависит только от ее начертания, но не от позиции в числе. Такие системы строятся по принципу аддитивности, т. е. количественный эквивалент числа определяется как сумма рядом стоящих цифр:

$$K(A(Q)) = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_k = \sum_1^k Q_i, \quad (2.5)$$

где Q_i – символы, образующие базис системы

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k\}. \quad (2.6)$$

К основным недостаткам непозиционных систем счисления можно отнести:

- отсутствие нуля;
- необходимость содержания бесконечного количества символов;
- сложность арифметических действий с числами.

Позиционными называются системы счисления, алфавит которых содержит ограниченное количество символов, причем значение каждой цифры в числе определяется не только ее начертанием, но и находится в строгой зависимости от позиции в числе.

Позиционные системы имеют ряд достоинств по сравнению с непозиционными, основным из которых является удобство выполнения арифметических операций.

В общем виде число A в позиционной системе счисления может быть представлено следующим образом:

$$A = a_n p_{n-1} \dots p_1 + a_{n-1} p_{n-2} \dots p_1 + \dots + a_2 p_1 + a_1, \quad (2.7)$$

где a_n – цифра i -го разряда числа, причем $a_n = \overline{0, p_i - 1}$ есть база системы счисления;

p_n – основания системы счисления;

p_i – вес n -го разряда числа, $p_i = \prod_0^i p_l$.

Позиционные системы счисления строятся не только по принципу аддитивности, но и по принципу мультипликативности, т. е. количественный экви-

валент числа определяется как сумма рядом стоящих цифр со своими весами.

Существует два основных метода перевода числа из одной системы счисления в другую: табличный и расчетный.

Табличный метод прямого перевода основан на сопоставлении таблиц соответствия чисел различных систем счисления. Этот метод очень громоздок и требует большого объема памяти для хранения таблиц, но применим для любых систем счисления (не только для позиционных). Суть другого вида табличного метода состоит в том, что имеются таблицы эквивалентов в каждой системе только для цифр, т. е. баз, этих систем и степеней основания (положительных и отрицательных), т. е. базиса систем. Задача перевода сводится к тому, что в выражения полиномов для исходной системы счисления представляют эквиваленты из новой системы для всех цифр и их весов разрядов и производят действия (умножения и сложения) по правилам арифметики по новому основанию p . Полученный при этом результат будет изображать число в новой системе счисления.

Расчетный метод перевода числа из одной системы счисления в другую осуществляется по следующему правилу: чтобы перевести целое число из одной позиционной системы счисления в другую, необходимо исходное число последовательно делить на основание новой системы счисления, записанное в исходной системе, до получения частного, равного нулю. Число в новой системе счисления записывается из остатков от деления, начиная с последнего.

Перевод правильной дроби с основанием p в дробь с основанием q осуществляется в следующем порядке.

1 Основание новой системы счисления выразить цифрами исходной системы счисления и все последующие действия производить в исходной системе счисления.

2 Последовательно умножать данное число и получаемые дробные части произведений на основание новой системы до тех пор, пока дробная часть произведения не станет равной нулю или будет достигнута требуемая точность представления числа.

3 Полученные целые части произведений, являющиеся цифрами числа в новой системе счисления, привести в соответствие с алфавитом новой системы счисления.

4 Составить дробную часть числа в новой системе счисления, начиная с целой части первого произведения.

Десятичная система счисления. Пришла в Европу из Индии, где она появилась не позднее VI в. н. э. В этой системе 10 цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, однако информацию несет не только цифра, но и место, на котором цифра стоит (то есть ее позиция). В десятичной системе счисления особую роль играют число 10 и его степени: 10, 100, 1000 и т. д. Самая правая цифра числа показывает число единиц, вторая справа – число десятков, следующая – число сотен и т. д.

Числа, которые записаны с помощью одной цифры, называют **однозначными**, записанные с помощью двух – **двузначными**, так же по количеству цифр в числе дают названия и другим числам.

Под двоичной системой счисления понимается такая система, в которой для изображения чисел используются два символа, а веса разрядов меняются по

закону $2^{\pm k}$ (где k – произвольное целое число). Классической двоичной системой является система с символами 0, 1. Ее двоичные цифры часто называют битами.

Умножение двоичных чисел полностью определяется двумя правилами:

- 1) умножение любого числа на 0 дает 0;
- 2) умножение любого числа на 1 оставляет его без изменения.

Для сложения имеется только правило, согласно которому прибавление 0 к любому числу не меняет этого числа.

Индивидуальное задание

Ознакомьтесь с основными теоретическими положениями по переводу чисел из одной системы счисления в другую. Решить следующие задачи.

- 1 Переведите число 1011101,001 из двоичной системы счисления (СС) в десятичную СС.
- 2 Переведите число 75 из десятичной системы в двоичную.
- 3 Переведите число 0,214 из десятичной системы счисления в двоичную СС.
- 4 Число 1287,923 представьте в десятичной системе счисления в виде полинома.
- 5 Переведите двоичное число 1101001 в десятичную систему счисления.
- 6 Переведите двоичное число 100111011 в десятичную систему счисления.
- 7 Переведите десятичные числа 464, 380,1875 и 115,94 в двоичную систему счисления.
- 8 Переведите числа 1000001_2 ; $1001,01_2$; $1,01_2$; $100011111,0101_2$ в десятичную систему счисления.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое информация?
- 2 Какие существуют формы представления информации?
- 3 Какими свойствами обладает информация?
- 4 Что такое понятность и достоверность информации?
- 5 Что такое точность информации?
- 6 Что такое система счисления?
- 7 Назовите основные системы счисления.
- 8 Какие существуют способы перевода чисел из одной системы в другую?
- 9 Какие системы счисления относятся к непозиционным?
- 10 Какие системы счисления относятся к позиционным и по какому принципу они строятся?
- 11 Как перевести дробь из одной системы счисления в другую?

3 Основы информационного обмена в звуковых полях

Упругость – свойство твердых тел восстанавливать свою форму и объем, а жидкостей и газов – объем после прекращения действия внешних сил. Среду, обладающую упругостью, называют упругой средой [1].

Упругие колебания – это колебания механических систем, упругой среды или ее части, возникающие под действием механического возмущения. Упругие, или акустические, волны – механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде. Частный случай акустических волн – слышимый человеком звук. Отсюда происходит термин «акустика» (от греч. *akustikos* – слуховой) – область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких до самых высоких частот и в том числе слышимых человеком [2].

Энергия акустической (звуковой) волны – добавочная энергия, обусловленная наличием этой волны. Энергия акустической волны в единице объема среды называется плотностью звуковой энергии. Она состоит из кинетической и потенциальной частей. Для плоской бегущей звуковой волны кинетическая и потенциальная части энергии равны и плотность полной энергии, выраженная через амплитуду давления P ,

$$E = P^2 / (\rho c^2), \quad (3.1)$$

где ρ – плотность среды.

Интенсивность (сила) звука J – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, за единицу времени. Для периодической звуковой волны усреднение проводится либо за промежуток времени, намного больший по сравнению с периодом, либо за целое число периодов.

Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность, выраженная через амплитуды давления P и смещения U ,

$$J = P^2 / (2\rho c) = 0,5\rho c\omega^2 U^2. \quad (3.2)$$

Интенсивность используемых волн обычно весьма мала: $< 10^{-5}$ Вт/м² в месте излучения ультразвука.

В ультразвуковом методе получения информации обычно измеряют ослабление амплитуды A' относительно амплитуды возбужденных в объекте колебаний A_0 . Для этого применяют логарифмические единицы – децибелы.

$$(A' / A_0) = 20\lg(A' / A_0) = 10\lg(J' / J_0). \quad (3.3)$$

Поскольку $A' < A_0$, децибелы будут отрицательными, однако в ультразвуковой дефектоскопии знак «минус» принято опускать. На рисунке 3.1 приведена шкала перевода относительных единиц в положительные и отрицательные децибелы.



Рисунок 3.1 – Шкалы перевода относительных величин в децибелы. Попарно используют шкалы I-I', II-II', III-III'

Отражение ультразвуковых волн на границе раздела сред зависит от соотношения волнового сопротивления сред.

Волновое сопротивление является характеристикой среды, определяющей условие отражения и преломления волн на границе сред. Волновое сопротивление среды равно произведению плотности среды ρ и скорости C распространения ультразвуковой волны:

$$Z = \rho \cdot C . \quad (3.4)$$

Индивидуальное задание

Ознакомьтесь с основными параметрами ультразвукового измерительного тракта. Решить следующие задачи.

1 Эхо, вызванное ружейным выстрелом, дошло до стрелка через 2 с после выстрела. На каком расстоянии находится преграда, от которой отразился звук (скорость звука в воздухе 340 м/с)?

2 Волна распространяется по поверхности воды со скоростью 10 м/с. Расстояние между соседними «гребнями» волн составляет 5 м. С какой частотой колеблются частицы?

3 При переходе из одной среды в другую скорость звуковой волны уменьшилась на 30 %. Как изменится при этом длина волны?

4 Сигнальщик услышал звуковой сигнал через 4 с после начала работы сирены. На каком расстоянии от источника находится сигнальный пост, если частота звукового сигнала равна 1 кГц, а длина волны составляет 32 см?

5 Мимо неподвижного наблюдателя проехал автомобиль с включенной сиреной. При приближении автомобиля наблюдатель слышал более высокий тон звука, а при удалении – более низкий. Какой эффект будет наблюдаться, если сирена будет неподвижной, а мимо нее проедет наблюдатель?

6 Определите плотность потока энергии, распространяющейся в воде акустической волны, имеющей цилиндрический фронт, на расстоянии $r_2 = 80$ см от оси излучателя, если известно, что коэффициент затухания ультразвука в воде на частоте излучателя $\delta = 10,6 \text{ м}^{-1}$, а плотность потока энергии на расстоянии

$r_1 = 20$ см от оси излучателя составляет $q_1' = 2 \cdot 10^{-6}$ Вт/м². Определите результирующий коэффициент ослабления интенсивности волны при преодолении расстояния от r_1 до r_2 вследствие проявления эффектов расширения фронта и затухания в среде.

7 Рассчитайте значение первого критического угла при падении продольной акустической волны на плоскую границу раздела вода – твердое тело, если известно, что плотность материала твердого тела $\rho = 4,3 \cdot 10^3$ кг/м³, модуль упругости $E = 100 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$.

8 Определите длину волны звука в слышимой области на частоте 1,5 кГц, распространяющуюся в воде со скоростью 1483 м/с и в воздухе со скоростью 343,1 м/с (при температуре 20 °С). Определите, в какой среде длина волны звука больше. Зависит ли скорость распространения звуковой волны от ее частоты?

9 Определите коэффициент проникновения на границе раздела воздух – кожа. Скорость распространения УЗ-волны в воздухе равна 343,1 м/с, в коже – 1610 м/с, плотность воздуха – 1,205 кг/м³, плотность кожи – 1250 кг/м³.

Контрольные вопросы

- 1 Колебания каких частот относятся к ультразвуковым?
- 2 Какие волны могут распространяться в жидких и твердых средах?
- 3 Назовите основные упругие постоянные, от которых зависит скорость распространения ультразвуковых волн в твердых средах.
- 4 Какой закон связывает углы падения и преломления акустических волн?
- 5 В чем заключается эффект Доплера?
- 6 Как определяются коэффициенты поглощения и отражения?

4 Расчет интерференционных преобразователей линейных и угловых перемещений

Световые волны имеют электромагнитную природу и перекрывают очень широкий диапазон длин волн ($100 \text{ нм} < \lambda < 0,1 \text{ мм}$), хотя волны только узкого диапазона ($400 \text{ нм} < \lambda < 750 \text{ нм}$ в вакууме) непосредственно воспринимаются зрительной системой человека [2]

Согласно электромагнитной теории электрическая \vec{E} и магнитная \vec{H} компоненты волны в однородном изотропном пространстве должны подчиняться волновому уравнению

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \Delta \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \quad (4.1)$$

где Δ – оператор Лапласа;

ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,27 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;

μ – относительная магнитная проницаемость среды.

Интерференция света – явление возникновения устойчивого пространственного перераспределения энергии в области перекрытия двух и более световых волн, для которого не выполняется условие суперпозиции для интенсивностей, т. е.

$$I \neq \sum I_k.$$

В этом случае пространственное распределение интенсивности называется *интерференционной картиной*.

Рассмотрим образование *интерференционной картины* при суперпозиции двух плоских монохроматических волн. Плоскую электромагнитную волну при распространении вдоль оси x можно представить в виде

$$E(t, x) = E_0 \cos\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right). \quad (4.2)$$

В том случае, когда интерес представляет распределение поля вдоль оси координат, не совпадающей с направлением распространения волны, выражение для E приобретает вид

$$E(t, r) = E_0 \cos\left(2\pi\nu t - \frac{2\pi}{\lambda}r\right), \quad (4.3)$$

где $r = x \sin \alpha - y \cos \alpha$;

α – угол между направлением распространения волны (волновым вектором) и осью y .

Рассмотрим падение на экран (фотоприемник) двух волн. Считаем, что фазовые фронты падающих волн плоские и волны имеют одинаковую поляризацию. Пусть плоскость экрана совпадает с плоскостью xu (рисунок 4.1).

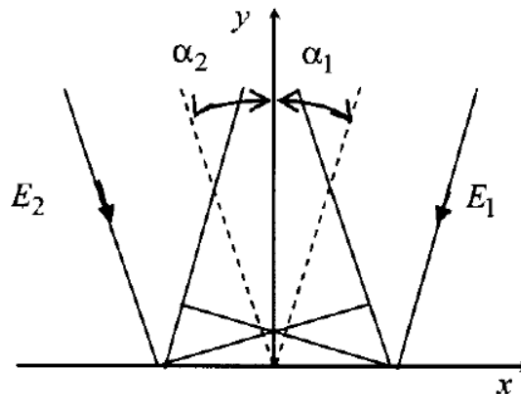


Рисунок 4.1 – Падение двух электромагнитных волн на экран

Распределение полей E_1 и E_2 в этой плоскости вдоль оси x имеет вид

$$E_1 = E_{10} \cos\left(2\pi\nu_1 t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \alpha_1 + \varphi_1\right); \quad E_2 = E_{20} \cos\left(2\pi\nu_2 t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \alpha_2 + \varphi_2\right).$$

Фотоприемник реагирует на интенсивность светового поля, пропорциональную квадрату амплитуды суммарного поля E :

$$\begin{aligned} I = E^2 &= (E_1 + E_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 = E_1^2 + E_2^2 + \\ &+ E_{10}E_{20} \cos\left[2\pi(\nu_1 + \nu_2)t - x\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sin \alpha_1 + \frac{2\pi}{\lambda}\sin \alpha_2\right) + \varphi_1 + \varphi_2\right] + \\ &+ E_{10}E_{20} \cos\left[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t - x\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sin \alpha_1 - \frac{2\pi}{\lambda}\sin \alpha_2\right) + \varphi_1 - \varphi_2\right]. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Учитывая ограниченную чувствительность фотоприемника по частоте, необходимо проинтегрировать полученное выражение на интервале τ , который удовлетворяет условию $\frac{1}{\nu_{1,2}} \ll \tau \ll \frac{1}{\nu_1 - \nu_2}$,

$$\frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \cos^2(2\pi\nu_i t + \varphi_i) dt = \frac{1}{2}; \quad \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} \cos(2\pi(\nu_1 + \nu_2)t + \varphi_1 + \varphi_2) dt = 0.$$

Считая, что последний член в выражении (4.4) мало меняется на интервале τ (частота $(\nu_1 - \nu_2) \ll \tau^{-1}$), получаем следующее выражение для интенсивности света в интерференционной картине:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) + E_{10}E_{20} \cos\left[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t - 2\pi x\left(\frac{\sin \alpha_1}{\lambda} - \frac{\sin \alpha_2}{\lambda}\right)\right] = \\ &= \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) + E_{10}E_{20} \cos\left[2\pi\Delta\nu t - \frac{4\pi}{\lambda} x \sin \alpha\right]. \end{aligned}$$

При получении этого выражения было принято: $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, $\alpha_1 = -\alpha_2 = \alpha$, $\lambda_1 \cong \lambda_2 = \lambda$, $\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu$. Для случая $\Delta\nu = 0$, получаем следующее выражение для интенсивности света:

$$I = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) + E_{10}E_{20} \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} x \sin \alpha \right] \cong \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) + E_{10}E_{20} \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} x \alpha \right], \quad (4.5)$$

т. е. для случая $\Delta\nu = 0$ имеем в плоскости фотоприемника (экрана) неподвижные интерференционные полосы (рисунок 4.2), ширина которых

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \cong \frac{\lambda}{2\alpha}. \quad (4.6)$$

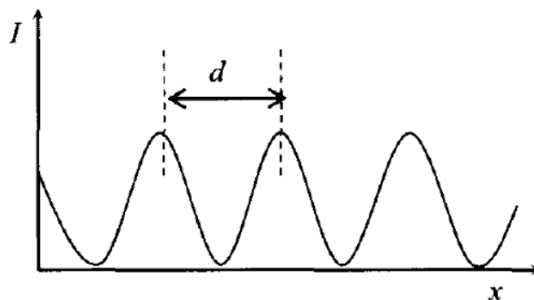


Рисунок 4.2 – Интерференционная картина

Рассмотрим случай, когда частоты интерферирующих волн не равны друг другу: $\Delta\nu \neq 0$. Запишем условия максимумов и минимумов интерференционной картины для фазы Φ :

$$\Phi = 2\pi\Delta\nu t - \frac{4\pi}{\lambda} x \sin \alpha = \begin{cases} 2n\pi & - \text{max}; \\ (2n-1)\pi & - \text{min}, n = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Из приведенного выражения следует, что интерференционная картина в случае неравенства частот интерферирующих волн перемещается относительно плоскости фотоприемника вдоль x .

Скорость перемещения полос найдем, продифференцировав постоянную фазу Φ по времени:

$$2\pi\Delta\nu - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dx}{dt} \sin \alpha = 0, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{\lambda}{4\pi \sin \alpha} \frac{2\pi\Delta\nu}{2\sin \alpha} = \frac{\lambda}{2\sin \alpha} \Delta\nu.$$

Таким образом, по направлению перемещения и частоте следования интерференционных полос можно установить соотношение частот двух интерферирующих волн.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными методами получения информации при помощи интерференции волн. Решить следующие задачи.

1 Световое излучение с длиной волны $\lambda_1 = 550$ нм распространяется из воздуха в воду с абсолютным показателем преломления $n = 1,33$. Как при этом переходе изменяются характеристики светового излучения и его восприятие человеком?

2 Оптическая разность хода двух интерферирующих монохроматических волн одинаковой интенсивности $\Delta = \frac{1}{3}\lambda$. Определить разность фаз между этими волнами. Какова интенсивность в точке наблюдения?

3 На какую величину должно переместится зеркало в интерферометре Майкельсона, чтобы интерференционная картина переместилась на одну полосу?

4 В интерферометре Майкельсона исследовалась желтая линия натрия, состоящая из двух компонент с длинами волн $\lambda_1 = 589$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм. При поступательном перемещении одного из зеркал интерференционная картина периодически исчезала. Найти расстояние между двумя положениями зеркал, соответствующими двум последовательным появлениям наиболее четкой картины.

Контрольные вопросы

1 Что такое интерференция?

2 Для каких волн характерна интерференция?

3 Поясните структуру измерительного преобразователя линейного перемещения.

4 Для каких целей в преобразователе линейного перемещения введено зеркало?

5 Что представляет собой интерференционный измерительный преобразователь углового перемещения?

6 Из каких элементов состоит фазовый интерферометр?

7 Как ведет себя интерференционная картина, образованная электромагнитными волнами с разной частотой?

5 Расчет характеристик измерительных преобразователей

Измерительный преобразователь (ИП) – это средство измерений, предназначенное для сбора, дальнейшего преобразования, обработки, передачи и (или) хранения измерительной информации, не поддающейся непосредственному восприятию [2–7].

Все измерительные преобразователи можно разделить на преобразователи электрических величин в электрическую величину и преобразователи неэлектрических величин в электрическую величину.

Преобразователи электрических величин делятся, в свою очередь, на масштабные измерительные преобразователи и преобразователи формы сигналов. Примерами широко распространенных *масштабных преобразователей* являются шунты, делители тока и напряжения, измерительные трансформаторы то-

ка и напряжения, измерительные усилители.

Преобразователи неэлектрических величин в электрическую величину по выходной величине делят на параметрические и генераторные.

Выходной величиной *параметрических* преобразователей является тот или иной параметр электрической цепи: электрическое сопротивление R , индуктивность L , емкость C и взаимная индуктивность M , изменяющиеся в зависимости от изменения преобразуемой неэлектрической величины. Характерной особенностью параметрических преобразователей является обязательное наличие дополнительного источника энергии, т. к. сами параметры R , L , C , M – пассивные и не могут восприниматься последующими звеньями измерительной цепи непосредственно.

Выходной величиной *генераторных* преобразователей является ЭДС или заряд, функционально связанные с преобразуемой неэлектрической величиной. В этих преобразователях используется энергия объекта, параметры которого преобразуются и, в конечном счете, измеряются или контролируются, т. е. в этом случае часто нет необходимости в дополнительном источнике энергии, что является преимуществом генераторных преобразователей.

Характеристики ИП, как и других средств измерений, делятся на метрологические и неметрологические. *Метрологическими* называют характеристики, влияющие на точность измерения (преобразования), а *неметрологическими* – соответственно не влияющие.

Метрологические характеристики, в свою очередь, делят на статические и динамические. *Статические* – это характеристики, которые наблюдаются при неизменности входной преобразуемой величины хотя бы за время преобразования. *Динамические* характеристики проявляются при изменении во времени входной преобразуемой величины.

Основными статическими характеристиками ИП можно считать следующие характеристики.

1 *Уравнение преобразования.* Возможность применения ИП для преобразования и, в конечном счете, измерения конкретной физической величины определяется уравнением преобразования $y = f(x)$. Эта зависимость должна быть однозначной и не иметь разрывов в пределах рабочего диапазона измерения преобразуемой величины x .

2 *Погрешность измерительных преобразователей.* Важнейшей характеристикой любого средства измерения, в том числе и ИП, является погрешность. В соответствии с ГОСТ погрешность – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Для ИП результатом измерения можно считать выходное значение y , по которому в соответствии с уравнением преобразования находится входное измеряемое значение x . Отклонение может определяться как абсолютное значение – разность (абсолютная погрешность), так и как относительное значение – относительная погрешность (например, в процентах).

3 *Вариация выходного сигнала измерительного преобразователя.* Вариация выходного сигнала ИП – разность между значениями информативного параметра выходного сигнала ИП, соответствующими данной точке диапазона измерения

при двух направлениях медленных изменений информативного параметра входного сигнала в процессе подхода к данной точке диапазона измерений.

4 *Чувствительность измерительного преобразователя.* Чувствительность ИП определяется как производная от выходного сигнала по входному преобразуемому параметру, т. е.

$$S = \frac{dx}{dt}.$$

5 *Входной и выходной импедансы измерительного преобразователя.* Любое средство измерений влияет на объект измерения, в определенной степени искажая исследуемый процесс. входной импеданс – характеристика, определяющая реакцию входного сигнала на подключение средства измерения к источнику входного сигнала с фиксированным выходным импедансом.

Важной характеристикой ИП является также выходной импеданс преобразователя, т. е. характеристика ИП, определяющая реакцию его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки.

Знание входного и выходного импедансов ИП необходимо для согласования его с исследуемым объектом и последующими элементами измерительной цепи.

Для оценки качества работы ИП в динамическом режиме рассмотрим его динамические характеристики, которые делят на полные и частные.

С помощью полных *динамических характеристик* можно восстановить входной преобразуемый сигнал по полученному выходному параметру ИП.

С помощью частных динамических характеристик восстановить входной сигнал по полученному выходному параметру невозможно.

К полным динамическим характеристикам относится прежде всего дифференциальное уравнение, связывающее величины $x(t)$ и $y(t)$: $a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_0 x$, где индексы при y и x означают порядок дифференцирования по времени. Порядок дифференциального уравнения может быть различным и зависит от структуры ИП. Вид решения дифференциального уравнения определяется характером изменения входного сигнала.

Существует понятие динамической чувствительности, являющейся отношением комплексного значения выходного сигнала к комплексному значению входного: $\dot{S}_d = \dot{x} / \dot{y}$. В случае синусоидального входного сигнала \dot{S}_d представляет собой комплексную величину, зависящую от частоты изменения ω входного сигнала. Динамическая чувствительность в комплексном виде представляется выражением

$$S(j\omega) = \frac{y_m}{x_m} e^{j\varphi}.$$

При этом выходная величина описывается вектором $y(t) = S(j\omega) x_m e^{j\omega t}$

с действительной частью $|y(t)| = |S(j\omega)| \sin(\omega t - \varphi)$. Модуль комплексной чувствительности и угол сдвига между входной и выходной величинами являются функциями частоты. Зависимости $S(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ называют соответственно амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками ИП.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками измерительных преобразователей. Решить следующие задачи.

1 Для электроемкостного измерительного преобразователя, имеющего цилиндрические обкладки с внутренним диаметром $D = 30$ мм и длиной $l = 60$ мм, постройте график зависимости емкости C от диаметра d металлического прутка.

2 Определите постоянную времени τ изменения температуры теплового преобразователя, помещенного в исследуемую среду, если известно, что его начальная температура составляла $\theta_0 = 20$ °С, а температуры в моменты времени $t_1 = 1$ с и $t_2 = 2$ с после начала переходного температурного процесса составляли $\theta_1 = 43,8$ °С и $\theta_2 = 65,3$ °С.

3 Оценить нелинейность функции преобразования температуры θ в электрическую проводимость γ полупроводникового резистора в диапазоне изменения температуры от $\theta_1 = 20$ °С до $\theta_2 = 100$ °С. Характеристики резистора: сопротивление при $\theta_0 = 0$ °С – $R_0 = 2,5$ К; температурный коэффициент $\beta = 3000$ К.

4 Отношение амплитуд U_1/U_2 двух сигналов, выраженное в децибеллах, равно N дБ. Найти отношение этих амплитуд в безразмерных единицах, т. е. значение отношения U_1/U_2 . Найти также отношение мощностей P_1/P_2 этих сигналов.

5 Реальная чувствительность средства измерения на малом участке изменения входного сигнала x описывается формулой $F_{\text{реал}}(x) = a + bx + cx^2$. Найти абсолютную и относительную погрешности средства измерения, если его номинальная чувствительность дается формулой $F_{\text{ном}}(x) = b_0x$.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое измерительный преобразователь?
- 2 Назовите основные характеристики измерительных преобразователей.
- 3 Как определяется абсолютная погрешность преобразователя?
- 4 Как определяется относительная погрешность?
- 5 Что является выходной величиной параметрических преобразователей?
- 6 Как называется вид уравнения преобразования, который указывается в паспорте на преобразователь?
- 7 Как определяется чувствительность измерительного преобразователя?
- 8 Что является выходным сигналом дифференциального измерительного преобразователя?

6 Расчет преобразователей неэлектрических величин

6.1 Параметрические измерительные преобразователи

Выходной величиной параметрического ИП является тот или иной параметр электрической цепи: сопротивление R , индуктивность L , емкость C и взаимная индуктивность M . К этому классу преобразователей относятся термочувствительные резистивные ИП, реостатные ИП, тензочувствительные ИП, индуктивные и емкостные ИП и некоторые другие [1–7].

Термочувствительные резистивные преобразователи. Принцип действия термочувствительных резистивных преобразователей, называемых часто терморезисторами (ТР), основан на зависимости электрического сопротивления проводника (или полупроводника) от температуры. Для получения информации о сопротивлении ИП через терморезистор необходимо пропустить электрический ток, который выделяет в ТР тепло. Происходит теплообмен между преобразователем и средой, и сопротивление ТР определяется тепловым равновесием между ИП и средой.

В качестве термочувствительных преобразователей в настоящее время используются металлические и полупроводниковые ТР. К *металлическим* ТР предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность градуировочной характеристики и ее воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых ТР. Помимо основных требований желателен высокий температурный коэффициент электрического сопротивления при одновременно высоком удельном сопротивлении материала ТР. Для изготовления стандартных ТР применяют в настоящее время платину и медь (в редких случаях – никель). Аналитически функция преобразования для диапазона отрицательных температур (от минус 200 °С) имеет вид

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 1000)], \quad (6.1)$$

а для положительных температур (до 650 °С)

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2], \quad (6.2)$$

где R_0 – сопротивление ТР при 0 °С;

$$A = 3,97 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1};$$

$$B = 5,85 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-2};$$

$$C = 4,22 \cdot 10^{-12} \text{ К}^{-4}.$$

Стандартные ТР из меди применяются для измерения температуры от минус 200 °С до плюс 200 °С, т. е. в более узком температурном диапазоне. Объясняется это тем, что при более высоких температурах медь легко окисляется и ТР меняет свои свойства. В диапазоне температур от минус 50 °С

до плюс 180 °С зависимость сопротивления ТР от температуры считается линейной, а именно

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (6.3)$$

где α – температурный коэффициент меди, $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры в интервалах, не превышающих 100 °С, определяется выражением

$$R_T = AT^b \exp(B/T). \quad (6.4)$$

В узких интервалах температур (не более 25 °С) используется более простое выражение

$$R_T = A \exp(B/T). \quad (6.5)$$

В выражениях (6.4) и (6.5) R_T – сопротивление при температуре T , К; A , b , B – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала полупроводника.

Реостатные преобразователи. Принцип действия реостатных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления проводника под влиянием входного перемещения. Преобразователь представляет собой реостат, подвижный контакт (движок) которого перемещается под действием измеряемой (преобразуемой) величины. Такие преобразователи бывают каркасные и реохордные.

Наиболее распространены *каркасные* преобразователи, в которых тонкая проволока из материала с высоким удельным сопротивлением и низким температурным коэффициентом намотана на каркас из текстолита, пластмассы или алюминия, покрытого тонкой оксидной пленкой. Изменение выходного параметра преобразователя R происходит посредством перемещения движка.

Тензочувствительные преобразователи. Принцип действия тензочувствительных преобразователей основан на тензоэффекте, заключающемся в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения.

Используя для сопротивления проволоки зависимость

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление;

l – длина;

S – площадь поперечного сечения проволоки,

можно получить выражение для относительного изменения сопротивления проволоки в виде

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l}(1 + 2K_{II}), \quad (6.6)$$

где K_{II} – коэффициент Пуассона, $K_{II} = \left(\frac{\Delta d}{d}\right) / \left(\frac{\Delta l}{l}\right)$;

$\frac{\Delta d}{d}$ – относительное изменение диаметра круглого в сечении провода;

$\frac{\Delta l}{l}$ – относительное изменение длины провода под действием деформации.

Разделив обе части последнего выражения на $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$, получим коэффициент тензочувствительности

$$S = \varepsilon_R / \varepsilon_l = m + (1 + 2K_{II}), \quad (6.7)$$

где $m = (\Delta \rho / \rho) / \varepsilon_l$.

Емкостные преобразователи. Принцип действия емкостных преобразователей основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между обкладками.

Для плоского конденсатора с двумя обкладками (пластинами) электрическая емкость определяется выражением

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / d, \quad (6.8)$$

где ε_0 – электрическая постоянная,

ε – относительная диэлектрическая проницаемость;

S – активная площадь обкладок;

d – расстояние между обкладками.

6.2 Генераторные измерительные преобразователи

В отличие от параметрических преобразователей выходной величиной генераторных измерительных преобразователей является ЭДС или заряд, функционально связанные с преобразуемой неэлектрической величиной. В этих преобразователях используется энергия объекта, параметры которого преобразуются, и в этом случае часто нет необходимости в дополнительном источнике энергии, что является определенным преимуществом таких преобразователей. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные генераторные измерительные преобразователи начиная с термоэлектрических, известных под названием термопар.

Термоэлектрические преобразователи. Принцип действия термоэлектрических преобразователей состоит в использовании термоэлектрического эффек-

та, возникающего в цепи термопары (ТП).

На рисунке 6.1 приведены термопара и способ ее подключения к измерительному прибору.

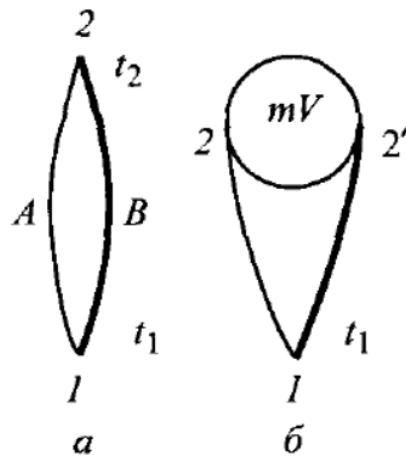


Рисунок 6.1 – Термопара и способ ее подключения к измерительному прибору

При разности температур между точками 1 и 2 соединения двух разнородных проводников A и B , образующих термопару, в цепи термопары возникает термоЭДС. При постоянной температуре точки 2 термоЭДС термопары

$$E_{ТП} = f(t_1) - f(t_2) = f(t_1) - C. \quad (6.9)$$

Индукционные преобразователи. Принцип действия индукционных преобразователей основан на использовании явления электромагнитной индукции

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt},$$

где e – мгновенное значение ЭДС, возникающей на зажимах катушки с числом витков w , если она помещена в магнитное поле с изменяющимся магнитным потоком Φ ;

$\frac{d\Phi}{dt}$ – скорость изменения магнитного потока.

Индукционные ИП иногда называют магнитоэлектрическими генераторами, так как основными элементами в них являются постоянный магнит (реже электромагнит) и катушка. Один из этих элементов является подвижным. Непосредственно индукционные ИП могут использоваться только при измерении скорости механического перемещения как линейного, так и углового. Если в последующей измерительной цепи используются специальные устройства, позволяющие проинтегрировать или продифференцировать во времени выходной сигнал преобразователя, то ИП может быть использован для измерения линейных и угловых перемещений и ускорений.

Наибольшее применение индукционные преобразователи получили при изготовлении приборов для измерения угловой скорости (тахометров) и приборов для измерения параметров вибрации.

Пьезоэлектрические преобразователи. Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на использовании прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов (пьезоэффектов). Эти эффекты наблюдаются в ряде диэлектриков: природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула SiO_2), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например поливинилиденфториде. Материалы, обладающие пьезоэлектрическими свойствами, называются пьезоэлектриками. Сущность прямого пьезоэффекта заключается в электрической поляризации пьезоэлектриков, проявляющейся появлением электрических зарядов на их поверхности, под действием механической деформации. Слово «пьезо» происходит от греческого *piezen*, означающего давление.

Пьезоэффект является обратимым физическим явлением. Обратный пьезоэффект заключается в возникновении в пьезоэлектриках механического напряжения или деформации под действием электрической поляризации.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными видами измерительных преобразователей неэлектрических величин. Решить следующие задачи.

1 Определите температуры двух точек поверхности титанового стержня сечением $S = 25 \text{ мм}^2$, отстоящих друг от друга на расстоянии $l = 80 \text{ мм}$, если известно, что температура точки поверхности стержня, находящейся посередине между этими точками, $\theta_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, а тепловой поток теплопроводности $q = 1 \text{ Вт}$. При решении задачи примите, что теплообмен носит установившийся характер и прочие тепловые потоки, кроме потока теплопроводности, отсутствуют, а коэффициент теплопроводности титана на рассматриваемом участке стержня при заданной температуре $\lambda = 21,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

2 Для индукционного измерительного преобразователя с числом витков $w = 1500$ и площадью среднего витка $S = 600 \text{ мм}^2$ определите зависимость от времени $e(t)$ ЭДС, возникающей при равномерном повороте преобразователя за время $T = 0,1 \text{ с}$ в однородном постоянном магнитном поле с напряженностью 500 А/м из положения, при котором угол α между нормалью и силовыми линиями поля (рисунок 6.2) $\alpha_1 = -45^\circ$, в положение, при котором угол $\alpha_2 = 45^\circ$. Определите значение ЭДС в момент времени $t = 0,05 \text{ с}$.

3 Определить постоянную Пуассона для нихромовой проволоки, если известно, что при растяжении проволоки длиной 1 м на $0,03 \text{ мм}$, ее сопротивление изменилось на $0,05 \%$.

4 Тензорезистор из константановой проволоки длиной 10 см и диаметром $0,02 \text{ мм}$ после упругого растяжения изменил свое сопротивление на $0,05 \%$. Определите величину этого растяжения (коэффициент Пуассона константа на $0,3$).

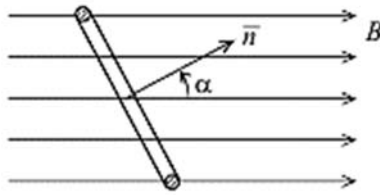


Рисунок 6.2 – Индукционный измерительный преобразователь в магнитном поле

5 Мостовая схема используется для измерения температуры. Сопротивления плеч $R_2 = R_3 = 200$ Ом и $R_1 = 25$ Ом, гальванометр имеет ток полного отклонения 100 мкА и внутреннее сопротивление 750 Ом. Медный датчик имеет сопротивление 25 Ом при 200 °С, ТКС меди 0,00426 1/К. Определить максимальную температуру, которую можно измерить, при питании моста $U = 6$ В.

6 Построить зависимость сопротивления терморезистора, изготовленного из платины, при измерении температуры от минус 100 °С до плюс 150 °С.

7 На сколько изменится сопротивление (в процентах) полупроводникового термистора при нагревании от 20 °С до 500 °С, если константа В для данного полупроводника равна 2000.

8 Для измерения линейного перемещения в диапазоне от 0 до 5 мм используется емкостный первичный преобразователь. Построить зависимость емкости конденсатора от перемещения, если диэлектрическая проницаемость среды равна 2, площадь обкладок конденсатора равна 10 мм².

Контрольные вопросы

1 Какие преобразователи используются для измерения неэлектрических величин?

2 Какие преобразователи используются для измерения температуры?

3 В каком диапазоне изменения температуры могут применяться стандартные платиновые терморезисторы?

4 Для измерения какого диапазона температур применяются стандартные терморезисторы из меди?

5 Какое основное преимущество полупроводниковых терморезисторов?

6 На чем основан принцип действия реостатных преобразователей?

7 В чем заключается тензоэффект?

8 Что необходимо для работы емкостного измерительного преобразователя?

9 На чем основан принцип действия электролитических преобразователей?

Список литературы

- 1 **Гольдштейн, А. Е.** Физические основы получения информации: учебник для прикладного бакалавриата / А. Е. Гольдштейн. – Москва: Юрайт, 2018. – 219 с.
- 2 **Аббакумов, К. Е.** Физические основы получения информации: учебник / К. Е. Аббакумов, Е. М. Антонюк, Ю. В. Филатов. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2013. – 320 с.
- 3 **Бриндли, К.** Измерительные преобразователи: справочное пособие: пер. с англ. / К. Бриндли. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
- 4 **Шишмарёв, В. Ю.** Физические основы получения информации: учебное пособие для вузов / В. Ю. Шишмарёв. – Москва: Академия, 2010. – 448 с.
- 5 Физические основы получения информации : учебник / Г. Г. Раннев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: КУРС; ИНФРА-М, 2018. – 304 с.
- 6 **Раннев, Г. Г.** Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – Москва: Академия, 2004. – 336 с.
- 7 Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин : учебное пособие для среднего профессионального образования / О. А. Агеев [и др.] ; под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2021. – 158 с.