

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Факультет Инновационных технологий

Кафедра управления инновациями

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

по дисциплине «Измерительные преобразователи в технологических системах»

Составлены кафедрой управления инновациями для студентов, обучающихся
по направлению подготовки «Управление качеством»

Форма обучения очная

Составитель
доцент кафедры управления инновациями

П.Н. Дробот
«25» ноября 2018 г.

Томск 2018

Оглавление

Введение.....	3
Материально-техническое обеспечение для практических занятий и самостоятельной работы	4
Прием выполненных практических заданий.....	6
Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей».....	6
Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4.....	6
Тема занятий 2 – «Основы метрологии. Погрешности измерений».....	15
Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4.....	15
Тема занятий 3 «Аппроксимация методом наименьших квадратов» – Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4.....	19
Тема занятий 4 «Измерительная техника. Методы и средства измерения физических величин» – Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям.....	22
Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами» – Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям.....	29
Сборник заданий к практическим занятиям для самостоятельного решения.....	42
Методические указания по самостоятельной работе:	47
Оценочный материал	49
Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	52

Введение

Дисциплина «Измерительные преобразователи в технологических системах» предлагается к изучению студентам магистратуры «Управление качеством» для обучения студентов основам метрологического обеспечения в управлении качеством и изучения современных методов и средств организации измерительного эксперимента на действующих макетах и образцах, а также принципов работы, характеристик современных первичных измерительных преобразователей (датчиков) с целью выработки умений и навыков их использования в профессиональной деятельности.

Дисциплина формирует способность разрабатывать методики проведения экспериментов и проводить эксперименты на действующих макетах и образцах, обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств; готовность разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов. Полученные знания и навыки могут быть использованы в управлении качеством промышленной продукции и услуг.

Практические задания, предусмотренные настоящими указаниями, выполняются студентами во время аудиторных занятий индивидуально под контролем со стороны преподавателя. Все консультации осуществляются преподавателем.

Перед началом занятий студенты должны изучить инструкцию по охране труда. Преподаватель должен убедиться в знании инструкции, задавая студенту вопросы по ее содержанию, после чего сделать соответствующую запись в журнале охраны труда.

Во время проведения практических занятий в аудитории студентам запрещается передавать друг другу файлы и другие материалы, являющиеся результатом выполнения заданий.

Студент имеет право просить консультации у преподавателя, если он в текущий момент не распределяет задания, не принимает выполненные работы и не консультирует другого студента.

Преподаватель, давая консультацию студенту, указывает раздел технической документации или методической литературы, в которой имеется ответ на вопрос студента. Если необходимые сведения в документации и литературе отсутствуют, то преподаватель должен дать устные пояснения или продемонстрировать практические действия, приводящие к требуемому результату, с последующим повторением студентом.

Консультации, выдача практических заданий и прием результатов выполнения осуществляется только во время аудиторных занятий. Задания выполняются последовательно. Правильное выполнение некоторых заданий возможно только, если студент корректно выполнил предыдущие задания. Поэтому приступать к следующему заданию студент может, только сдав преподавателю результат выполнения предыдущего.

Материально-техническое обеспечение для практических занятий и самостоятельной работы

Для практических занятий

Лаборатория управления проектами

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ), помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации, помещение для самостоятельной работы

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 414 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Компьютер WS2 (6 шт.);
- Компьютер WS3 (2 шт);
- Компьютер Celeron (3 шт.);
- Компьютер Intel Core 2 DUO;
- Проектор Nec;
- Экран проекторный Projecta;

- Стенд передвижной с доской магнитной;
- Акустическая система + (2колонки) KEF-Q35;
- Кондиционер настенного типа Panasonic CS/CU-A12C;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

- Microsoft Windows 7 Pro
- OpenOffice

Размещение и освещенность рабочих мест в учебной аудитории (лаборатории) должно удовлетворять действующим требованиям санитарных правил и норм (СанПиН).

Для самостоятельной работы

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы), расположенные по адресам:

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 233 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 201 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 207 ауд.

Состав оборудования: - учебная мебель; - компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц. - 5 шт.; - компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Перечень программного обеспечения:

- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

Прием выполненных практических заданий

Результаты выполнения практических заданий демонстрируются преподавателю. Во время приема выполненной работы преподаватель вправе:

- Требовать у студента демонстрации выполненного задания в виде файлов, таблиц, мнемосхем, рисунков, графиков или диаграмм, в том числе, по возможности и необходимости, в бумажном письменном или распечатанном виде.
- Самостоятельно производить манипуляции с программным обеспечением, не изменяя его конфигурацию.
- Требовать у студента пояснений, относящихся к способам реализации задания.

Задание считается выполненным и принимается преподавателем только в том случае, если получены все результаты, предусмотренные заданием. Если какие то результаты, предусмотренные заданием, не получены или неверны, то задание подлежит доработке.

Студент должен работать внимательно и аккуратно. Подлежат обязательному исправлению замеченные преподавателем недочеты:

- грамматические ошибки;
- небрежное оформление рисунков, графиков, структур, схем;
- неточности в описаниях, структурах, схемах.

Результаты выполнения заданий сохраняются студентом в электронном виде (файлы), а также, если возможно и удобно, в бумажном формате, до получения зачета/экзамена по данной дисциплине.

До начала экзаменационной сессии студент должен сдать результаты выполнения всех практических заданий, предусмотренным настоящими указаниями. В противном случае студенты к сдаче экзамена (зачета) не допускаются.

Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей».

Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4

Цель: Дать студентам определения и основные характеристики, назначение и области применения датчиков. Познакомить с техническими характеристиками и конструктивно-техническими особенностями датчиков. Деление датчиков на виды : активные, пассивные и комбинированные датчики.

Задание 1

Изучите самостоятельно следующий материал и на его основе с помощью поиска

в интернет подберите информацию и напишите обзор на тему «Определения и основные характеристики, назначение и области применения датчиков». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

1. Определения и основные характеристики

Физическая величина – какое-либо свойство физического объекта (предмета, процесса).

Датчик (*сенсор*, от англ. *sensor*) – первичный преобразователь, элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы. Датчик – это устройство, которое, подвергается воздействию физической величины, выдавая эквивалентный сигнал, являющийся функцией измеряемой величины:

$$S = F(m) \quad (1.1)$$

где S – выходная величина датчика,

m – входная величина.

Сигнал (от лат. *signum* — *знак*) – знак, физический процесс или явление, несущие сообщение о каком-либо событии, состоянии объекта, либо передающие команды управления, оповещения и т. д. Посредством совокупности сигналов можно с той или иной степенью полноты представить любое, сколь угодно сложное событие. По своей природе сигнал может быть механическим, тепловым, световым, электрическим, электромагнитным, звуковым и др.

Соотношение (1.1) в общей форме выражает физические законы, положенные в основу работы датчика. Однако характеристики преобразования в численной форме определяются экспериментально в результате градуировки.

Градуировка – измерение значений S для ряда точек известных значений m , что позволяет построить градуировочную кривую.

Градуировка средств измерений (от лат. *gradus* – шаг, ступень, степень), метрологическая операция, при помощи которой средство измерений (меру или измерительный прибор) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Отметки шкалы должны с требуемой точностью соответствовать значениям измеряемой величины, а таблица (кривая) с требуемой точностью отражать связь эффекта на выходе прибора с величиной, подводимой к входу (например, зависимость ЭДС термопары пирометра от температуры её рабочего спая).

На практике целесообразно использовать датчики, у которых существует линейная зависимость между малыми приращениями входной m и выходной S величинами:

$$S = s \times m, \quad (1.2)$$

где s – чувствительность датчика.

Чувствительность – способность объекта реагировать определённым образом на определённое малое воздействие, а также количественная характеристика этой способности.

Важнейшей проблемой при проектировании датчика и использовании датчиков является обеспечение постоянства чувствительности датчика, которая должна как можно меньше зависеть от входной величины, частоты измерений, времени и воздействия других физических величин, характеризующих окружающие объекты.

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Погрешность (Δ) – это разность между показаниями средства измерения (СИ) X и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины (Q):

$$\Delta = X - Q.$$

Случайная погрешность – неизбежна и неустранима.

Систематическая погрешность – постоянная погрешность результата измерений.

Погрешность является показателем точности.

Эталон – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины с целью передачи ее другим средствам измерений данной величины.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в РФ единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Классификация физических величин приведена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Классификация физических величин

Величины		
Реальные		Идеальные
Физические	Нефизические	Математические
Измеряемые		
Оцениваемые		

Таблица 2. Классификация физических величин

	Величины	
Энергетические (активные)	Вещественные (пассивные)	Характеризующие процессы

Энергетические (активные) – т.е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии.

Вещественные (пассивные) – описывающие физические и физико-химические свойства вещества, материалов и изделий из них.

Характеризующие протекание процессов во времени – различного вида спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

Измерения бывают прямые и косвенные: прямые – искомое значение –

непосредственно из опытных данных; косвенные – на основании зависимости между искомой и полученной при прямом измерении величинами.

Средства измерения бывают механические, пневматические, оптические, электрические.

2. Назначение и области применения датчиков

Сравнение биологическая и техническая система принятия, хранения и преобразования информации схематически представлено на Рис.1.

	Биологическая система (человек)	Техническая система (автоматика)
Получение сигнала	Чувства	Датчики
	Обоняние	Газоанализатор
	Вкус	pH-метр
	Слух	Микрофон
		Температура
	Осязание	Перемещение
		Поток
		Усиление и р.д.
	Зрение	Датчик излучения
		Датчик положения
		Телекамера (распознавание образов)
Обработка сигнала	Мозг	ЭВМ
	Память	Запоминающее устройство
Преобразование сигнала	Органы	Исполнительное устройство
	Руки	Механика
	Ноги	
	Речь	Динамик
	Жестикуляция	Индукция
	Письмо	Печать/графопостроение

Рисунок 1. Сравнение биологической и технической систем принятия, хранения и преобразования информации

По назначению и области применения,¹⁰ датчики можно классифицировать:

✓ по измеряемой физической величине

(давление, температура, вибрация, частота вращения, усиление, деформация, линейные скорость и ускорение, длина и плоский угол, влажность, расход, уровень, сплошность, масса, состав и свойства жидкостей и газов и т.д.);

✓ по характеру изменения измеряемой физической величины

(квазистатические, статические, динамические, импульсные);

✓ по свойствам физической величины

(агрессивная, неагрессивная);

✓ по контакту с измеряемой величиной

(контактные, бесконтактные);

✓ по категории применения (многократное,

непрерывное, однократное, общее);

✓ по этапам применения

(разработка, производство, испытание, эксплуатация);

✓ по условиям эксплуатации

(обычные, умеренно холодные, тропические и т.д.);

✓ по виду объектов применения

(наземные стационарные, наземные подвижные, морские, авиационные, космические, универсальные);

✓ по области применения

(приборы и системы управления, приборы и системы регулирования, приборы и системы контроля, измерительные системы, системы диагностирования, приборы и системы сигнализации, системы жизнеобеспечения, системы энергопитания, навигационные системы, телеметрические системы, производственные роботизированные системы).

3. Технические характеристики

Для установления технических характеристик датчиков используют различные методики измерения этих характеристик.

Методика (метод) измерений – совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Для проведения измерений интересующих технических характеристик необходимо наложить ограничения на воздействующие величины, чтобы они не влияли на исследуемую величину. Например, когда говорят об относительной влажности,

обязательно указывают при какой температуре¹¹проводятся измерения (относительная влажность 80% при температуре 25⁰ С).

Внешние воздействующие факторы (ВВФ) можно разделить на механические, климатические, электрические, биологические, радиационные, световые и т.д. В Технических условиях и, как правило, в инструкции по эксплуатации на любой датчик указывают его диапазон измерений, точность (погрешность) и условия эксплуатации.

Для исключения погрешности измерений, связанных с измерением одной и той же величины при разных внешних условиях и корректного сопоставления результатов исследований, необходимо указывать условия проведения исследований.

Как правило, техническими характеристиками датчика являются: диапазон чувствительности (отношение изменения сигнала Δy на выходе СИ к вызвавшему это изменение изменению Δx сигнала на входе ($S=\Delta y/\Delta x$)), диапазон измерений (область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ), предел измерений (наибольшее или наименьшее значение диапазона измерения), цена деления шкалы (разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы), погрешности, габаритные размеры, масса, а так же требования к электропитанию и т.д.

Шкалы измерений: Шкалы наименований (классификации) (основаны на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен, (например шкала цветов), шкалы порядка (рангов) (описывают свойства величин, упорядоченные по возрастанию или убыванию оцениваемого свойства, например определение твёрдости или вязкости), шкалы интервалов (разностей) (дальнейшее развитие шкал порядка, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности (равнозначности), порядка и аддитивности (прибавления), например шкала Цельсия), шкалы отношений (описывают свойства величин, для множества количественных проявлений которых применимы логические отношения эквивалентности, порядка и пропорциональности, а для некоторых шкал отношение суммирования, например шкала масс).

Быстродействие – это параметр датчика, позволяющий оценить, как выходная величина следует во времени за изменениями измеряемой величины.

Параметр, используемый для количественного описания быстродействия

– это время установления, т. е. интервал времени, который должен пройти после ступенчатого изменения измеряемой величины, чтобы сигнал на выходе датчика достиг уровня, отличающегося на определенную, обычно фиксированную величину от установившегося значения.

Чем меньше время установления, тем выше быстродействие датчика.

В случае ступенчатого изменения измеряемой величины обычно

а) *время задержки нарастания* - время, необходимое для того, чтобы сигнал на выходе увеличился от начального значения до 10% своего полного изменения;

б) *время нарастания*, соответствующее увеличению выходного сигнала от 10 до 90% своего полного изменения.

Задание 2

Изучите самостоятельно следующий материал и на его основе с помощью поиска в интернет подберите информацию и напишите эссе на тему «Активные, пассивные и комбинированные датчики». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю

Активные, пассивные и комбинированные датчики

Активные датчики

Принцип работы активных датчиков основан на физическом явлении, обеспечивающем преобразование соответствующей измеряемой величины в электрическую форму сигнала.

Таблица 3 Используемый эффект в активных датчиках

Измеряемая величина	Используемый эффект	Выходная величина
Температура	Термоэлектрический	Напряжение
Поток оптического излучения	Пироэлектрический	Заряд
	Внешний фотоэффект	Ток
	Внутренний фотоэффект	Напряжение
Механическое воздействие (сила, ускорение, давление)	Пьезоэлектрический	Напряжение
Скорость, перемещение	Электромагнитный	Напряжение
Перемещение	Эффект Холла	Напряжение

Пироэлектрический эффект – заключается в том, что ряд кристаллов испытывают спонтанную электрическую поляризацию, зависящую от температуры, и на двух противоположных поверхностях появляются электрические заряды противоположных знаков. Поглощённый кристаллом поток излучения приводит к росту его температуры и к соответствующему изменению поляризации. Напряжение на зажимах конденсатора будет пропорционально значению потока оптического излучения.

Пьезоэлектрический эффект – изменение механического напряжения в кристалле пьезоэлектрика, например кварца, приводит к деформации, вызывающей появление на противоположных поверхностях кристалла одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов. Таким образом, изменение силы или приводимых к ней величин (давления, ускорения) осуществляется измерением напряжения между зажимами пьезоэлектрика.

Эффект электромагнитной индукции – при перемещении проводника в постоянном электромагнитном поле, возникает ЭДС, пропорциональная скорости

Внешний фотоэффект – наблюдается в вакуумном фотоэлементе. Под воздействием светового потока фотоэлектроны покидают освещённый фотокатод и образуют пропорционально освещённости ток, текущий к аноду под действием электрического поля.

Внутренний фотоэффект – наблюдается в полупроводниковом фотодиоде, электроны и дырки образованные в окрестностях $p-n$ – перехода в полупроводнике, перемещаются под действием электрического поля, вызывая изменение напряжения на границах полупроводника.

Фотоэлектромагнитный эффект – наблюдается в датчиках, содержащих чувствительный полупроводниковый монокристалл, размещённый между наконечниками магнита.

Поток оптического излучения, поглощённый поверхностью кристалла, создаёт вблизи неё повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, диффундирующих внутрь кристалла. Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в противоположные стороны, и между электродами устанавливается разность потенциалов, пропорциональная освещённости. Фотоэлектрический эффект является основой фотометрии и обеспечивает передачу информации, носителем которой является свет.

Эффект Холла – принцип работы датчиков на основе эффекта Холла заключается в том, что при пропускании электрического тока через пластину полупроводника, находящейся в однородном магнитном поле в направлении, перпендикулярном полю, возникает ЭДС. Постоянный магнит датчика механически связывают с объектом, и при смещении магнита пропорционально изменяется выходное напряжение датчика.

Пассивные датчики

В пассивных датчиках параметры комплексного сопротивления (импеданса) могут меняться под воздействием измеряемой величины. На величину комплексного сопротивления оказывают влияние два основных фактора: геометрия и размеры элементов датчика. Помимо этих факторов на величину комплексного сопротивления оказывают влияние: свойства материалов датчика, такие как: удельное сопротивление, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость.

Таблица 4 Используемые эффекты в пассивных датчиках

Измеряемая величина	Изменяющаяся электрическая характеристика датчика	Тип используемого материала
Температура	Сопротивление	Металлы (платина, никель, медь), полупроводники
Сверхнизкие температуры	Диэлектрическая проницаемость	Стекло, керамика

Поток оптического излучения	Сопротивление	Полупроводники
Деформация	Сопротивление	Сплавы никеля
Перемещение	Магнитная проницаемость	Ферромагнитные сплавы
Влажность	Диэлектрическая проницаемость	Хлористый литий, полимеры

Электрические свойства материала и состояние чувствительного элемента зависят от переменных физических величин: температуры, давления, влажности, освещённости и т.д. Если менять только одну величину, а остальные поддерживать постоянными, то по градуировочной кривой, можно оценить соответствие между значениями этой величины и комплексным сопротивлением. Зная градуировочную кривую, по результатам измерения комплексного сопротивления можно определить значение измеряемой величины.

Комплексное сопротивление пассивного датчика и его изменение можно измерить только включив датчик в специальную электрическую схему, содержащую источник питания и схему формирования сигнала.

Наиболее часто используются измерительные схемы следующих видов: потенциометрическая схема, содержащая соединённые параллельно источник напряжения и датчик – потенциометр;

мостовая схем, разбаланс которой характеризует изменение импеданса датчика; колебательный контур, включающий комплексное сопротивление датчика.

Комбинированные датчики

В случаях, когда не электрические величины не удаётся преобразовать в электрическую величину, осуществляют двойное преобразование исходной величины – в промежуточную не электрическую величину, которая преобразуется затем в выходную электрическую величину. Совокупность двух измерительных преобразований образуют комбинированный датчик.

Подобные преобразования удобны для измерения механических величин, вызывающих в первичном преобразователе деформацию или перемещение выходного элемента к которому чувствителен вторичный преобразователь.

Давление можно измерять с помощью мембраны, служащей первичным преобразователем, деформация которой преобразуется в электрическую величину датчика, реагирующим на механическое смещение. Так мембрана электродинамического микрофона является первичным преобразователем, деформация которой, вызванная воздействием акустического давления, преобразуется в электрический сигнал.

Тема занятий 2 – «Основы метрологии.¹⁵Погрешности измерений».

Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4

Цель: дать студентам знания о метрологических характеристиках, погрешностях и чувствительности датчиков, о быстродействии и градуировке датчиков.

Задание 1 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Метрологические характеристики, погрешности и чувствительности датчиков». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Метрологические характеристики

Датчик является первым элементом измерительного канала, поэтому обязательно должны оцениваться их метрологические характеристики. Мы не будем их изучать подробно, но хотя бы перечислим и определим некоторые понятия.

1. Погрешность измерения

Истинное значение измеренной величины не знает никто. Можно только зафиксировать общую реакцию измерительной системы на воздействующий фактор (и это тоже приблизительно, т.к. на систему измерений влияют и другие факторы). Эта реакция, выраженная в единицах измеряемой величины, есть измеренное значение. Разность между измеренным значением и истинным значением есть погрешность измерения. Понятно, что и погрешность измерения можно оценить только приближенно, поскольку неизвестно истинное значение. Если это понимать и принимать определённые меры, то можно оценить значение измеряемой величины с известной точностью.

Погрешности разделяют на систематические и случайные.

Систематические погрешности возникают по следующим причинам:

- 1) Погрешности значения опорной величины (смещение нуля прибора, неточность опорного напряжения, температурная погрешность и др.).
- 2) Погрешности характеристик датчика (линейность различных образцов отличается, старение датчика).
- 3) Погрешности, связанные со способом или условиями применения – датчик всегда влияет на исследуемую систему. Сюда же относятся ошибки, связанные с временными параметрами (время установления сигнала), влияние саморазогрева датчика и исследуемого объекта и др.
- 4) Дефекты обработки данных измерений (ручных или автоматических).

Случайные погрешности. Здесь можно выделить 2 группы факторов.

- 1) Погрешности, связанные с собственными параметрами измерительной аппаратуры:

Порог чувствительности - ниже определённого предела ε_i датчик уже не реагирует на вариации сигнала.

Погрешность считывания ε_n - это характерно не только для оператора, но и для автоматики тоже - на какие вариации сигнала она способна отреагировать. В сумме эти две погрешности образуют погрешность разрешения ε_p :

$$\varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_n^2}.$$

Погрешность гистерезиса проявляется в наличии зависимости выходного сигнала от предшествующих состояний измерительной системы.

Погрешность квантования – возникает, если в измерительной системе есть АЦП.

2) Погрешности (связанные с внешними факторами) от наличия в измерительной цепи паразитных сигналов случайного характера (это шумы, наводки, флуктуации напряжений питающих устройств, временной дрейф и др.).

2. Пределы применимости датчиков

Их много.

Это, во-первых, условия, где они могут работать. Причём пределы эти могут соответствовать области номинального значения параметров датчика:

- области обратимого ухудшения параметров,
- области необратимого ухудшения параметров.

Во-вторых, каждый датчик имеет ограниченный диапазон измерения величины. Для одного и того же датчика эти пределы измерения могут быть различными, например, при соблюдении той или иной точности.

3. Чувствительность.

В общем случае чувствительность S определяется как отношение вариации сигнала ΔS на выходе к изменению Δm измеряемой величины, вызываемую эту вариацию сигнала:

$$S = \frac{\Delta S}{\Delta m}.$$

В общем случае чувствительность определяется при данном уровне измерений величины.

$$m = m_i$$

Размерность S определяется природой датчика, например, мкВ/°С- чувствительность термопары. Важный параметр, от которого зависит чувствительность, является скорость (частота) изменения измеряемой величины. Различают статический режим работы (изменение во времени очень мало) и динамический режим работы. Некоторые датчики работают только в динамическом режиме (микрофон).

Изменение чувствительности в функции от частоты, связаны с механической, тепловой или электрической инерцией датчика и схемы обработки сигнала.

Выраженная в наиболее общей форме связь между величинами S и m представляет собой дифференциальное уравнение первого или второго порядка. Его решение определяет зависимость S и m в диапазоне частот по модулю и фазе.

4. Линейность характеристики.

Система линейна в том диапазоне измеряемых¹⁷ величин, где её чувствительность не зависит от значения измеряемой величины. Это удобно, поэтому даже если датчик нелинеен, в измерительную систему вводят элементы линеаризации (т.е. коррекции).

Задание 2 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Быстродействие и градуировка датчиков». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Метрологическое обеспечение датчиков включает в себя эталоны и образцовые меры, эталонные и образцовые измерители различных физических величин, поверочные схемы передачи точности от образцовых средств измерений рабочим средствам, систему нормативных документов, регламентирующих деятельность в области метрологии.

Развитие специального приборостроения, главным образом предназначенного для использования в ракетно-космической технике, а также в смежных специальных отраслях, потребовало создания целого парка специальных образцовых установок и измерительных средств, а также специальных испытательных установок, воспроизводящих на высоком метрологическом уровне и в широких диапазонах измерения параметров рабочих и дестабилизирующих величин. Эта работа производилась в основном Научно-производственным объединением измерительной техники (г. Королев Московской области) и Научно-исследовательским институтом физических измерений (г. Пенза) Министерства общего машиностроения СССР и ведущими институтами Госстандарта СССР (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, ВНИИФТРИ, СФВНИИМ, ВНИИОФИ и др.), начиная с 60-х годов.

Результатом этой работы явилось создание в составе НПО ИТ Государственного испытательного метрологического центра (ГИМЦ), включающего и метрологическую базу НИИФИ.

Метрологическая испытательная база НПО ИТ включает в себя более 300 единиц метрологического оборудования, включая 60 образцовых средств измерений первого разряда, 10 Эталонов-копий, 45 высокопроизводительных испытательных установок для проведения механических и климатических испытаний и исследований функций влияния на датчик и другие СИ.

Градуировка (нем. *graduieren* «градуировать» от лат. *gradus* «шаг, ступень, степень») средств измерений, иногда тарирование — метрологическая операция, при помощи которой средство измерений (меру или измерительный прибор) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Отметки шкалы должны с требуемой точностью соответствовать значениям измеряемой величины, а таблица (кривая) с требуемой точностью отражать связь эффекта на выходе прибора с величиной, подводимой ко входу (например, зависимость ЭДС термопары пирометра от температуры её рабочего спая).

Градуировка производится с помощью более точных, чем градуируемые, средств измерений, по показаниям которых устанавливают действительные значения измеряемой

величины. Точные средства измерений¹⁸ градуируются индивидуально, менее точные снабжаются шкалой, напечатанной заранее, или стандартной таблицей (кривой) градуировки. Применение типовых шкал или стандартных градуированных таблиц требует иногда регулировки средств измерений с целью доведения их погрешностей до установленных нормами.

Градуировка датчиков в НПО ИТ может осуществляться в следующих диапазонах и при следующих погрешностях:

Температура

Диапазон, °С	-260...0	-50...+300	0...100	100...1500	300...2000	
Погрешность, °С	0,05	0,01	0,1...1,0	0,1	1...10	0,5...10

Тепловой поток

Диапазон, кВт/м ²	0...2·10 ³	Погрешность, %	±6
------------------------------	-----------------------	----------------	----

Высоко- и низкочастотные виброускорения

Диапазон, м/с ²	1...10 ⁵	Погрешность, %	±4
----------------------------	---------------------	----------------	----

Ударные ускорения Диапазон, м/с² 1...10⁵ Погрешность, % ±10

Виброскорость Диапазон, мм/с 0,2...100 Погрешность, % ±6

Расход жидкости Диапазон, л/с 5·10⁻³...5 1...10 5...50 10...200 10...300

Погрешность, % ±0,2 ±0,25 ±0,3 ±0,35 ±0,5

Уровень жидкости Диапазон, мм 0...200 10...1000 50...2500

Погрешность, % ±0,2 ±0,33 ±0,35

Плотность жидкости Диапазон, кг/м³ 700...1800 Погрешность, % ±0,5

Влажность Диапазон, % 25...98 Погрешность, % ±0,5

Сплошность (неоднородность) газожидкостного потока

Диапазон, % 70...100 Погрешность, % ±1

Градуировка датчиков

НИИФИ имеет метрологическое оборудование для градуировки следующих датчиков:

Абсолютное давление

Диапазон, Па 10⁻²...7·10⁻⁵ 1,0⁻²...1,3·10⁻⁵

Погрешность, % 2...0,005 0,02...0,005

Избыточное давление Диапазон, Па 3·10⁻²...1600 Погрешность, % 0,8...0,05

Переменное давление Уровень статического давления, МПа..до150

Частотный диапазон, Гц.....до 30000

Деформация $O.e \delta$2·10⁻⁵...5·10⁻³

Температура, °С.....196...500

Создаются установки в соответствии с требованиями ГОСТ 8.543-86

Крутящий момент Диапазон, Н×м 1...2500 Погрешность, % 0,2

Сила Диапазон, мН 1·10⁻³...5 Погрешность, % 0,1...0,2

Линейное ускорение Диапазон, м/с² 10⁻³...4000 Погрешность, % 1...3

(частотный диапазон 0,5...5000 Гц) 10^{-3} ...3500195...0,1 (статическая характеристика)

Угловые ускорения Диапазон, рад/с² 0,05...100 Погрешность, % 0,1...1

Постоянные ускорения Диапазон, м/с² 0,25...3000 (частотный диапазон 0,05...100 Гц)
Погрешность, % 5...0,5

В НПО ИТ разработана автоматизированная система метрологических испытаний (АСМИ), которая автоматизирует как сам метрологический эксперимент (воспроизведение образцовых значений физических величин по программе), так и обработку результатов измерений, а также хранение и выборку метрологической информации.

АСМИ обеспечивает параллельное объединение нескольких метрологических экспериментов в режиме реального времени с удаленных терминалов. АСМИ имеет максимальную скорость метрологической обработки 5000 изм/с. Число коммутируемых каналов при трехпроводном включении до 100. Диапазон измеряемых напряжений до 10 В. Удаленность терминалов до 500 м. Скорость обмена информацией 4 Кбайт/с. Режим передачи информации дуплексный.

Тема занятий 3 «Аппроксимация методом наименьших квадратов» – Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям 1 – 4

Цель : научить студентов проводить аппроксимацию экспериментальных результатов

Изучите самостоятельно предложенный материал

При анализе измеренных N пар значений $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$ и аппроксимации полученной зависимости прямой линией $y=A+Bx$ решаются две основные задачи:

1) определение наилучших оценок постоянных A и B , основанных на данных $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$, то есть нахождение прямой линии, которая наилучшим образом аппроксимирует результаты измерений;

Рассмотрим первую задачу аппроксимации. Для упрощения будем предполагать, что погрешность в измерениях x пренебрежимо мала, в противном случае анализ существенно усложняется. Такое предположение очень часто оправдывается на практике. Например, при измерении ВАХ (см. рис. 1.3) напряжение U подавалось от стабилизированного источника питания и точно измерялось. Сделаем еще одно допущение, разумное для многих экспериментов. Предположим, что все погрешности в y одинаковы по величине, если говорить точнее, что результат измерения каждого y_i подчиняется распределению Гаусса с одинаковой шириной σ_y во всех измерениях и с центром на истинном значении Y_i , которое можно было бы вычислить, зная параметры A и B :

$$Y_i = A + Bx_i. \quad (1.24)$$

оценки метода наименьших квадратов для постоянных A и B :

$$A = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i \right)}{D}; \quad (1.27)$$

$$B = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{D}, \quad (1.28)$$

где

$$D = N \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2. \quad (1.29)$$

Формулы (1.27) и (1.28) дают наилучшие оценки постоянных A и B для прямой линии $y = A + Bx$, основанные на измеренных точках $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$. Получившаяся линия называется *линией аппроксимации методом наименьших квадратов* этих данных, или *линией регрессии* y от x .

Оценка σ_y будет определяться суммой квадратов отклонений:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - A - Bx_i)^2}, \quad (1.30)$$

где A и B определяются выражениями (1.27) и (1.28).

абсолютные погрешности A и B определяют простым расчетом ошибок в косвенных измерениях, исходя из погрешности σ_y для y_1, \dots, y_N :

$$(\Delta A)^2 = \sigma_A^2 = \sigma_y^2 \sum_{i=1}^N x_i^2 / D; \quad (1.31)$$

$$(\Delta B)^2 = \sigma_B^2 = N \sigma_y^2 / D, \quad (1.32)$$

где D определяется выражением (1.29).

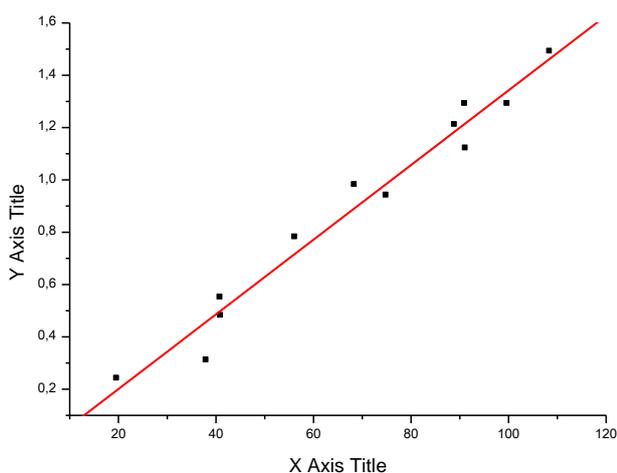
Построив график измеренной зависимости и проведя через точки экспериментальных результатов линию аппроксимации, необходимо от каждой точки отложить вертикальные черточки ошибок длиной в одно стандартное отклонение (1.30) по каждую сторону от точки. Тогда мы можем видеть, действительно ли измеренные точки лежат разумно близко к линии. Если это так, то измерения подтверждают наше предположение, что x и y связаны линейно.

Задание 1 На основе предложенного материала и соответствующих ему материалов из интернет напишите эссе на тему «Методы аппроксимации»

Задание 3 На основе предложенного материала и соответствующих ему материалов из интернет напишите эссе на тему «Метод наименьших квадратов и почему он так называется»

Задание 4 На основе предложенного материала и соответствующих ему материалов из интернет напишите эссе на тему «Аппроксимация и интерполяция – основные отличия»

Задание 5 В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных



Data1		
	A[X]	B[Y]
1	19,76	0,24
2	38,09	0,31
3	40,95	0,55
4	41,08	0,48
5	56,29	0,78
6	68,51	0,98
7	75,01	0,94
8	89,05	1,21
9	91,13	1,29
10	91,26	1,12
11	99,84	1,29
12	108,55	1,49
13		

Проверочный ответ : $A = -0,085 \pm 0,056$; $B = 0,0143 \pm 8,09162E-4$

Задание 6 В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных

Data3		
	A[X]	C[Y]
1	19,76	0,11758
2	38,09	0,1726
3	40,95	0,40789
4	41,08	0,33255
5	56,29	0,68888
6	68,51	0,97015
7	75,01	0,91136
8	89,05	1,331
9	91,13	1,46516
10	91,26	1,1853
11	99,84	1,46516
12	108,55	1,81878

Проверочный ответ :

$A = -0,41404 \pm 0,08809$; $B = 0,01932 \pm 0,0012$

Задание 7 В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных

Data4		
	A[X]	D[Y]
1	19,76	0,02627
2	38,09	0,05046
3	40,95	0,21773
4	41,08	0,15387
5	56,29	0,53069
6	68,51	0,94979
7	75,01	0,85404
8	89,05	1,62593
9	91,13	1,91427
10	91,26	1,33508
11	99,84	1,91427
12	108,55	2,76455

Проверочный ответ : $A = -0,48803 \pm 0,18687$; $B = 0,23325 \pm 0,02539$

Тема занятий 4 «Измерительная техника. Методы и средства измерения физических величин» –Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям

Цель: дать студентам знания о формировании сигналов пассивных датчиков. Познакомить с потенциометрическими схемами с резистивными, индуктивными и емкостными датчиками. Дать сведения о мостовых схемах и об измерении сопротивлений мостом Уитсона.

Задание 1 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Формирование сигналов пассивных датчиков. Потенциометрические схемы с резистивными, индуктивными и емкостными датчиками». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Схемы формирования сигналов пассивных датчиков

Измеренная величина m изменяет, например импеданс Z_c пассивного (параметрического) датчика. Эти изменения могут быть преобразованы датчиком в электрический сигнал путем включения в измерительную схему с источником напряжения ε_s или тока I_s . Схема сама характеризуется собственным импедансом Z_k и измеряемая величина преобразуется в напряжение выходного электрического сигнала:

$$V_m = \varepsilon_s P(Z_k, Z_c).$$

Проще всего это достигается применением потенциометрических или мостовых схем. В более сложных генераторных схемах измеряемая величина преобразуется в изменение частоты

$$F_m = G(Z_k, Z_c).$$

Генераторы могут быть источниками синусоидальных и прямоугольных сигналов; информация содержится в частоте этих сигналов, ширине импульсов, что повышает помехозащищенность системы. Есть системы с временной модуляцией.

Потенциометрические и мостовые схемы проще, в них источником питания может служить источник постоянного или переменного тока. В последнем случае выходной сигнал схемы

является результатом моделирования питающего напряжения сигналом Z_c . Если питание переменное, необходимо чтобы частота источника минимум в 5 раз превышала максимальную частоту изменения измеряемой величины. Для извлечения информации, выходной сигнал нужно протектировать и отфильтровать.

Рассмотрим сначала самые простые схемы.

Потенциометрические схемы с резистивными датчиками

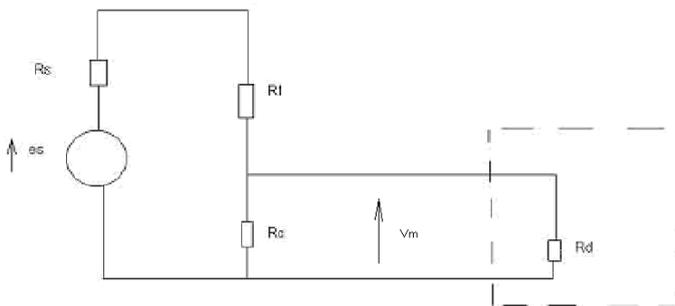


Рис. 3. Схема включения резистивного сенсора

Датчик с сопротивлением R_c , изменяющимся под действием измеряемого фактора (например, тензорезистор), включен последовательно с постоянным резистором R_1 (в некотором смысле его можно назвать нагрузочным). Схема питается от постоянного или переменного источника с ЭДС e_s и внутренним сопротивлением R_s и измеряется прибором с выходным сопротивлением R_d . Легко получить:

$$V_m = e_s \frac{R_c R_d}{R_c (R_s + R_1) + R_d (R_c + R_s + R_1)}$$

Если $R_d \gg R_c$, что обычно обеспечивается, то

$$V_m = e_s \frac{R_c}{R_c + R_s + R_1}$$

и является нелинейной функцией R_c . Желательно эту функцию линеаризировать, т.е. получить измененное ΔV_m пропорционально вариациям ΔR_c сопротивления датчика. Этого можно добиться разными путями, например, можно ограничиться работой на малом участке характеристики изменения сопротивления. Сопротивление датчика меняется от R_{c0} до $R_{c0} + \Delta R_c$, вызывая изменения напряжения от V_{m0} до $V_{m0} + \Delta V_m$. Зависимость ΔV_m от R_c можно получить, взяв дифференциал от V_m и переходя к малым приращениям, т.е. полагая

$$\Delta R_c \ll R_{c0} + R_1 + R_s$$

$$\Delta V_m = e_s \frac{\Delta R_c (R_c + R_1 + R_s) - R_c \Delta R_c}{(R_{c_0} + R_1 + R_s)^2} = e_s \frac{(R_1 + R_s) \Delta R_c}{(R_{c_0} + R_1 + R_s)^2}$$

Эта зависимость линейна при малых ΔR_c . Максимальная чувствительность схемы получится при $R_s + R_1 = R_{c_0}$; в этом случае

$$\Delta V_m = \frac{e_s \Delta R_c}{4 \Delta R_{c_0}}$$

Дифференциальное включение датчиков

Для компенсации воздействия влияющих величин (температуры, помех) используют вариант схемы в которой вместо резистора R_1 включен второй датчик, (рис.4), идентичный по чувствительности первому, но с противоположным по знаку изменением $-\Delta R_c$, т.е. один имеет вариацию сопротивления $+\Delta R_c$ а другой $-\Delta R_c$. Для нее можно получить

$$\Delta V_m = e_s \frac{\Delta R_c}{2 R_{c_0} + R_s}$$

Если $R_s \ll R_{c_0}$, то чувствительность схемы с дифференциальным включением датчиков вдвое больше предыдущей

$$\Delta V_m$$

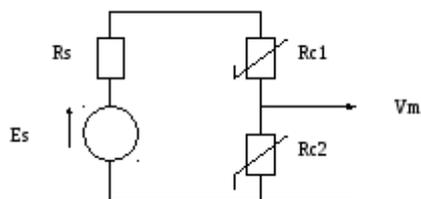


Рис. 4. Дифференциальное включение датчиков

Недостатком потенциометрических схем является наличие в выходных сигналах постоянной составляющей, не содержащей полезной информации. Кроме того, ее колебания (т.е. колебания напряжения источника питания e_s) воспринимаются схемой как сигнал, т.е. привносит ошибку. Поэтому используют мостовые схемы.

Задание 2 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Мостовые схемы. Измерение сопротивлений мостом Уитсона». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Использование мостовых схем

Чаще всего тензорезисторные (или другие первичные преобразователи сигнала) включаются по мостовой схеме. Это позволяет существенно повысить чувствительность датчиков, особенно в

области малых сигналов (на пороге чувствительности), а также линейность, помехозащищённость и температурная стабильность датчиков. Мосты могут быть на резисторах или ёмкостях. Разберёмся в работе мостовой резисторной схемы (рис.5) (аналогично работает ёмкостной мост) на примере моста постоянного тока.

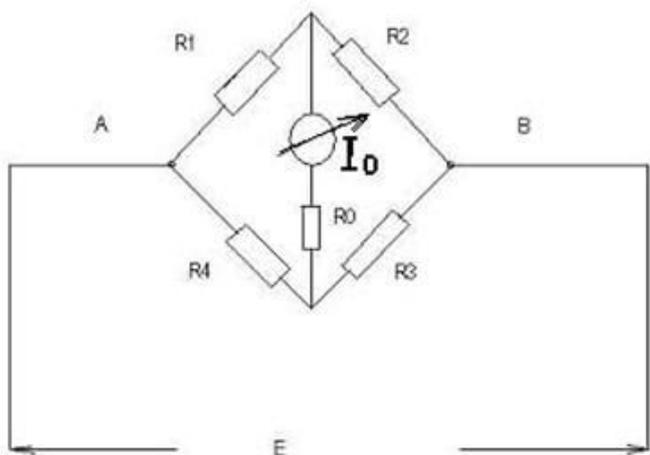


Рис 5. Мостовая резисторная схема

Если мост в равновесии и ток в диагонали отсутствует $I_0=0$, то потенциалы точек С и Д одинаковы; тогда точки через резисторы тоже попарно одинаковы, $I_1=I_2$; $I_3=I_4$. Поэтому выполняется условие:

$$I_1 R_1 = I_4 R_4,$$

$$I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Взяв отношения левых и правых частей этих равенств, получим

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3},$$

или

$$R_1 R_3 = R_2 R_4.$$

То есть, для получения баланса необходимо, чтобы произведения сопротивлений резисторов в противоположных плечах моста были одинаковы.

Обычно мост сбалансирован в точке, соответствующей нулевому значению измеряемой величин. При внешнем воздействии, которое подлежит измерению одно, два или все четыре сопротивления изменяются и баланс моста нарушается, что приводит к разности потенциала между точками С и Д, к появлению тока в измерительной диагонали I_0 .

При небольших разбалансах моста можно получить близкую к линейной зависимость между током I_0 (или разбалансом напряжений между точками С и Д равным U_0) и внешним воздействием, т.е. проградуировать прибор I_0 в единицах измерения фактора, вызывающего изменение сопротивления резистора. В случае больших разбалансов необходимо сбалансировать

мост искусственным изменением сопротивления одного из плеч. В этом случае мост выступит в роли индикатора баланса.

Связь между токами (напряжением) моста и значениями сопротивлений резисторов в общем случае можно установить, используя методы контурных токов или узловых напряжений. В принципе это не очень сложно, но достаточно громоздко. Поэтому приведём сразу расчётные соотношения для различных случаев питания моста и измерения разбаланса.

1. Источник питания имеет ЭДС e_s с внутренним сопротивлением R_s ; в измерительной диагонали измеряется ток I_0 :

$$I_0 = e_s \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{A R_s + B},$$

где

$$A = R_0(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 - R_4)(R_2 + R_3);$$

$$B = R_0(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_4(R_2 + R_3) + R_2 R_3(R_1 + R_4).$$

2. Мост питается от стабильного источника напряжения U ; измеряется ток I_0 :

$$I_0 = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{B}.$$

3. Мост питается от источника тока I , измеряется I_0 :

$$I_0 = I \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{A}.$$

4. Ток в измерительной диагонали практически не потребляется (R_0 велико), измеряется U_0 устройством с высокоомным входом; мост питается от источника ЭДС e_s с сопротивлением R_s :

$$U_0 = e_s \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) R_s + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

5. Мост питается напряжением U , измеряется U_0 :

$$U_0 = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

6. Мост питается стабильным током I , измеряется U_0 :

$$U_0 = I \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Под чувствительностью S_m мостовой схемы обычно понимается изменение ΔI (ΔU_0) или мощности ΔP_0 в диагонали моста, приходящееся на единицу относительного изменения сопротивлений плеч моста, т.е.

$$S_{mi} = \frac{\Delta I}{\frac{\Delta R_i}{R_i}}, \quad S_{mu} = \frac{\Delta U_0}{\frac{\Delta R_i}{R_i}}, \quad S_{mp} = \frac{\Delta P}{\frac{\Delta R_i}{R_i}}.$$

Можно доказать, что максимальная чувствительность моста получается при равенстве сопротивлений его плеч $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. При этом приведённые расчётные соотношения существенно упрощаются.

Понятно, что при использовании мостовых методов для измерения каких – либо физических величин, для повышения чувствительности целесообразно включать резисторы, изменяющиеся в одну сторону, в противоположных плечах моста, т.к. это увеличивает разбаланс при изменении сопротивлений.

Пусть мост питается стабильным питанием и с его диагонали снимается напряжение U , тогда (вариант 5):

$$U_{\phi} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Предположим, что все резисторы для повышения чувствительности выбраны одинаковыми по величине, и мост сбалансирован, тогда $U_0 = 0$.

Нас интересует зависимость U_0 от изменения одного (или нескольких) сопротивлений, величина которых меняется по каким – либо причинам, в частности, от давления. Если это сопротивление R_1 , то нас интересует зависимость

$$U_{\phi} = F\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)$$

Определим её. Для этого возьмём производную от исходного выражения для U_0 по R_1 :

$$\begin{aligned} \frac{dU_{\phi}}{U} &= \frac{R_3(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) - (R_3 + R_4)(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_3 + R_4)^2 (R_1 + R_2)^2} dR_1 = \\ &= \frac{R_1 R_3 + R_2 R_3 - R_1 R_3 + R_2 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)^2} dR_1 = \frac{(R_3 + R_4)R_2}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)^2} dR_1 = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \frac{dR_1}{R_1} \end{aligned}$$

Перейдя к малым конечным приращениям $dR = \Delta R$, $dU_0 = \Delta U_0$ и полагая $R_1 = R_2 = R$, получим

$$\frac{\Delta U_{\phi}}{U} = \frac{\Delta R}{4R}$$

Если одновременно изменяются (в одну сторону) 2 резистора, их целесообразно включить в противоположные плечи моста и чувствительность удваивается, т.е.

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta R}{2R}$$

Если активны все 4 резистора с попарно противоположными знаками приращения, чувствительность снова удваивается и

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta R}{R}$$

Далее полученный сигнал обычно усиливается и поступает на дальнейшую обработку (рис. 6).

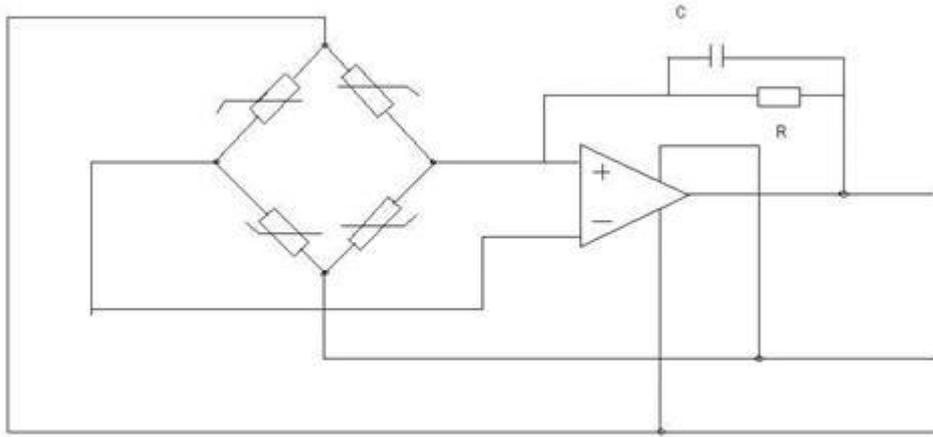


Рис. 6. Измерительный мост со схемой интерфейса

Измерение сопротивлений мостом Уитстона

Цель: знакомство с принципом действия мостиковой схемы и измерение нескольких сопротивлений мостиком Уитстона.

Классическим методом измерения сопротивлений проводников является метод моста постоянного тока. На рисунке изображена схема простейшего моста, называемого обычно мостом Уитстона. Он состоит из реохорда АВ, чувствительного гальванометра G и двух сопротивлений – известного R и неизвестного R_x . Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт D.

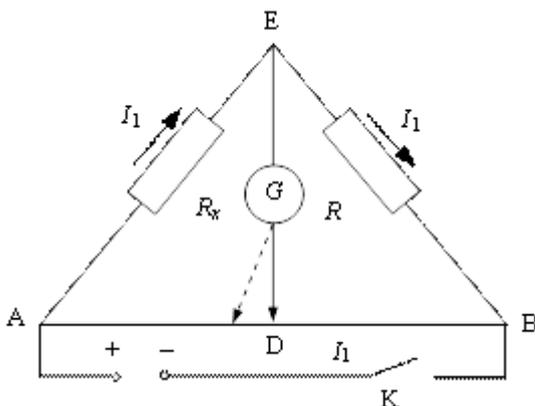


Рис. 1

Рассмотрим схему без участка ED. Замкнем ключ K, тогда по проволоке АВ потечет ток и вдоль нее будет наблюдаться равномерное падение потенциала от величины φ_A в точке А до величины φ_B в точке В. В цепи АЕВ пойдет ток I_1 и будет наблюдаться падение потенциала от φ_A до φ_E (на сопротивлении R_x) и от φ_E до φ_B (на сопротивлении R). Очевидно, что в точке E потенциал имеет промежуточное значение φ_E между значениями φ_A и φ_B . Поэтому на участке АВ всегда

можно найти точку D, потенциал которой φ_D равен потенциалу φ_E в точке E: $\varphi_D = \varphi_E$. Если между точками E и D включен гальванометр G, то в этом случае ток через него не пойдет, так как разность потенциалов между этими точками равна нулю.

Такое положение называется равновесием моста. Покажем, что условие равновесия определяется соотношением:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_{AD}}{R_{DB}} \quad 29$$

$$(1)$$

Действительно, по закону Ома:

$$\varphi_A - \varphi_E = I_1 R_x; \quad (2)$$

$$\varphi_E - \varphi_B = I_1 R; \quad (3)$$

$$\varphi_A - \varphi_D = I_2 R_{AD}; \quad \varphi_D - \varphi_B = I_2 R_{BD}. \quad (4)$$

Так как $\varphi_D = \varphi_E$, то последние два выражения можно переписать в виде:

$$\varphi_A - \varphi_E = I_2 R_{AD}; \quad (5)$$

$$\varphi_E - \varphi_B = I_2 R_{BD}. \quad (6)$$

Разделив выражение (2) на (5) и (3) на (6), получим соотношение (1). Так как сопротивления участков AD и DB пропорциональны их длинам L_1 и L_2 , то

$$R_x = R \frac{L_1}{L_2} = R \frac{L_1}{L - L_1}, \quad (7)$$

где L – длина реохорда.

Так как сопротивление реохорда сравнительно невелико, то мостик Уитстона описанного типа применяется, как правило, для измерения сопротивлений от 1 до 1000 Ом.

В принципе, измерение сопротивления R_x возможно при любом R . В зависимости от величины R балансировка моста происходит при различных значениях отношения $L_1/(L - L_1)$. Однако погрешность измерения сопротивления будет минимальной, когда при нулевом токе через гальванометр ползунок D стоит на середине реохорда: $L_1 = L_2$. В этом случае выражение (7) принимает вид:

$$R_x = R$$

В качестве R в опыте применяется магазин сопротивлений.

Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами» –Практические занятия с указаниями по самостоятельной работе по заданиям

Цель: дать студентам знания о датчиках и познакомить с измерением неэлектрических величин электрическими методами. Изучить вопросы: Датчики ускорения, вибрации и удара. Основные положения. Принцип действия сейсмических датчиков скорости и ускорения. Пьезоэлектрические и пьезорезистивные акселерометры. Принцип действия и метрологические характеристики. Факторы, влияющие на показания. Акселерометры, основанные на измерении перемещения

Задание 1 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Датчики ускорения, вибрации и удара. Принцип действия сейсмических датчиков скорости и ускорения». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Датчики ускорения, вибрации, удара, положения

Отмечалось, что измерение ускорений³⁰(акселерометры, гироскопы и пр.) одно из направлений развития МСТ, которое идет очень быстро.

В основе измерений этих параметров лежат фундаментальные законы механики - связь между ускорением, силой и массой. Используют физические явления, позволяющие изучить электрический сигнал, связанный с этими законами.

Чаще всего непосредственно измеряют силу (пьезоэлектрические датчики) или косвенно - по перемещению или деформации чувствительного элемента, причем используют те же емкостные или тензорезистивные преобразователи.

Таким образом, в основе измерений обычно лежат общие принципы, а датчики больше различаются по назначению и условиям использования.

В частности, решают задачи:

1. Измерения ускорений движущихся объектов - самолетов, ракет, наземных или морских средств. Для измерения характерных для них малых ускорений и частот (от 0 до десятков Гц) обычно используют следящие акселерометры и датчики перемещений.
2. Измерения вибрационного ускорения жестких конструкций - до десятков кГц.
3. Измерения ударов - т.е. импульсивных ускорений. Здесь нужны широкополосные датчики.

Принцип действия проще всего проиллюстрировать на примере сейсмического датчика (разумеется, не микросистемного). Он может быть (в зависимости от диапазона частот) датчиком перемещения, скорости или ускорения, которым подвергается корпус прибора (рис. 30).

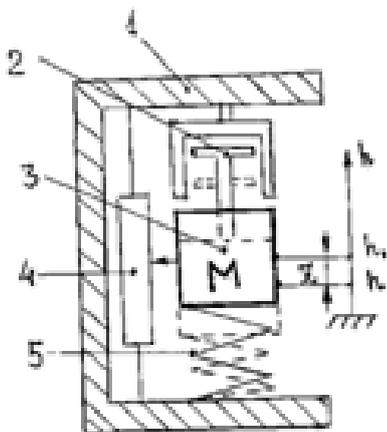


Рис. 30. Схема механической системы с одной степенью свободы:

1 - корпус; 2 - демпфер; 3 - инертная масса; 4 - устройство измерения перемещений; 5 - пружина.

Любой подобный датчик содержит механическую массу M и элемент, связывающий её с корпусом (кристалл пьезоэлектрика, гибкая пластина (пружина) и устройства преобразования параметров движения в электрический сигнал. Получается механическая система с одной степенью свободы.

h_0 - ордината точки на корпусе (const),

h - ордината точки b на сейсмической массе.

В отсутствии ускорения ординаты a и b совпадают.

$Z=h-h_0$ - перемещение сейсмической массы при ускорении.

Уравнение равновесия получим из баланса сил: 31

Cz - сила, возвращающая массу в положении равновесия,

$$S \frac{dz}{dt}$$

- сила вязкого трения (демпфер),

$$M \frac{d^2z}{dt^2}$$

- сила ускорения массы M .

Уравнение равновесия:

$$M \frac{d^2z}{dt^2} = -S \frac{dz}{dt} - cz$$

Его решение позволяет определить скорость и ускорение при механическом воздействии на корпус прибора.

Принцип действия сейсмических датчиков

Акселерометр может служить примером, иллюстрирующим частотную реакцию систем второго порядка.

В наиболее общем виде такой датчик (в зависимости от диапазона частот) может быть датчиком перемещения, скорости или ускорения, которым подвергается корпус прибора.

Конструктивная схема датчика приведена на рисунке 5.23,

где 1 – корпус; 2 – демпфер; 3- чувствительная масса; 4 – возвратная пружина.

Как следует из рассмотрения рисунка, сейсмический датчик состоит из:

- механической части, включающей массу M и элемент, связывающий ее с корпусом (кристалл пьезоэлектрика, пружина, гибкая пластина и т.д. и

- устройства преобразования в электрический сигнал параметров движения этого элемента, являющихся вторичной измеряемой величиной m_2

Рассматриваемая система является системой с одной степенью свободы.

Пусть h_0 - ордината точки a на корпусе датчика;

h - ордината точки b на сейсмической массе.

В отсутствие ускорения, приложенного к корпусу,³² ордината точки b совпадает с ординатой точки a , т.е. $h = h_0$.

Обозначим через $z = h - h_0$ перемещение массы M относительно корпуса.

Уравнение равновесия запишется в виде:

$$M \frac{d^2 h}{dt^2} = -F \frac{dz}{dt} - cz \quad (5.86)$$

или

$$-M \frac{d^2 h_0}{dt^2} = M \frac{d^2 z}{dt^2} + F \frac{dz}{dt} + cz \quad (5.87)$$

В правую часть выражения (5.87) входят:

CZ - возвращающая пружину в положение равновесия сила;

$F \frac{dz}{dt}$ - сила вязкого трения;

$M \frac{d^2 z}{dt^2}$ - сила, вызванная ускорением массы (инерционная).

В самом общем виде тип и конструкция датчика, предназначенного для измерения первичной

измеряемой величины m_1 (перемещение h_0 , скорости $\frac{dh_0}{dt}$, ускорения $\frac{d^2 h_0}{dt^2}$) зависят от:

- параметров, выбранных в качестве вторичной измеряемой величины m_2 (z_0 , $\frac{dz_0}{dt}$, $\frac{d^2 z_0}{dt^2}$);

- диапазона частот, определяющего, какой из трех членов (CZ , $F \frac{dz}{dt}$ или $M \frac{d^2 z}{dt^2}$) является доминирующим.

Чувствительность датчика S можно описать соотношением:

$$S = S_1 S_2 = \frac{\text{Выходная электрическая величина } S}{\text{Первичная измеряемая величина } m_1}, \quad (5.88)$$

где $S_1 = \frac{m_2}{m_1}$ - механическая чувствительность датчика первичной измеряемой величины;

$S_2 = \frac{S}{m_2}$ - чувствительность вторичного датчика (преобразователя).

На практике в качестве вторичного датчика пользуются датчиками относительного положения сейсмической массы, либо датчиками относительной скорости.

Типы сейсмических датчиков движения и их параметры приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Принцип действия и параметры сейсмических датчиков движения

Тип датчика	Первичная измеряемая величина m_1	Вторичная измеряемая величина m_2	Преобразователь
Сейсмометр	Абсолютное перемещение h_0	Относительное перемещение Z	Потенциометр, трансформатор
Вибрационный датчик скорости	Абсолютная скорость $\frac{dh_0}{dt}$	Относительная скорость $\frac{dz}{dt}$	Переменная индуктивность
Акселерометр	Абсолютное ускорение $\frac{d^2h_0}{dt^2}$	Относительное перемещение Z , деформация, восстанавливающая сила	Потенциометр, трансформатор, пьезоэлектрический элемент

Перепишем общее уравнение в символическом виде путем преобразования Лапласа с оператором p :

$$-Mp^2h_0 = Mp^2z + Fpz + cz \Rightarrow -Mp^2h_0 = (Mp^2 + Fp + c)z \quad (5.89)$$

Из последнего выражения имеем

$$\frac{z}{h_0} = \frac{-Mp^2}{Mp^2 + Fp + c} = \frac{-p^2}{p^2 + \frac{F}{M}p + \frac{c}{M}} = - \frac{p^2 \frac{1}{c}}{\frac{p^2 \frac{1}{c} + \frac{M}{c}p + 1}{\frac{M}{c}}} \quad (5.90)$$

$$\frac{c}{M} = \omega_0^2; \quad \xi = \frac{1}{2} \frac{F}{\sqrt{cM}}$$

Тогда из (5.90) получим

$$\frac{z}{h_0} = - \frac{\frac{1}{\omega_0^2} p^2}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + 1} \quad (5.91)$$

По физическому смыслу здесь:

$\omega_0 = 2\pi f_0$ - собственная круговая частота колебаний массы M на пружине с жесткостью c (f_0 - собственная частота);

ξ - коэффициент демпфирования.

Для режима синусоидальных колебаний после подстановки $p = j\omega$ из выражения (5.91) можно перейти в частотную область исследований.

Рассмотрим несколько случаев.

Сейсмический датчик перемещений

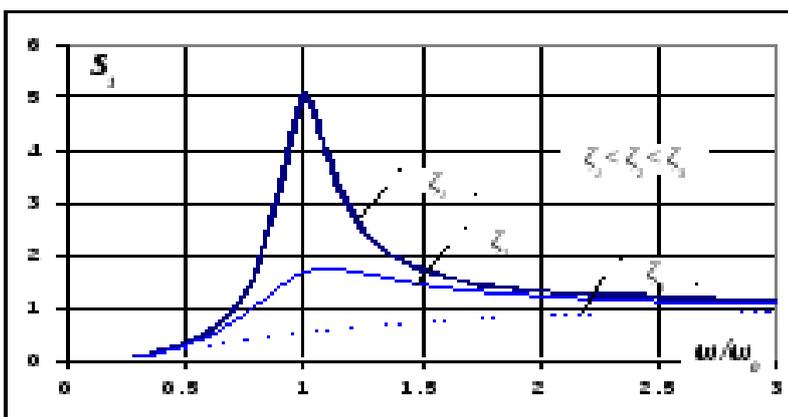


Рисунок 5.24. – Спектр сейсмического датчика перемещений

В этом случае чувствительность

$$S_1 = \frac{m_2}{m_1},$$

где в соответствии с таблицей 5.4 имеем $m_2 = z$, $m_1 = h_0$.

Тогда (5.91) дает

$$S_1 = \frac{z}{h_0} = - \frac{\frac{1}{\omega_0^2} p^2}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + 1} \quad (5.92)$$

В этом случае S_1 - фильтр верхних частот второго порядка с частотой среза $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Амплитудно-частотная характеристика имеет вид, представленный на рисунке 5.24.

Использование такого датчика ограничено для измерения вибрационных перемещений, т.к. их частота $f \gg f_0$.

Сейсмический датчик скорости

При измерении скорости вибрационных колебаний $\frac{dh_0}{dt} = p h_0$ можно воспользоваться в качестве вторичной измеряемой величины относительным перемещением Z .

Первичная чувствительность S_1 в этом случае согласно (5.91) запишется

$$S_1 = \frac{z}{h_0} = - \frac{\frac{1}{\omega_0^2} p}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + 1} \quad (5.93)$$

Рабочий диапазон частот определяется членом $2 \frac{\xi}{\omega_0} p$ в знаменателе (5.93). Для его увеличения нужно увеличивать демпфирование. Но это плохо, поскольку в этом случае уменьшается быстродействие датчика. Поэтому лучше в качестве вторичной величины m_2 брать

относительную скорость $\frac{dz}{dt} = pz$.

Тогда

$$S_1 = \frac{pz}{ph_0} = - \frac{\frac{1}{\omega_0^2} p^2}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + 1}, \quad (5.94)$$

что аналогично датчику перемещений (см. (5.92)).

Преобразование скорости перемещения относительно корпуса в электрический сигнал обычно обеспечивается катушкой, связанной с массой M , и перемещающейся относительно магнитного сердечника, скрепленного с корпусом датчика.

Принципиальная схема сейсмического датчика скорости представлена на рисунке 5.25, где 1- магнитный сердечник; 2 – катушка; 3- чувствительная масса; 4 – пружина; 5 – демпфер; 6 – движущаяся конструкция; e_m – э.д.с., индуцируемая в катушке за счет движения массы M .

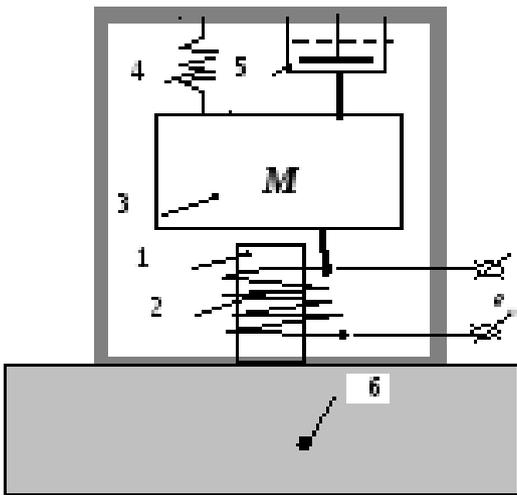


Рисунок 5.25 - Принципиальная схема сейсмического датчика скорости

Сейсмический датчик ускорения

Входная величина – ускорение - $\frac{d^2 h_0}{dt^2}$ измеряется либо в [м/с] либо в [g].

Перемещение Z - вторичная измеряемая величина, которая определяется одним из 3 – х способов:

- непосредственно акселерометрами, снабженными потенциометрами, трансформаторами, переменными емкостями;

- посредством деформации упругого чувствительного элемента, поддерживающего сейсмическую массу, т.е. тензометрическими акселерометрами;
- посредством восстанавливающей силы Cz , пропорциональной перемещению Z , т.е. пьезоэлектрическими акселерометрами.

Первичная чувствительность S_1 в этом случае определяется в соответствии с (5.91) как

$$S_1 = \frac{z}{p^2 h_0} = - \frac{\frac{1}{\omega_0^2}}{\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + 2 \frac{\xi}{\omega_0} p + 1}, \quad (5.95)$$

и является фильтром нижних частот.

Задание 2 Используя предложенные материалы и соответствующие материалы из интернет напишите обзор на тему «Пьезоэлектрические и пьезорезистивные акселерометры: принцип действия и метрологические характеристики. Акселерометры, основанные на измерении перемещения». Задание выполняется индивидуально и сдается преподавателю.

Пьезорезистивные акселерометры общего применения и для измерения ускорений на средних частотах. Эти акселерометры предназначены для работы в диапазоне частот 0-10 кГц; они позволяют измерять: а) постоянные ускорения; б) постоянные ускорения в сочетании с режимами вибрационных колебаний амплитудой от нескольких g до 1000g и с полосой пропускания (с неравномерностью $\pm 10\%$) от постоянного ускорения до 10 000 Гц.

Принцип действия. В этих акселерометрах используется механический усилитель (или преобразователь), входящий в общий блок прибора (рис. 11.18); назначение усилителя состоит в умножении деформации тензодатчиков (т. е. и чувствительности) без увеличения отклонений сейсмической массы или уменьшения жесткости упругой плоской пластины и, следовательно, собственной частоты.

Два тензодатчика жестко закрепляются своими концами по обе стороны боковых вырезов в теле пластины, ширина которых k изменяется на $\pm \Delta$? под воздействием силы инерции, приложенной к центру тяжести O . Для одного и того же отклонения Δb центра тяжести G , т. е. для одного и того же $A\%$, относительная деформация тензодатчиков тем больше, чем меньше X .

Пьезорезистивные тензодатчики, в зависимости от типа, имеют номинальную длину от 0,8 мм (тип E) до 6,5 мм (тип L). Для таких датчиков при изменении $\Delta \lambda \approx 1$ мм имеем $\Delta \lambda / \lambda \approx 0.15 \cdot 10^{-3}$ (тензодатчик типа L) и $\Delta \lambda / \lambda \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$ (тензодатчик типа L).

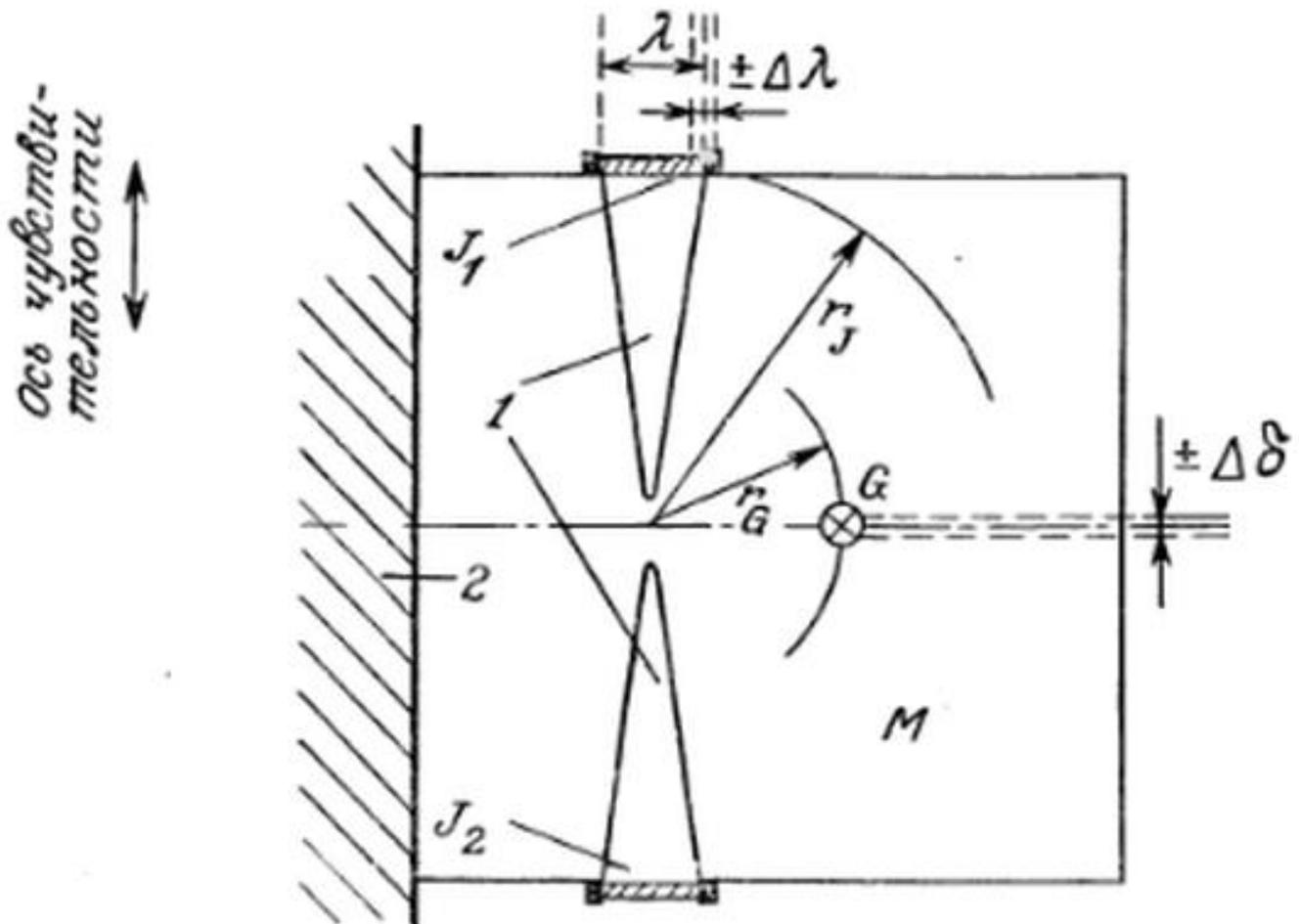


Рис. 11.18. Принцип действия пьезорезистивного акселерометра с механическим усилением для измерений на средних частотах. 1 — вырезы; 2 — жесткое крепление.

11.5. Акселерометры, основанные на измерении перемещения

Перемещение сейсмической массы относительно корпуса акселерометра измеряется потенциометрическим или индуктивным датчиком либо оптическим методом (движение сейсмической массы приводит к перемещению связанного с ней зеркала).

11.5.1. Демпфирование

Реализация. Демпфирование обычно осуществляется протеканием воздуха или масляной пленки между сейсмической массой и корпусом. Оно может быть обеспечено также устройством типа «буферного амортизатора», напоминающего систему поршня в цилиндре; в этом случае демпфирование происходит в результате сочетания сжатия газа и его течения между поршнем и цилиндром.

Важно отметить, что каково бы ни было техническое устройство акселерометра, коэффициент демпфирования может изменяться вследствие изменения вязкости масла с изменением температуры, а также высыхания смазки с течением времени. В некоторых конструкциях этими изменениями можно пренебречь или компенсировать их; в противном случае их влияние необходимо учитывать при выборе акселерометра или при измерениях.

Демпфирующее устройство, в котором используется ламинарное течение газа (например, между

сейсмической массой и корпусом), практически³⁵ невозможно регулировать, ибо регулирование связано с вязкостью газа или с разностью диаметров сейсмической массы и корпуса. Для регулирования в сейсмической массе делают отверстие, частично перекрываемое остроконечным винтом, которое создает дополнительное, неламинарное течение (рис. 11.26). Такое течение изменяет частотную характеристику акселерометра, но оно необходимо по соображениям технологии.

Выбор величины коэффициента демпфирования ξ . Малые величины ξ позволяют получить малый сдвиг фаз вплоть до 90% собственной частоты, но за счет большей неравномерности по амплитуде (рис. 2.6), поэтому они используются в тех случаях, когда при динамическом анализе какого-либо явления требуется знать только реакцию по фазе или когда собственная частота акселерометра намного выше частоты изучаемого явления и даже частоты нежелательных вибраций, которые могут его сопровождать.

В других случаях стараются получить коэффициент демпфирования $\sim 0,6$ – $0,7$, что соответствует оптимальной амплитудной характеристике и минимальному искажению по фазе (разд. 2.4.3).

Кривые на рис. 11.27 позволяют, зная максимальную относительную частоту анализируемого явления (в процентах от собственной частоты датчика ω/ω_0), определить пределы, внутри которых должна находиться величина коэффициента демпфирования, необходимая для получения заданной точности.

11.5.2. Возвратная пружина

Пружина, необходимая для возвратного движения сейсмической массы акселерометра, обычно служит одновременно опорой и направляющей. В акселерометрах используются пружины двух типов.

Круглые пружины с вырезами. Они характеризуются хорошей однородностью упругих свойств; масса цилиндрической формы подвешивается симметрично между двумя такими пружинами (рис. 11.28). Участок линейного соотношения между восстанавливающей силой и перемещением ставит предел максимальной деформации. Кроме того, поперечная жесткость деформированной пружины должна быть достаточной для того, чтобы под воздействием боковых ускорений сейсмическая масса не коснулась стенок акселерометра и пружина не подвергалась бы необратимой деформации.

Прямая плоская пружина. Такие пружины допускают заметное смещение сейсмической массы. В этой схеме две пружины, корпус акселерометра и сейсмическая масса образуют деформируемый параллелепипед (рис. 11.29, а), достоинством которого является обеспечение хорошей поперечной жесткости относительно оси x . Напротив, чувствительность к ускорениям относительно оси z остается заметной, когда под действием большого ускорения вдоль измерительной оси масса находится далеко от своего положения в состоянии покоя.

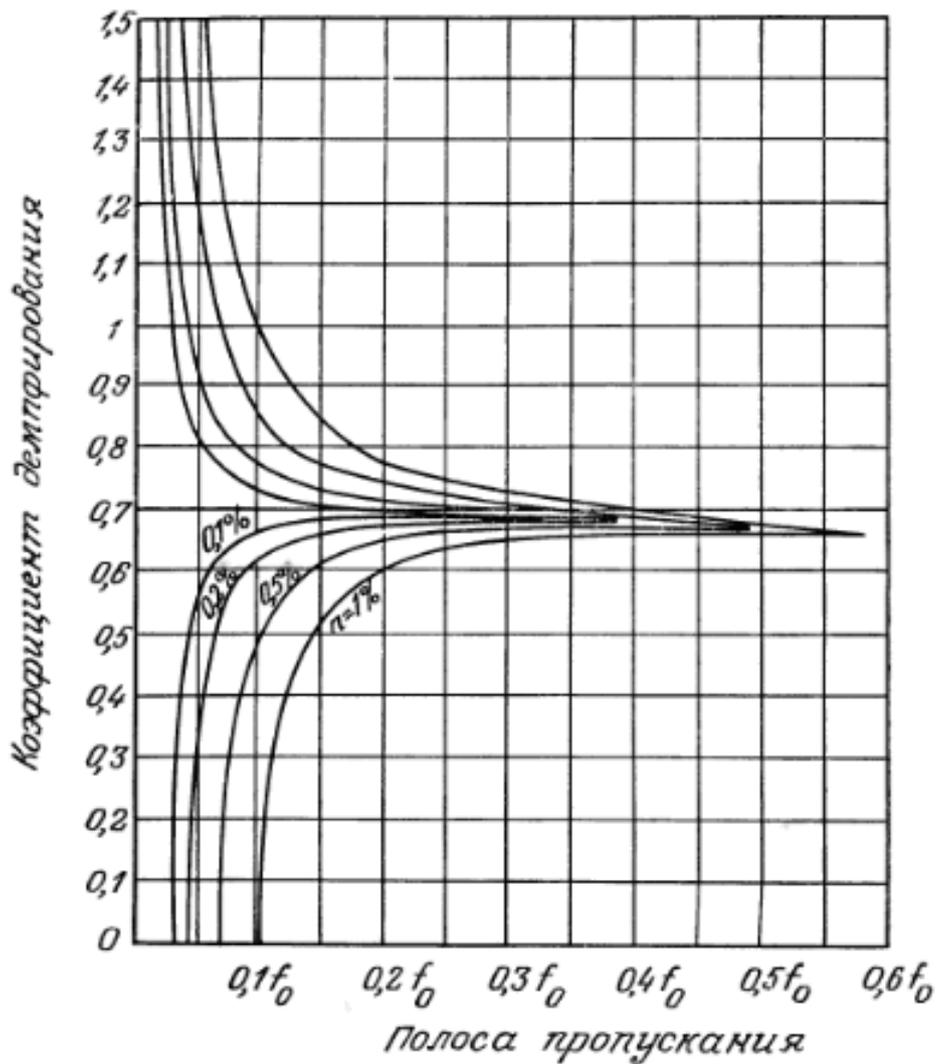


Рис. 11.27. Зависимость демпфирования акселерометра с собственной частотой f_0 от частоты в полосе пропускания и заданной точности $n\%$.

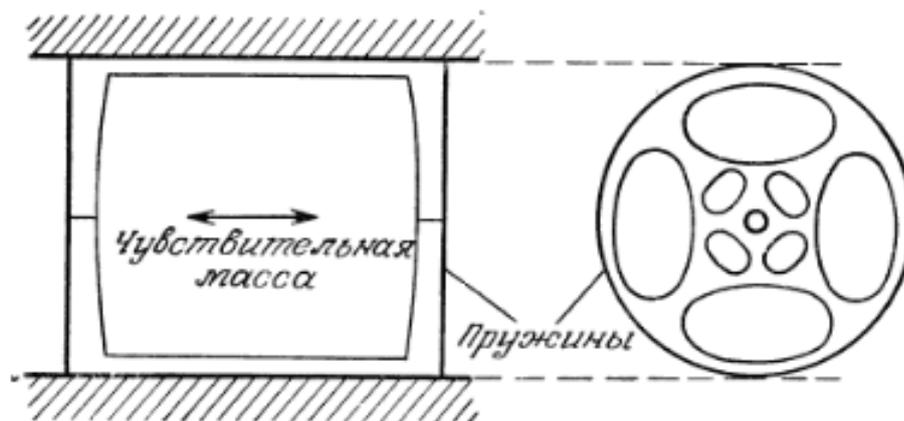


Рис. 11.28. Подвеска чувствительной массы акселерометра с помощью двух тонких круглых пружин и пример устройства вырезов.

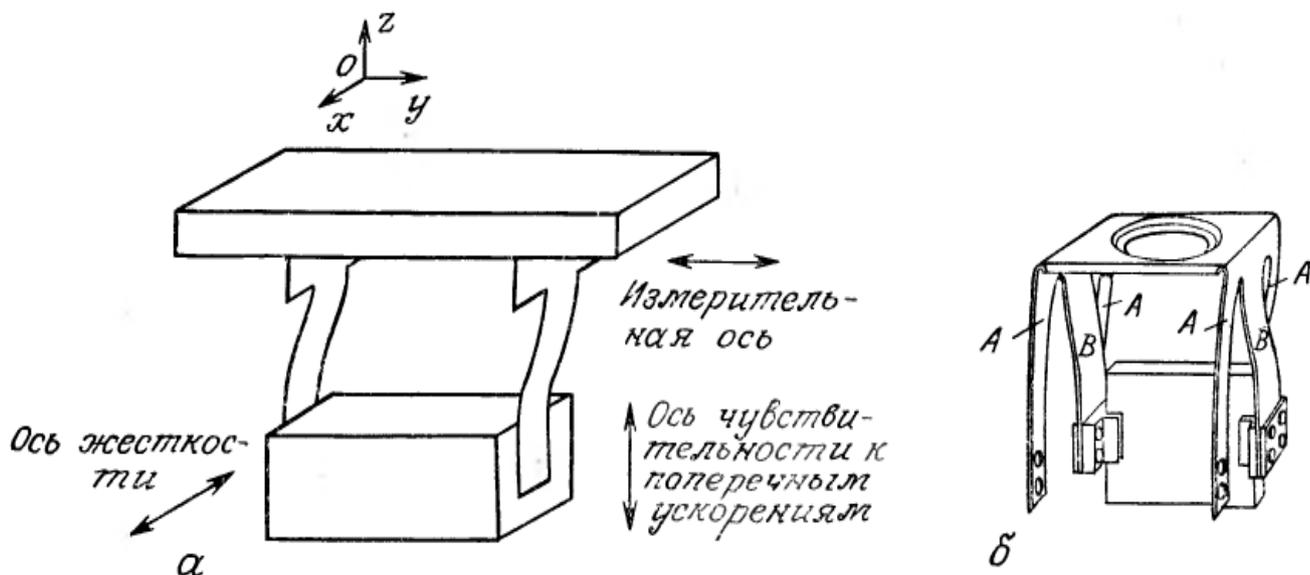


Рис. 11.29. Подвеска чувствительной массы на плоских полосовых пружинах *а* — принципиальная схема; *б* — пример реализации (фирма Genisco).

В примере реализации на рис. 11.29,б крепление пружины к корпусу акселерометра обеспечивается внешними пружинными лентами А, а измерительная масса жестко скреплена с внутренними пружинными лентами В. Ширина одной ленты В вдвое больше ширины лент А, между которыми она заключена; при этом измерительная масса перемещается прямолинейно, а тепловое расширение пружины не влияет на ее положение.

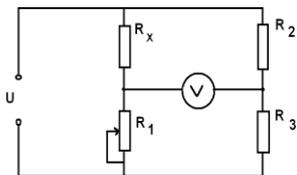
Демпфирование осуществляется либо погружением в жидкость, либо токами Фуко, когда сделанная из меди масса помещается между полюсами магнита.

Сборник заданий к практическим занятиям для самостоятельного решения

Систематические погрешности

1. Методом амперметра-вольтметра измеряется сопротивление R_X . Показания амперметра $I_A = 0,03$ А, показания вольтметра $U_V = 9$ В. Известно, что сопротивления амперметра и вольтметра составляют соответственно $R_A = 3$ Ом, $R_V = 30$ кОм. Нарисовать оптимальную схему измерения, определить величину относительной методической погрешности, найти исправленный результат измерения.

2. Сопротивление R_X измеряется с помощью четырехплечего моста, в котором



номинальные значения резисторов R_2 и R_3 равны 1000 Ом. Равновесие моста достигается при $R_1' = 1000,4$ Ом. Для устранения систематической погрешности производится смена местами резисторов R_X и R_1 . В этом случае равновесие моста достигается при $R_1'' = 1000,2$ Ом.

Определить R_X и действительное соотношение плеч моста $n = R_2/R_3$. Классифицировать метод измерения R_X и метод устранения систематической погрешности.

Случайные погрешности

1. В результате испытаний милливольтметра установлено, что 60% его погрешностей не превосходят ± 20 мВ. Погрешности распределены по равновероятному закону с нулевым математическим ожиданием. Определить границы доверительного интервала погрешности при доверительной вероятности $P_d = 0,95$. Найти СКП.
2. В результате поверки амперметра установлено, что 50% его погрешностей не превосходят ± 10 мА. Считая, что погрешность распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием, найти симметричный доверительный интервал для погрешности, вероятность попадания в который равна 0,95.
3. Для случайной погрешности измерения напряжения, распределенной по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием определить среднюю квадратическую погрешность S , если известно, что граница доверительного интервала погрешности $\varepsilon = 10$ мВ при доверительной вероятности $P_d = 0,7$.
4. Известно, что границы доверительного интервала случайной погрешности, распределенной по треугольному закону $\varepsilon(P_d = 0,7) = 10$ мВ. Определить границы существования погрешности и ее СКО.

Погрешности СИ

1. Построить графики зависимости абсолютной и относительной погрешностей от измеряемой мощности для ваттметра с пределом шкалы 1,0 Вт, класса точности 1,0. Количество расчетных точек графиков – не менее 5. Повторить задачу для прибора с классом точности 1,0/0,2.

2. Определить величину измеряемого напряжения, если известно, что оно измерено с погрешностью $U=1,0$ В вольтметром с пределом измерения $U_{\text{шк}} = 100$ В и классом

точности 1,0/0,2. Повторить решение задачи для прибора с классом точности 1.0

3. Определить эксплуатационную погрешность измерения силы тока, если известно, что амперметр с пределом шкалы 100 мА; класса точности 2,0 показал 80,25 мА. Измерения проводились при напряженности внешнего магнитного поля 200А/м и напряжении питания 200 В. Дополнительная погрешность амперметра не превышает половины основной при изменении напряженности магнитного поля на каждые 100 А/м относительно нормального значения напряженности поля 100 А/м, а дополнительная погрешность прибора за счет напряжения питания не превышает основной при изменении питания на каждые 20 В относительно нормального значения 220 В. Записать результат измерения.

Обработка многократных равноточных измерений.

1. Известны результаты многократных равноточных наблюдений мощности сигнала в Вт.: 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,0; 1,8; 1,2; 1,2; 1,1; 1,3. Определить результат измерения, СКП отдельного измерения, записать результат измерения при доверительной вероятности $P_d = 0,95$.
2. Определить наличие и удалить, в случае необходимости, промахи из результатов многократных равноточных измерений напряжения в мВ: 20,0; 20,5; 20,5; 22,0; 18,0; 19,5; 20,0; 24,0; 25,5; 19,5.
3. При поверке вольтметра с помощью образцовой меры 20В показания поверяемого прибора в вольтах были: 20,15; 20,50; 20,35; 20,25; 20,05; 20,35; 20,28; 20,24; 20,26; 20,18. Определить систематическую, среднеквадратическую и максимальную погрешность поверяемого вольтметра.

Обработка косвенных измерений

1. Определить результат и погрешность косвенного измерения напряжения $U = I \frac{(R_1 - R_2)^2}{R_3} U_0$ по результатам прямых измерений: $R_1 = (100 \pm 1)$ Ом, $R_2 = (51 \pm 0,5)$ Ом, $R_3 = 2,4$ Ом, $\delta R_3 = \pm 1\%$; $U_0 = 2$ В измерено вольтметром класса точности 1,0 с пределом шкалы 3В. $I = 9$ мА измерено амперметром класса точности 1,5 с пределом шкалы 10 мА. Записать результат измерения.
2. Емкость $C = C_2 - C_1$ определена по результатам прямых измерений: $C_1 = 94,8$ пФ, $C_2 = 102,3$ пФ. Систематические погрешности $\Delta_{c1} = 0,9$ пФ; $\Delta_{c2} = 1,1$ пФ. СКО случайных погрешностей, распределенных по гауссовому закону $\sigma_{c1} = \sigma_{c2} = 0,5$ пФ, коэффициент корреляции $r_{ij} = 0$. Определить результат и погрешность измерения C . Записать результат измерения.

Суммирование погрешностей

1. При измерении напряжения получено среднее арифметическое многократных измерений $\bar{U} = 115,73$ мВ; составляющие случайной погрешности $S_1 = 1,2$ мВ; $S_2 = 0,8$ мВ;

$S_3 = 1,0$ мВ, коэффициент корреляции $r_{12} = +1$, составляющие неисключенной систематической погрешности (НСП) $\theta_1 = 0,8$ мВ; $\theta_2 = 0,6$ мВ. Записать результат измерения при доверительной вероятности $P_d = 0,9$.

2. При измерении сопротивления цифровым омметром с пределом шкалы 1000 Ом показания прибора составили 910 Ом. Из паспортных данных прибора известно, что систематическая погрешность составляет $\pm (0,2\% + \text{стоимость 1 единицы младшего разряда кода } R)$, дополнительная температурная погрешность при рабочей температуре $\Delta R_t = \pm 1$ Ом, среднее квадратическое отклонение случайной погрешности $S = 0,7$ Ом. Записать результат измерения.

Проверка, калибровка

1. При проверке милливольтметра класса точности $\gamma_0 = 2,0$ с пределом шкалы $U_{\text{шкп}} = 100$ мВ используется образцовый прибор с $U_{\text{шк } 0} = 300$ мВ класса точности $\gamma_0 = 0,1$. В результате проверки получены следующие результаты:

U_n	20	40	60	80	100	
U_o	19,05	39,1	59,0	81,0	99,01	

Определить — годен ли поверяемый прибор.

2. При проверке частотомера с помощью стандарта частоты 1 кГц были получены следующие результаты: 1001; 1002; 1001; 999; 1000,5; 1001,5; 1001,5; 1002; 1001 Гц. Определить систематическую погрешность и СКО случайной погрешности частотомера. Присвоить ему класс точности, считая, что погрешность носит в основном мультипликативный характер.

Цифровые измерительные приборы

1. Изобразить электрическую структурную схему цифрового частотомера. Описать работу схемы. Привести временные диаграммы и основные соотношения, поясняющие его работу. Перечислить причины возникновения погрешностей измерения.

Считая, что частота входных сигналов лежит в диапазоне $f_x = 1 \text{ кГц} \div 1 \text{ МГц}$, определить время измерения T_0 , необходимое для обеспечения относительной погрешности дискретности $\delta \leq 0,001$

2. Изобразить электрическую структурную схему цифрового быстродействующего вольтметра с АЦП, работающим по методу считывания. Привести временные диаграммы и соотношения, поясняющие принцип его работы. Перечислить причины возникновения погрешностей. Описать работу схемы.

Определить диапазон измеряемого напряжения если дискрет измерения составляет 1 мВ, а выходной двоичный код имеет 8 разрядов. Оценить соотношение времен измерения двух значений $U_{\text{вх}}$, различающихся в 2 раза.

3. Изобразить электрическую структурную схему цифрового измерителя сопротивлений с время-импульсным АЦП. Привести временные диаграммы и основные соотношения, поясняющие принцип его работы. Перечислить причины возникновения погрешностей.

Определить, какой должна быть частота счетных импульсов f_0 , чтобы при $C_{\text{обр}} = 1$ мкФ единица младшего разряда счетчика соответствовала 0,1 Ом.

4. Изобразить электрическую структурную схему цифрового вольтметра амплитудных

значений с АЦП развертывающего⁴⁵ уравнивания последовательного счета. Привести временные диаграммы и основные соотношения, поясняющие принцип его работы. Перечислить причины возникновения погрешностей измерения. Описать работу схемы.

Определить время измерения и абсолютную погрешность дискретности, если частота тактовых импульсов $f_{\text{такт}} = 100$ кГц, максимальное входное напряжение $U_{\text{вх max}} = 10$ В, емкость счетчика – 10 разрядов двоичного кода.

5. Изобразить электрическую структурную схему цифрового вольтметра постоянного напряжения, использующего метод двойного интегрирования. Привести временные диаграммы и основные соотношения, поясняющие принцип его работы для двух значений измеряемого напряжения. Эпюры выполнить в одном временном масштабе. Описать работу схемы.

Определить, чему равно измеряемое напряжение, если образцовое напряжение $U_{\text{обр}} = 1$ В, а время второго интегрирования T_2 в пять раз больше времени первого интегрирования T_1 .

6. Изобразить электрическую структурную схему цифрового низкочастотного частотомера, работающего в режиме измерения периода входных сигналов (время – импульсный метод преобразования). Привести временные диаграммы и основные соотношения, поясняющие его работу. Описать работу схемы.

Определить максимальное значение частоты входных сигналов, для которой еще выполняется условие, что относительная погрешность дискретности $\delta \leq 0.01$.

Частота счетных импульсов $f_0 = 10$ МГц

7. Изобразить электрическую структурную схему цифрового измерителя емкости с время – импульсным преобразованием. Привести эпюры напряжений и основные соотношения, поясняющие его работу. Определить причину возникновения погрешностей измерения, в том числе погрешности дискретности.

Считая, что при преобразовании значения емкости C_x во временной интервал T_x выполняется соотношение $T_x = R_{\text{обр}} \cdot C_x$, R_0 при измерении определить значение бр

$C_x = (100 \div 10000)$ пФ, требуемое для обеспечения относительной погрешности дискретности $\delta \leq 0.01$, если частота счетных импульсов $f_0 = 10$ МГц.

8. Изобразить электрическую структурную схему цифрового фазометра с постоянным временем измерения. Привести эпюры напряжений и основные соотношения, поясняющие его работу. Определить причину возникновения погрешностей дискретности.

Определить, каково будет значение относительной погрешности дискретности, если частота счетных импульсов $f_0 = 10$ МГц, а частота входных сигналов фазометра $f_{вх} = 20$ кГц, $\varphi \doteq 90$

Осциллографические измерения

1). Определить действующее значение напряжения синусоидальной формы, изображенного на экране осциллографа, если отклонение луча l_y по вертикали, соответствующее размаху напряжения равно 4 делениям шкалы, коэффициент отклонения $K_0 = 0,1$ В/дел, множитель отклонения $M_0 = 10$.

2). При подаче на вход Y осциллографа исследуемого треугольного напряжения и подключении ко входу Z образцового калибровочного напряжения с периодом $T_0 = 2$ мс на экране получено изображение, показанное на рис. 6.

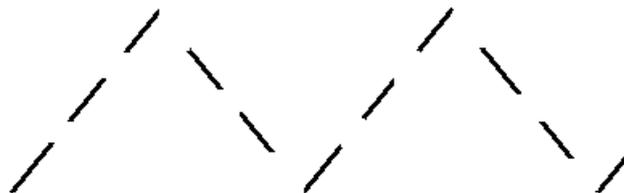


Рис. 6 Определить период исследуемого напряжения.

3). Амплитудному значению исследуемого напряжения соответствует на экране осциллографа отрезок длиной 4,5 деления шкалы. Для калибровки на вход Y осциллографа подано синусоидальное напряжение с действующим значением $U = 10$ В. Чему равна амплитуда исследуемого напряжения, если двойной амплитуде калибровочного напряжения соответствует отрезок длиной 5 делений шкалы?

4). При подаче на вход Y осциллографа синусоидального напряжения U_y на экране осциллографа получено следующее изображение (рис.7).

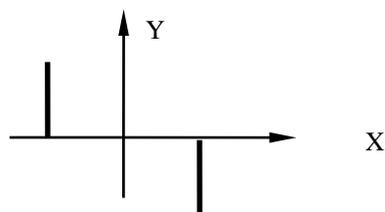


Рис.7

Представить в одном с напряжением U_y временном масштабе напряжение U_x , поданное в этом случае на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ осциллографа.

5). Изобразить осциллограмму, полученную на экране осциллографа, если t_{np}

$= 4t_{обр}$. Исследуемый сигнал представляет собой симметричное напряжение треугольной формы с $f = 1 \text{ кГц}$. Частота напряжения непрерывной развертки луча ЭЛТ запирается.

$$f_p = 0,4 \text{ кГц}.$$

При обратном ходе **6)**. ЭЛО исследуется импульсный сигнал. Известно, что время нарастания осциллографа $\tau_H = 0,05 \text{ мкс}$, допустимая погрешность измерения фронта импульса

$\delta = 15\%$. Определить верхнюю частоту пропускания $\underline{\text{УВО}}$ и длительность фронта импульса τ_{ϕ} .
Определить

f_x по фигуре Лиссажу (рис.8), если известно, что образцовый сигнал частотой $f_0 = 1 \text{ кГц}$ подается на вход Y осциллографа

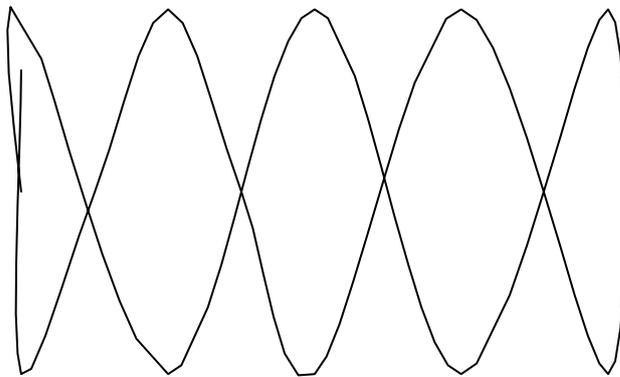


Рис.8.

Методические указания по самостоятельной работе:

Для подготовки к каждому практическому занятию студентам необходимо проработать лекционный материал, материал, предложенный выше к каждому заданию и ресурсы интернет по теме задания. При этом необходимо опираться на проверенные, достоверные источники. Таковыми являются 1) материалы статей на ресурсе Российского индекса научного цитирования РИНЦ по адресу elibrary.ru; 2) материалы электронных библиотек, к которым подключен и имеет полнотекстовый доступ университет – это электронно-библиотечные системы Znanium.com, Лань, Юрайт, соответствующие ссылки к ним на сайте библиотеки ТУСУР <https://lib.tusur.ru/> в разделе Ресурсы. Если необходимо, то найденные вами файлы в формате pdf можно удобным образом и бесплатно преобразовать с хорошим качеством форматирования в формат редактора Ворд docx с помощью веб ресурса <https://www.ilovepdf.com>.

Приложения 1 игры Выполнен импорт Скачать Научные ста 1_СП 11конфер и меропр 17мгновений весны 1выбираем тел 2016 1достиж2016 >> Другие

I Love PDF Register Login Menu

MERGE PDF SPLIT PDF COMPRESS PDF CONVERT PDF MORE PDF TOOLS

EVERY TOOL YOU NEED TO WORK WITH PDFs IN ONE PLACE
Every tool you need to use PDFs, at your fingertips. All are 100% FREE and easy to use!
Merge, split, compress, convert, rotate, unlock and watermark PDFs with just a few clicks.

<p>Merge PDF Combine PDFs in the order you want with the easiest PDF merger available.</p>	<p>Split PDF Separate one page or a whole set for easy conversion into independent PDF files.</p>	<p>Compress PDF Reduce file size while optimizing for maximal PDF quality.</p>
<p>PDF to WORD Easily convert your PDF files into easy to edit DOC and DOCX documents. The converted WORD document is almost 100% accurate.</p>	<p>PDF to POWERPOINT Turn your PDF files into easy to edit PPT and PPTX slideshows.</p>	<p>PDF to EXCEL Pull data straight from PDFs into EXCEL spreadsheets in a few short seconds.</p>
<p>WORD to PDF Make DOC and DOCX files easy to read by converting them to PDF.</p>	<p>POWERPOINT to PDF Make PPT and PPTX slideshows easy to view by converting them to PDF.</p>	<p>EXCEL to PDF Make EXCEL spreadsheets easy to read by converting them to PDF.</p>
<p>PDF to JPG Convert each PDF page into a JPG or extract all images contained in a PDF.</p>	<p>JPG to PDF Convert JPG images to PDF in seconds. Easily adjust orientation and margins.</p>	<p>Page numbers Add page numbers into PDFs with ease. Choose your positions, dimensions, typography.</p>
<p>Watermark Stamp an image or text over your PDF in seconds. Choose the typography, transparency and position.</p>	<p>Unlock PDF Remove PDF password security, giving you the freedom to use your PDFs as you want.</p>	<p>Rotate PDF Rotate your PDFs the way you need them. You can even rotate multiple PDFs at once!</p>

2018 © iLovePDF

Далее необходимо подготовиться к презентации сделанного исследования и изучения материалов по заданиям, приготовить презентацию в формате Power Point ppt и доклад. Если заданием было написание эссе, то его нужно оформить по обычным требованиям, предъявляемым к научно-техническим отчетам. Или воспользоваться указаниями к оформлению курсовых работ. В соответствии с нормами, принятыми на факультете инновационных технологий, все курсовые работы и курсовые проекты оформляются в соответствии с едиными для факультета методическими указаниями:

Методические указания по выполнению курсовых проектов и курсовых работ на факультете инновационных технологий: Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] Томск: ТУСУР, 2018. — 34 с. — URL: <https://edu.tusur.ru/publications/8847>

Эти методические указания составлены в соответствии с документами ТУСУР:

1. Положение по организации выполнения и защиты курсовых проектов и курсовых работ в ТУСУРе при введении ФГОС 3.–Томск: ТУСУР, 2013.–17с.
2. ОС ТУСУР 01-2013 Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля.–Томск: ТУСУР, 2013.–56с.

Основным назначением настоящих методических указаний является обеспечение качества

реализации требований государственных образовательных стандартов высшего образования к условиям реализации основных образовательных программ и результатам их освоения. Методические указания по выполнению курсовых проектов и курсовых работ на факультете инновационных технологий доступны для всех студентов на научно-образовательном портале ТУСУР.

Оценочный материал

Темы опросов на занятиях

Определение основных понятий дисциплины и связанных с ними терминов. Роль информационных технологий в обработке результатов измерений. Значение фундаментальной и математической подготовки инженера-конструктора-технолога. Предмет, цель и задачи дисциплины. Характеристика материала дисциплины и его структура.

Предельное распределение. Частота появления измерения. Понятие «истинное значение». Распределение Гаусса. Предельное распределение, условие нормировки. Выборочное среднее значение. Математическое ожидание. Стандартное отклонение. Стандартное отклонение среднего. Стандартная ошибка среднего. Дисперсия. Доверительный интервал. Нормальный интеграл ошибок. Распределение Стьюдента. Коэффициент Стьюдента. Плотность распределения вероятности.

Совместные измерения. Метод наименьших квадратов. Нормальные уравнения. Линия аппроксимации. Число степеней свободы. Аппроксимация методом наименьших квадратов: параметры линейной зависимости и их погрешности. Коэффициент линейной корреляции. Смешанный второй момент. Вероятность некоррелированности измеренных величин.

Абсолютные и относительные погрешности. Значащие цифры. Погрешности в косвенных измерениях. Десять правил определения погрешностей. Практические рекомендации.

Определение искомой физической величины и ее погрешности из прямых или косвенных единичных измерений. Определение искомой физической величины и ее погрешности из прямых или косвенных многократных измерений. Определение параметров функциональной зависимости и их погрешностей из анализа результатов совместных измерений.

Вопросы на самоподготовку

Компьютерные технологии в обработке результатов измерений. Разработка методики эксперимента. Систематические и случайные погрешности, их особенности. Правила суммирования погрешностей. Правила представления результатов измерений. Линейная аппроксимация и коэффициент корреляции. Современные проблемы измерения электрических и неэлектрических физических величин. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. Датчики различных физических величин с частотным выходом

Темы опросов на занятиях

Определение основных понятий дисциплины и связанных с ними терминов. Роль и значение физических эффектов в построении измерительных преобразователей. Значение фундаментальной и математической подготовки инженера-конструктора-технолога. Предмет, цель и задачи дисциплины. Характеристика материала дисциплины и его структура.

Основные понятия, термины и определения метрологии. Система единиц физических величин (ФВ). Понятия измерения, испытания и контроля. Классификации видов измерений, методов измерений. Основы теории погрешностей. Классификация погрешностей. Систематические и случайные погрешности, их особенности. Правила суммирования погрешностей. Правила представления результата измерения. Обработка результатов измерений.

Аппроксимация методом наименьших квадратов: параметры линейной зависимости и их погрешности. коэффициент линейной корреляции.

Общие сведения о средствах измерений (СИ). Классификация средств измерения (СИ). Аналоговые и цифровые приборы, их особенности. Обобщенные структурные схемы приборов прямого и уравнивающего преобразования. Классификация цифровых измерительных устройств (ЦИУ). Основные характеристики СИ. Погрешности СИ. Методы и средства измерения электрических физических величин (ФВ) – напряжения, тока, мощности, частоты, интервалов времени и фазового сдвига, параметров цепей, анализ спектра сигналов, цифровое осциллографирование.

Основные понятия и определения, классификация датчиков. Физические принципы работы датчиков, их характеристики. Параметрические датчики: реостатные, тензочувствительные, термочувствительные, индуктивные, емкостные, ионизационные, фотоэлектрические. Генераторные датчики: термоэлектрические, индукционные, пьезоэлектрические, Холла. Интеллектуальные датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами.

Вопросы для экзамена

1. Классификация измерений. Измерения прямые, косвенные, совместные и совокупные.
2. Классификация методов измерения ФВ. Метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой.
3. Суть понятий: измерение, испытание, контроль
4. Классификация погрешностей. Систематические и случайные погрешности.
5. Правила суммирования погрешностей (неисключенные остатки систематических погрешностей и случайные погрешности)..

6. Доверительный интервал погрешности.
7. Классификация средств измерений (СИ).
8. Метрологические характеристики СИ.
9. Погрешности средств измерения, их нормирование. Классы точности СИ.
10. Обработка результатов прямых однократных измерений.
11. Определение результата и погрешности косвенных измерений.
12. Обработка результатов прямых многократных равноточных измерений.
13. Правила представления результатов измерений.
14. Сигналы измерительной информации.
15. Классификация датчиков.
16. Основные технические и метрологические характеристики датчиков.
17. Реостатные датчики. Принцип действия, конструкция, характеристики, применения.
18. Тензочувствительные датчики.
19. Термочувствительные датчики.
20. Индуктивные датчики
21. Емкостные датчики.
22. Ионизационные датчики.
23. Фотоэлектрические датчики.
24. Термоэлектрические датчики.
25. Индукционные датчики.
26. Пьезоэлектрические датчики.
27. Датчики Холла.
28. Химические датчики.
29. Оптоэлектронные датчики.
30. Интеллектуальные датчики.
31. Измерение перемещений и уровней.
32. Измерение давления.
33. Измерение вибраций.
34. Датчики температуры с частотным выходом
35. Датчики магнитного поля с частотным выходом
36. Датчики линейного перемещения с частотным выходом.
37. Датчики углового перемещения с частотным выходом.
38. Измерительные цепи датчиков. Их сравнительная характеристика.
39. Обзор наиболее известных мировых производителей датчиков.

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебное пособие / Перемитина Т. О. - 2016. 150 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6715>, дата обращения: 06.05.2018.
2. Основы научных исследований и патентоведение: Учебное пособие / Озеркин Д. В., Алексеев В. П. - 2012. 171 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1283>, дата обращения: 06.05.2018.

Дополнительная литература

1. Автоматизация измерений, контроля и испытаний [Текст] : учебник для вузов / К. П. Ла- тышен-ко. - М. : Академия, 2012. - 320 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 15 экз.)
2. Интеллектуальные средства измерений [Текст]: учебник для вузов / Г. Г. Раннев. - М. : Академия, 2011. - 272 с (наличие в библиотеке ТУСУР - 10 экз.)
3. Теория ошибок и обработка результатов измерений: учебное пособие / П. Н. Дробот; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2011. – 83 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 20 экз.)