



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЭиАС  
С.И. Лукьянов

26.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**СЕНСОРНЫЕ ДАТЧИКИ**

Направление подготовки (специальность)  
11.04.04 Электроника и микроэлектроника

Направленность (профиль/специализация) программы  
Промышленная электроника и автоматика электротехнических комплексов

Уровень высшего образования - магистратура

Форма обучения  
очная

Институт/ факультет	Институт энергетики и автоматизированных систем
Кафедра	Электроники и микроэлектроники
Курс	2
Семестр	3

Магнитогорск  
2020 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и микроэлектроника (уровень магистратуры) (приказ Минобрнауки России от 22.09.2017 г. № 959)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

13.02.2020 г. протокол № 6

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЭиАС

26.02.2020 г. протокол № 5

Председатель \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры ЭиМЭ, канд. техн. наук \_\_\_\_\_ Н.В. Швидченко

Рецензент:

директор СЦ ООО "ТЕХНОАП Инжиниринг", канд. техн. наук \_\_\_\_\_ Е.С. Суспицын



## Лист актуализации рабочей программы

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2020 - 2021 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от 31.08.2020 г. № 1

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2023 - 2024 учебном году на заседании кафедры Электроники и микроэлектроники

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

### **1 Цели освоения дисциплины (модуля)**

Целями освоения дисциплины «Сенсорные датчики» являются изучение основных принципов проведения измерений и получение навыков в разработке и выборе измерительных систем под конкретные задачи измерения.

### **2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина Сенсорные датчики входит в часть учебного плана формируемую участниками образовательных отношений образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Технологические датчики

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Выполнение и защита выпускной квалификационной работы

Производственная-преддипломная практика

### **3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения**

В результате освоения дисциплины (модуля) «Сенсорные датчики» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код индикатора	Индикатор достижения компетенции
ПК-6	Способен проводить аппаратное макетирования и экспериментальные работы по проверке достижимости технических характеристик, планируемых при проектировании электронной аппаратуры
ПК-6.1	Проводит экспериментальные исследования электронных устройств и систем по проверке достижимости технических характеристик, планируемых при проектировании электронной аппаратуры
ПК-6.2	Осуществляет контроль соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам

#### 4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 зачетных единиц 36 академических часов, в том числе:

- контактная работа – 9,55 академических часов;
- аудиторная – 9 академических часов;
- внеаудиторная – 0,55 академических часов
- самостоятельная работа – 26,45 академических часов;

Форма аттестации - зачет

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в академических часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек.	лаб. зан.	практ. зан.				
1. Основные принципы построения измерительных систем								
1.1 Обобщённая структура измерительной системы. Статические характеристики элементов измерительной системы: систематические и статистические. Ошибка измерения в установившемся режиме. Способы уменьшения статической ошибки	3	1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям и контрольной работе	контрольная работа	
1.2 Динамические характеристики элементов измерительной системы. Динамическая ошибка при измерении. Способы уменьшения динамической ошибки измерения.		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям и контрольной работе	контрольная работа	
1.3 Применение теории четырёхполосников для расчёта измерительных систем		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям и контрольной работе	контрольная работа	

1.4 Сигналы и шум в измерительных системах. Влияние шума и помех на измерительные цепи. Источники шума. Методы снижения влияния шума и помех на процесс измерения.		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям и контрольной работе	контрольная работа	
1.5 Надёжность измерительной системы. Способы повышения надёжности измерительной системы.		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям и контрольной работе	контрольная работа	
Итого по разделу		5			15			
2. Основные элементы измерительных систем								
2.1 Основные типы сенсоров (чувствительных элементов). Классификация сенсоров: по физическому принципу измерения, по типу выходного сигнала,	3	1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям.		
2.2 Основные схемы формирования сигнала: мерительные мосты, усилители, схемы модуляции, демодуляции, осцилляторы и резонаторы.		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям.		
2.3 Элементы обработки сигналов: АЦП, ЦАП, микроконтроллеры, компьютеры, ЦОС		1			3	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям.		
2.4 Элементы отображения информации. Обзор и выбор		1			2,45	самостоятельное изучение учебной литературы. Подготовка к практическим занятиям.		
Итого по разделу		4			11,45			
Итого за семестр		9			26,45		зачёт	
Итого по дисциплине		9			26,45		зачет	

## **5 Образовательные технологии**

Практические занятия проходят как в традиционной форме, так и в интерактивной форме, где студентам заранее предлагается ознакомиться с информацией по теме занятия для подготовки вопросов преподавателю, таким образом, практическое занятие проходит по типу «вопросы–ответы–дискуссия». На всех практических занятиях также применяются элементы занятия-визуализации, за счет представления части материала с помощью заранее подготовленных презентаций, слайдов с помощью мультимедийного оборудования.

Теоретический материал, освоенный студентами самостоятельно, закрепляется на практических занятиях, на которых выполняются индивидуальные и групповые задания по пройденной теме. Часть практических занятий проводится в виде традиционных семинаров с целью более глубокого и полного усвоения теоретического материала по данной теме. Для этого студентам предлагается готовить доклады по рассматриваемой теме с дальнейшим обсуждением в ходе практического занятия (учебных дискуссий). На практических занятиях также применяются метод контекстного обучения, работы в команде и метод case-study, позволяющие усвоить учебный материал путём выявления связей между конкретным знанием и его применением, а также анализа конкретных ситуаций и поиска решений в группе студентов. Защита результатов практических заданий проходит в виде диалога преподавателя и студента, преподавателем задаются контрольные вопросы с целью выяснения глубины знаний студента по данному разделу, при этом пробелы в знаниях студента восполняются дополнительными пояснениями, комментариями преподавателя.

В качестве оценочных средств на протяжении семестра используются контрольные работы. Самостоятельная работа студентов заключается в проработке материала при подготовке к практическим занятиям.

## **6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Представлено в приложении 1.

## **7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации**

Представлены в приложении 2.

## **8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

### **а) Основная литература:**

1. Датчики : справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин. — Москва : Техносфера, 2012. — 624 с. — ISBN 978-5-94836-316-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/73560> (дата обращения: 08.05.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### **б) Дополнительная литература:**

1. Войтович, И. Д. Интеллектуальные сенсоры : учебное пособие / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский. — 2-е изд. — Москва : ИНТУИТ, 2016. — 1164 с. — ISBN 978-5-9963-0124-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/100608> (дата обращения: 08.05.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Шалыгин, М. Г. Автоматизация измерений, контроля и испытаний : учебное пособие / М. Г. Шалыгин, Я. А. Вавилин. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 172 с. — ISBN 978-5-8114-3531-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/115498> (дата обращения: 24.10.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### **в) Методические указания:**

1. Методические указания приведены в приложении 3.

**г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

**Программное обеспечение**

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
MS Windows 7 Professional(для классов)	Д-1227-18 от 08.10.2018	11.10.2021
MS Office 2007 Professional	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно
NI MultiSim Education	К-68-08 от 29.05.2008	бессрочно
MathWorks MathLab v.2014 Classroom License	К-89-14 от 08.12.2014	бессрочно
NI Developer Suite	К-118-08 от 20.10.2008	бессрочно

**Профессиональные базы данных и информационные справочные системы**

Название курса	Ссылка
Поисковая система Академия Google (Google Scholar)	URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности»	URL: <a href="http://www1.fips.ru/">http://www1.fips.ru/</a>

**9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Компьютерный класс: Персональные компьютеры с установленным ПО для проектирования и моделирования измерительных систем (MathLab и NI Multisim) (ауд. 357).

Аудитория для самостоятельной работы: компьютерный класс. Персональные компьютеры с установленным ПО для проектирования и моделирования измерительных систем (MathLab и NI Multisim) (ауд. 357).

**Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.**

По дисциплине «Сенсорные датчики» предусмотрена внеаудиторная самостоятельная работа обучающихся.

Внеаудиторная самостоятельная работа студентов предполагает изучения литературы по соответствующему разделу с проработкой материала и решение контрольных задач.

Примерные внеаудиторные контрольные работы (КР):

КР №1 «Обобщённая структура измерительной системы. Статические характеристики элементов измерительной системы: систематические и статистические. Ошибка измерения в установленном режиме. Способы уменьшения статической ошибки измерения.»:

1. Датчик усилия имеет выходной диапазон от 1 до 5 В, соответствующий входному диапазону от 0 до  $2 \times 10^5$ Н. Найдите уравнение аппроксимирующей прямой.

2. Датчик перепада давления имеет входной диапазон от 0 до  $2 \times 10^4$ Па и выходной диапазон от 4 до 20 мА. Найдите уравнение аппроксимирующей прямой.

3. Нелинейный датчик давления имеет входной диапазон от 0 до 10 бар и выходной диапазон от 0 до 5 В. При давлении в 4 бара выходное напряжение составляет 2,2 В. Рассчитайте нелинейность в вольтах и в процентах относительно выходного диапазона.

4. Нелинейный датчик температуры имеет входной диапазон от 0 до 400 °С и выходной диапазон от 0 до 20 мВ. При температуре в 100 °С выходной сигнал равен 4,5 мВ. Определите нелинейность при 100°С в милливольтках и в процентах от выходного диапазона.

5. Термопара используется для измерения температуры в диапазоне от 0 до 500 °С.

При калибровке были получены следующие значения:

T,оС	0	100	200	300	500
E, мкВ	0	5286	10 777	16 325	27 388

6. Датчик давления имеет выходной диапазон от 1,0 до 5,0В при стандартной температуре окружающей среды в 20°С, и выходной диапазон от 1,2 до 5,2В при температуре 30°С. Оцените количественно влияние данной внешней помехи на передаточную характеристику.

7. Датчик давления имеет входной диапазон от 0 до  $10^4$ Па и выходной диапазон от 4 до 20мА при стандартной температуре окружающей среды 20°С. Если температура окружающей среды вырастает до 30°С, то выходной диапазон становится равным от 4,2 до 20,8мА. Найдите значения параметров  $K_I$  и  $K_M$  влияния данной внешней помехи.

8. Аналогово-цифровой преобразователь имеет входной диапазон от 0 до 5В. Рассчитайте разрешающую способность (ошибку) в вольтах и в процентах относительно входного диапазона:

- для 8-разрядного АЦП;
- для 16-разрядного АЦП.

9. Датчик уровня имеет выходной диапазон от 0 до 10В. Для уровня 3 метра, выходной сигнал имеет значения 3,05В и 2,95В для случаев падения и возрастания уровня соответственно. Найдите значение гистерезиса в процентах относительно выходного диапазона.

10. ЭДС спая термопары принимает значение 645мкВ для точки пара, 3375мкВ для точки цинка и 9149мкВ для точки серебра. Принимая, что зависимость ЭДС от температуры имеет вид  $E(t)=a_1T+a_2T^2+a_3T^3$  ( $T$  в °С), найдите  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$ .

11. Зависимость сопротивления термистора от температуры имеет вид  $R(\theta)=\alpha \cdot \exp(\beta/\theta)$  ( $\theta$  в К). Сопротивление термистора для точки льда (273,15К) составляет 9,00кОм, а сопротивление в точке пара 0,50кОм. Определите сопротивление термистора при 25°С.

12. Датчик смещения имеет входной диапазон от 0,0 до 3,0см и стандартное напряжение питания  $V_S$  0,5В. Используя результаты калибровки, приведённые в таблице, определите:

- максимальную нелинейность в процентах относительно выходного диапазона;
- коэффициенты  $K_I$ ,  $K_M$ , характеризующие влияние изменения напряжения питания;
- коэффициент наклона аппроксимирующей прямой.

Смещение $x$ , см	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Выходное напряжение, мВ ( $V_S=0,5$ )	0,0	16,5	32,0	44,0	51,5	55,5	58,0
Выходное напряжение, мВ ( $V_S=0,6$ )	0,0	21,0	41,5	56,0	65,0	70,5	74,0

13. Измерительная система состоит из термопары типа хромель-алюмель (с компенсацией холодного спая), преобразователя в токовый сигнал (А/мВ) и самописца. В таблице приведены уравнения и параметры данных элементов. Предполагая, что все распределения вероятностей являются нормальными, рассчитайте среднее и стандартное отклонение распределения вероятности ошибки измерения, при входной температуре 117°С.

	Chromel–alumel thermocouple	e.m.f-to-current converter	Recorder
Model equation	$E = C_0 + C_1T + C_2T^2$	$i = K_1E + K_M E \Delta T_a + K_I \Delta T_a + a_1$	$T_M = K_2i + a_2$
Mean values	$\bar{C}_0 = 0.00$ $\bar{C}_1 = 4.017 \times 10^{-2}$ $\bar{C}_2 = 4.66 \times 10^{-6}$	$\bar{K}_1 = 3.893$ $\Delta T_a = -10$ $\bar{a}_1 = -3.864$ $\bar{K}_M = 1.95 \times 10^{-4}$ $\bar{K}_I = 2.00 \times 10^{-3}$	$\bar{K}_2 = 6.25$ $\bar{a}_2 = 25.0$
Standard deviations	$\sigma_{C_0} = 6.93 \times 10^{-2}$ $\sigma_{C_1} = \sigma_{C_2} = 0$	$\sigma_{a_1} = 0.14, \sigma_{\Delta T_a} = 10$ $\sigma_{K_1} = \sigma_{K_M} = \sigma_{K_I} = 0$	$\sigma_{a_2} = 0.30$ $\sigma_{K_2} = 0.0$

14. Схема измерения давления состоит из датчика давления, измерительного моста, усилителя и самописца. В таблице приведены коэффициенты  $K$  передаточных линейных характеристик всех элементов системы и соответствующие диапазоны ошибок  $h$ .

- Рассчитайте стандартное отклонение  $\sigma_E$  функции распределения ошибки измерения.

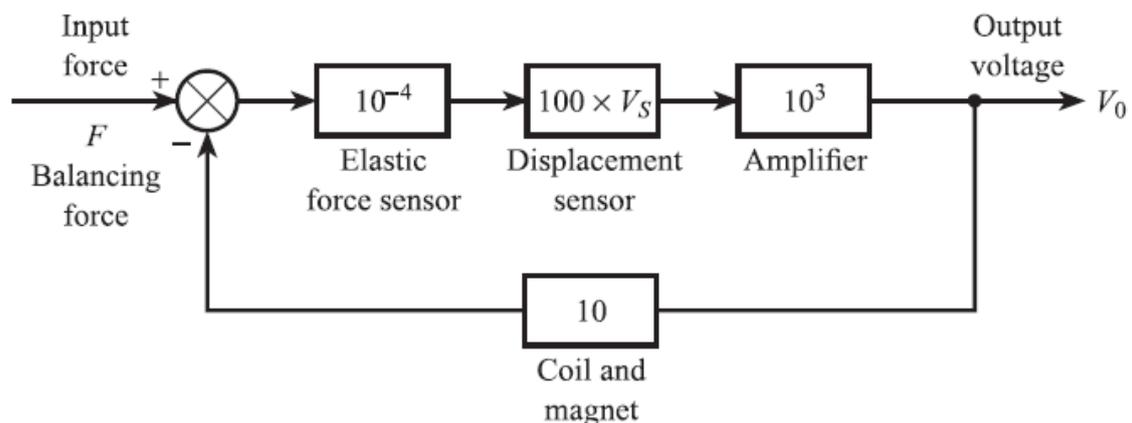
- Учитывая, что самописец настроен неправильно, так что его чувствительность составляет 225Па/мВ, рассчитайте среднее значение ошибки измерения  $\bar{E}$  при входном давлении  $5 \cdot 10^3$ Па.

Element	Linear sensitivity $K$	Error bandwidth $\pm h$
Pressure sensor	$10^{-4} \Omega \text{ Pa}^{-1}$	$\pm 0.005 \Omega$
Deflection bridge	$4 \times 10^{-2} \text{ mV } \Omega^{-1}$	$\pm 5 \times 10^{-4} \text{ mV}$
Amplifier	$10^3 \text{ mV mV}^{-1}$	$\pm 0.5 \text{ mV}$
Recorder	$250 \text{ Pa mV}^{-1}$	$\pm 100 \text{ Pa}$

15. На рисунке приведена структурная схема датчика усилия, охваченного отрицательной обратной связью. Сенсор (пружина) преобразует усилие в перемещение; датчик перемещения преобразует полученное перемещение в сигнал напряжения.  $V_S$  – напряжение источника питания датчика перемещения. Источник питания нестабилен.

Рассчитайте выходное напряжение  $V_0$  при:

- $V_S = 1\text{В}; F = 50\text{Н};$
- $V_S = 1,5\text{В}; F = 50\text{Н}.$

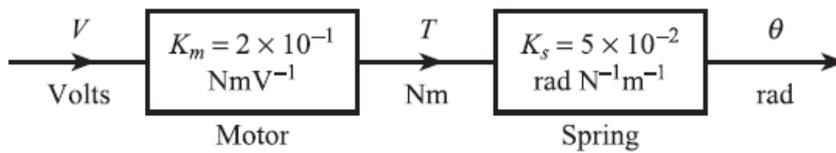


16. На рисунке приведена структурная схема вольтметра. Мотор создаёт момент  $T$  пропорциональный входному напряжению  $V$ , а угловое смещение пружины  $\theta$  пропорционально моменту  $T$ . Жёсткость пружины  $K_S$  может варьироваться в диапазоне  $\pm 10\%$  относительно номинального значения  $5 \cdot 10^{-2}$  рад/Нм. Дополнительно доступны следующие элементы:

- усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления  $K=1000$ ;
- вычитатель напряжения;
- стабильный датчик угловых перемещений с передаточным коэффициентом 100В/рад.

– Используя дополнительные элементы, нарисуйте модифицированную схему, в которой уменьшено влияние изменения жёсткости пружины.

– Рассчитайте влияние увеличения жёсткости пружины  $K_S$  на 10% на чувствительность модифицированной системы.



КР №2 «Динамические характеристики элементов измерительной системы. Динамическая ошибка при измерении. Способы уменьшения динамической ошибки измерения».

1. Система измерения температуры состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью  $K$ , равной единице. Динамика системы определяется передаточной функцией первого порядка чувствительного элемента. В момент времени  $t = 0$  чувствительный элемент внезапно переносится из воздуха при  $20^\circ\text{C}$  в кипящую воду. Через минуту элемент возвращается в воздушную среду. Используя данные, приведенные ниже, рассчитайте динамическую ошибку системы в следующие моменты времени:  $t = 10, 20, 50, 120$  и  $300\text{c}$ .

Параметры сенсора:

- масса =  $5 \times 10^{-2}$  кг;
- площадь поверхности =  $10^{-3}$  м<sup>2</sup>;
- удельная теплоемкость =  $0,2$  Дж/(кг $^\circ\text{C}$ );
- коэффициент теплопередачи для воздуха =  $0,2$  Вт/(м<sup>2</sup> $^\circ\text{C}$ );
- коэффициент теплопередачи для воды =  $1,0$  Вт/(м<sup>2</sup> $^\circ\text{C}$ ).

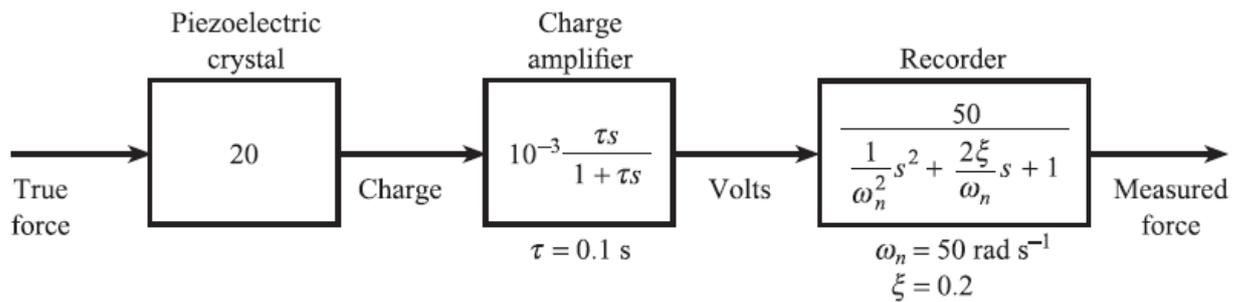
2. Система измерения усилия состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью  $K$ , равной единице. Динамика системы определяется передаточной функцией второго порядка чувствительного элемента, которая имеет собственную частоту  $\omega_n = 40$  рад/с и коэффициент демпфирования  $\xi = 0,1$ . Вычислите динамическую ошибку системы при измерении усилия, изменяющегося по следующему закону:

$$F(t) = 50(\sin 10t + \frac{1}{3} \sin 30t + \frac{1}{5} \sin 50t)$$

3. Термопара, измеряющая температуру в быстро движущейся жидкости имеет постоянную времени  $10\text{c}$ .

- Рассчитайте ширину полосы частотной характеристики термопары.
- Найдите диапазон частот, для которых отношение амплитуд находится в пределах  $\pm 5\%$ .
- Для компенсации инерционности термопары используется схема с передаточной функцией  $G(s) = (1 + 10s)/(1 + s)$ . Рассчитайте диапазон частот, для которых отношение амплитуд компенсированной системы находится в пределах  $\pm 5\%$ .
- Скорость жидкости уменьшается, в результате чего постоянная времени термопары увеличивается до  $20\text{c}$ . Зарисуйте АЧХ  $|G(j\omega)|$  и объясните, почему эффективность вышеуказанной компенсации снижается.

4. Система измерения усилия, состоящая из пьезоэлектрического кристалла, усилителя заряда (интегратора) и регистратора, показана на рисунке:



- Рассчитайте динамическую ошибку системы при изменении усилия по следующему закону:

$$F(t) = 50(\sin 10t + \frac{1}{3} \sin 30t + \frac{1}{5} \sin 50t)$$

- Объясните какие параметры нужно изменить в системе для уменьшения динамической ошибки, полученной в предыдущем задании.

5. Система измерения температуры для газового реактора состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью  $K$ , равной единице. Датчик температуры имеет постоянную времени  $5,0\text{с}$ ; также используется идеальный фильтр нижних частот с частотой среза  $0,05\text{Гц}$ . Входной температурный сигнал является периодическим с периодом  $63\text{с}$  и может быть аппроксимирован рядом Фурье:

$$T(t) = 10(\sin \omega_0 t + \frac{1}{2} \sin 2\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{4} \sin 4\omega_0 t)$$

где  $\omega_0$  – угловая частота основной гармоники.

- Рассчитайте изменение выходного сигнала;
- Рассчитайте изменение динамической ошибки;
- Объясните какие параметры нужно изменить в системе для уменьшения полученной динамической ошибки.

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
ПК-2 Способен разрабатывать структурные и функциональные схемы электронных систем и комплексов, принципиальных схем устройств с использованием средств компьютерного проектирования, проведением проектных расчетов и технико-экономическим обоснованием принимаемых решений		
ПК-2.1	<p>Разрабатывает эскизный проект, включающей: выбор структурной схемы электронного устройства или системы путем сопоставления различных вариантов и их оценки с точки зрения технических и экономических требований; расчет всех необходимых показателей структурной схемы электронного устройства или системы, в том числе показателей качества; выбор и обоснование схемы вспомогательных устройств</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>какова структура обобщенной измерительной системы?</i></li> <li>– <i>что такое «ошибка измерительной системы»?</i></li> <li>– <i>каково назначение сенсора (чувствительного элемента) в обобщенной измерительной системе? Приведите примеры сенсоров.</i></li> <li>– <i>каково назначение формирователя сигнала в обобщенной измерительной системе? Приведите примеры формирователей сигналов.</i></li> <li>– <i>каково назначение обработчика сигнала в обобщенной измерительной системе? Приведите примеры обработчиков сигналов.</i></li> <li>– <i>каково назначение элемента отображения в обобщенной измерительной системе? Приведите примеры элементов отображения.</i></li> <li>– <i>что такое «статическая характеристика элемента измерительной системы»?</i></li> <li>– <i>что такое систематические характеристики элементов измерительной системы? Приведите примеры систематических характеристик.</i></li> <li>– <i>что такое нелинейность элемента измерительной системы? Как рассчитывается?</i></li> <li>– <i>что такое чувствительность элемента измерительной системы? Как рассчитывается?</i></li> <li>– <i>каков эффект влияния внешних помех на измерения: что такое эффект приращения и изменение чувствительности относительно характеристики элемента измерительной системы?</i></li> <li>– <i>в чём заключается эффект гистерезиса? Приведите примеры.</i></li> <li>– <i>что такое разрешающая способность?</i></li> <li>– <i>каким образом изменяются характеристики элементов при старении и износе?</i></li> <li>– <i>что такое «диапазон ошибки»?</i></li> <li>– <i>что такое статистические характеристики элементов измерительной системы? Приведите примеры статистических характеристик.</i></li> <li>– <i>что такое повторяемость?</i></li> <li>– <i>что такое «комбинирование</i></li> </ul>

		<p>погрешностей)?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– что такое «допуск»?</li> <li>– как рассчитывается среднее значение и стандартное отклонение выхода элемента при условии нормального распределения отклонений в измерениях?</li> <li>– что такое калибровка?</li> <li>– чем отличается точность от погрешности?</li> <li>– назовите способы уменьшения статической ошибки.</li> <li>– объясните способ компенсации нелинейности.</li> <li>– перечислите способы компенсации внешнего возмущения.</li> <li>– в чём заключается метод противодействия внешнему возмущению?</li> <li>– каким образом ООС компенсирует внешнее возмущение?</li> <li>– каким образом использование дифференциальных схем компенсирует внешнее возмущение?</li> <li>– что такое «динамическая характеристика элемента измерительной системы»?</li> <li>– что такое «звено первого порядка»? Какова передаточная функция?</li> <li>– для чего применяется преобразование Лапласа?</li> <li>– что такое «звено второго порядка»? Какова передаточная функция?</li> <li>– в чём заключается принцип аналогии при описании различных физических процессов звеньями первого и второго порядка?</li> <li>– каким образом выполняется идентификация передаточной функции элемента, по реакции на единичный сигнал?</li> <li>– каким образом выполняется идентификация передаточной функции элемента, по реакции на гармонический сигнал?</li> <li>– что такое «динамическая ошибка»?</li> <li>– перечислите способы уменьшения динамической ошибки.</li> <li>– в чём заключаются конструктивные способы снижения динамической ошибки?</li> <li>– в чём заключается способ динамической компенсации.</li> <li>– каким образом ООС уменьшает динамическую ошибку? Что такое глубина ООС?</li> <li>– что такое четырёхполюсник?</li> <li>– в чём заключается теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)?</li> <li>– в чём заключается теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Норттона)?</li> <li>– перечислите методы снижения влияния шума и помех на измерение.</li> </ul>
--	--	--

<p>ПК-2.2</p>	<p>Подготавливает технический проект, включающего: разработку принципиальной схемы всего электронного устройства и отдельных его деталей и узлов; выбор типа элементов с учетом технических требований к разрабатываемому устройству, экономической целесообразности и предполагаемой технологии его изготовления</p>	<p>– перечислите способы повышения надёжности измерительной системы.</p> <p>– Датчик усилия имеет выходной диапазон от 1 до 5 В, соответствующий входному диапазону от 0 до <math>2 \times 10^5</math> Н. Найдите уравнение аппроксимирующей прямой.</p> <p>– Датчик перепада давления имеет входной диапазон от 0 до <math>2 \times 10^4</math> Па и выходной диапазон от 4 до 20 мА. Найдите уравнение аппроксимирующей прямой.</p> <p>– Нелинейный датчик давления имеет входной диапазон от 0 до 10 бар и выходной диапазон от 0 до 5 В. При давлении в 4 бара выходное напряжение составляет 2,2 В. Рассчитайте нелинейность в вольтах и в процентах относительно выходного диапазона.</p> <p>– Нелинейный датчик температуры имеет входной диапазон от 0 до 400 °С и выходной диапазон от 0 до 20 мВ. При температуре в 100 °С выходной сигнал равен 4,5 мВ. Определите нелинейность при 100 °С в милливольтках и в процентах от выходного диапазона.</p> <p>– Датчик давления имеет выходной диапазон от 1,0 до 5,0В при стандартной температуре окружающей среды в 20°С, и выходной диапазон от 1,2 до 5,2В при температуре 30°С. Оцените количественно влияние данной внешней помехи на передаточную характеристику.</p> <p>– Датчик давления имеет входной диапазон от 0 до <math>10^4</math> Па и выходной диапазон от 4 до 20мА при стандартной температуре окружающей среды 20°С. Если температура окружающей среды вырастает до 30°С, то выходной диапазон становится равным от 4,2 до 20,8мА. Найдите значения параметров КI и КМ влияния данной внешней помехи.</p> <p>– Аналогово-цифровой преобразователь имеет входной диапазон от 0 до 5В. Рассчитайте разрешающую способность (ошибку) в вольтах и в процентах относительно входного диапазона:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– для 8-разрядного АЦП;</li> <li>– для 16-разрядного АЦП.</li> </ul> <p>– Датчик уровня имеет выходной диапазон от 0 до 10В. Для уровня 3 метра, выходной сигнал имеет значения 3,05В и 2,95В для случаев падения и возрастания уровня соответственно. Найдите значение гистерезиса в процентах относительно выходного диапазона.</p> <p>– ЭДС спая термопары принимает значение 645мкВ для точки пара, 3375мкВ для точки цинка и 9149мкВ для точки серебра. Принимая, что зависимость ЭДС от температуры имеет вид <math>E(t)=a1T+a2T^2+a3T^3</math> (T в оС), найдите a1, a2 и a3.</p> <p>– Зависимость сопротивления</p>
---------------	---	---

		<p>термистора от температуры имеет вид <math>R(\theta) = \alpha \cdot \exp(\beta/\theta)</math> (<math>\theta</math> в К). Сопротивление термистора для точки льда (273,15К) составляет 9,00кОм, а сопротивление в точке пара 0,50кОм. Определите сопротивление термистора при 25°С.</p>
<p>ПК-2.3</p>	<p>Производит технико-экономическое обоснование принятого решения с расчетами себестоимости устройства и стоимости его эксплуатации; сравнение с аналогами по технико-экономическим характеристикам</p>	<p>– Система измерения температуры состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью К, равной единице. Динамика системы определяется передаточной функцией первого порядка чувствительного элемента. В момент времени <math>t = 0</math> чувствительный элемент внезапно переносится из воздуха при 20°С в кипящую воду. Через минуту элемент возвращается в воздушную среду. Используя данные, приведенные ниже, рассчитайте динамическую ошибку системы в следующие моменты времени: <math>t = 10, 20, 50, 120</math> и <math>300</math>с.</p> <p>– Параметры сенсора:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– масса = <math>5 \times 10^{-2}</math> кг;</li> <li>– площадь поверхности = <math>10^{-3}</math> м<sup>2</sup>;</li> <li>– удельная теплоемкость = 0,2 Дж/(кг°С);</li> <li>– коэффициент теплопередачи для воздуха = 0,2 Вт/(м<sup>2</sup>°С);</li> <li>– коэффициент теплопередачи для воды = 1,0 Вт/(м<sup>2</sup>°С).</li> </ul> <p>– Система измерения усилия состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью К, равной единице. Динамика системы определяется передаточной функцией второго порядка чувствительного элемента, которая имеет собственную частоту <math>\omega_n = 40</math> рад/с и коэффициент демпфирования <math>\zeta = 0,1</math>. Вычислите динамическую ошибку системы при измерении усилия, изменяющегося по следующему закону:</p> <p>– <math>F(t) = 50(\sin 10t + \frac{1}{3} \sin 30t + \frac{1}{5} \sin 50t)</math></p> <p>– Термопара, измеряющая температуру в быстро движущейся жидкости имеет постоянную времени 10с.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Рассчитайте ширину полосы частотной характеристики термопары.</li> <li>– Найдите диапазон частот, для которых отношение амплитуд находится в пределах <math>\pm 5\%</math>.</li> <li>– Для компенсации инерционности термопары используется схема с передаточной функцией <math>G(s) = (1 + 10s)/(1 + s)</math>. Рассчитайте диапазон частот, для которых отношение амплитуд компенсированной системы находится в пределах <math>\pm 5\%</math>.</li> <li>– Скорость жидкости уменьшается, в результате чего постоянная времени</li> </ul>

		<p><i>термопары увеличивается до 20с. Зарисуйте <math>AЧХ G(j\omega) </math> и объясните, почему эффективность вышеуказанной компенсации снижается.</i></p> <p><i>– Система измерения температуры для газового реактора состоит из линейных элементов и обладает общей чувствительностью <math>K</math>, равной единице. Датчик температуры имеет постоянную времени 5,0с; также используется идеальный фильтр нижних частот с частотой среза 0,05Гц. Входной температурный сигнал является периодическим с периодом 63с и может быть аппроксимирован рядом Фурье:</i></p> <p><i>– <math>T(t) = 10(\sin \omega_0 t + \frac{1}{2} \sin 2\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{4} \sin 4\omega_0 t)</math></i></p> <p><i>где <math>\omega_0</math> – угловая частота основной гармоники.</i></p> <p><i>– Рассчитайте изменение выходного сигнала;</i></p> <p><i>– Рассчитайте изменение динамической ошибки;</i></p> <p><i>– Объясните какие параметры нужно изменить в системе для уменьшения полученной динамической ошибки.</i></p>
--	--	---

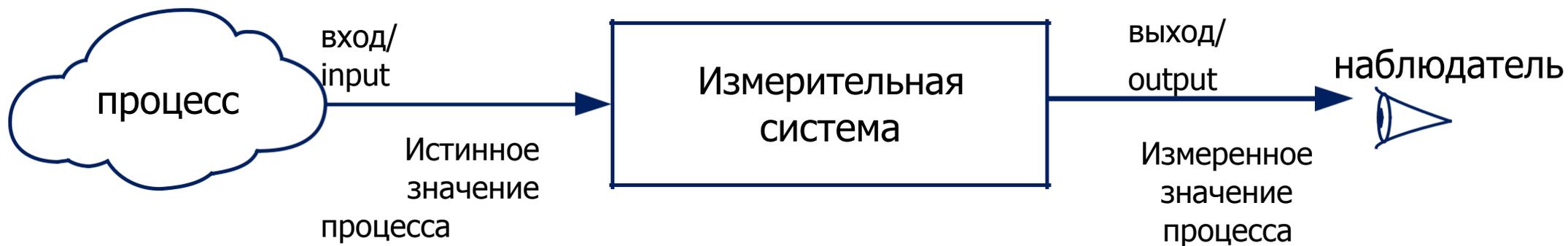
б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:

Промежуточная аттестация по дисциплине «Сенсорные датчики» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме зачёта.

Показатели и критерии оценивания зачёта:

- на оценку «**зачтено**» – обучающийся демонстрирует высокий или средний уровень сформированности компетенций: основные знания, умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.
- на оценку «**не зачтено**» – обучающийся демонстрирует знания не более 20% теоретического материала, допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

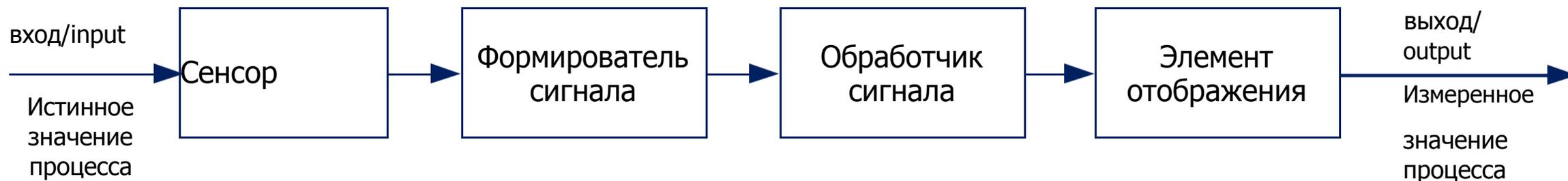
## Цель процесса измерения



## Ошибка измерительной системы

$E =$  измеренное значение процесса – истинное значение процесса;  $E =$  выход системы – вход системы.

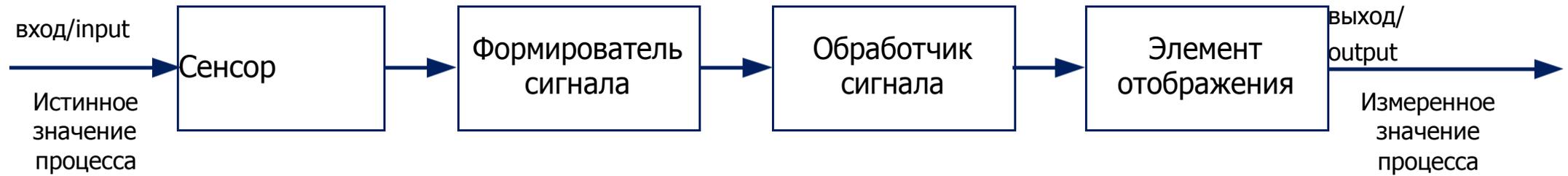
## Обобщённая структура измерительной системы



# Сенсор

Сенсор находится в контакте с процессом и формирует выходной сигнал, зависящий некоторым образом от измеряемой переменной. Примеры:

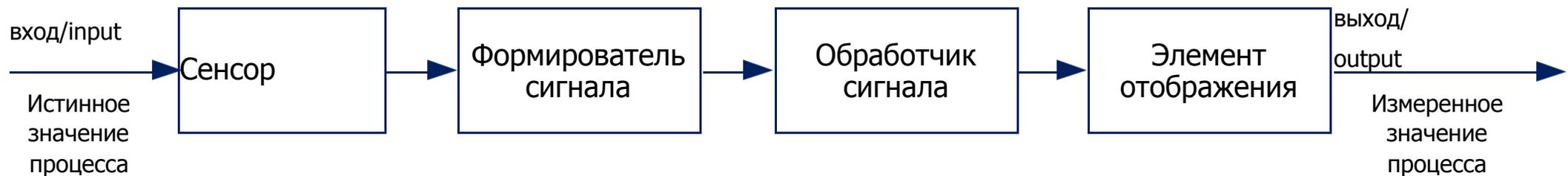
- ЭДС термопары зависит от температуры.
- Сопротивление тензодатчика зависит от механического напряжения.
- Перепад давления диафрагмы зависит от скорости потока.



## Формирователь сигнала

Преобразует выходной сигнал сенсора в более подходящую форму для дальнейшей обработки: переменное напряжение, постоянный ток или частотный сигнал. Примеры:

- Несбалансированный мост (схема Уинстона) преобразует изменение сопротивления в изменение напряжения.
- Усилитель преобразует милливольты в вольты.
- Осциллятор преобразует изменение сопротивления в напряжение переменной частоты.



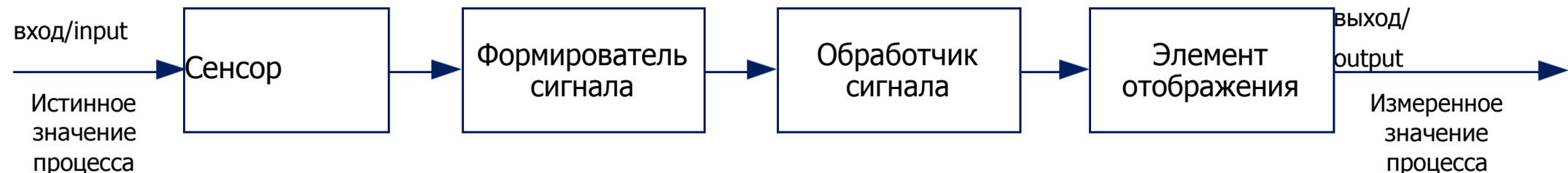
## Обработчик сигнала

Преобразует выходной сигнал формирователя в более подходящую форму для отображения. Примеры:

- Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует напряжение в цифровую форму для ввода в контроллер.
- Контроллер рассчитывает измеренное значение по входным цифровым данным.

Типовые расчёты:

- Расчёт общей массы потребляемого газа по данным о его расходе и плотности.
- Расчёт расхода сыпучего материала по его массе.
- Расчёт интеграла для пиков хроматографа для получения состава газового потока.
- Корректировка нелинейности характеристики сенсора.

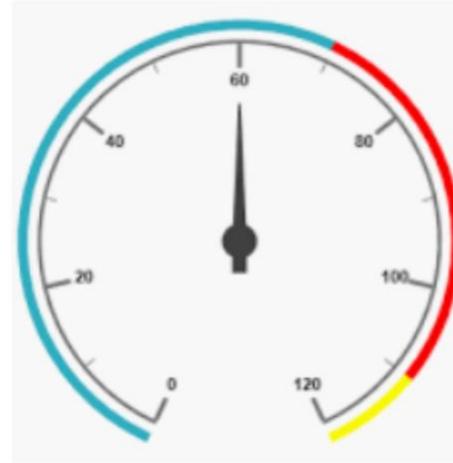


# Элемент отображения

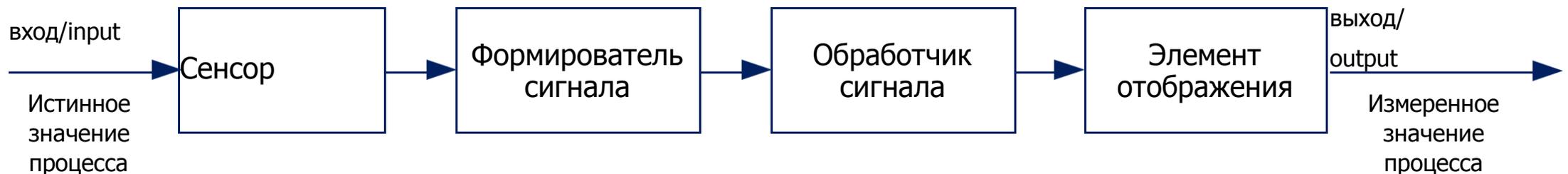
Представляет измеренное значение в форме легко распознаваемой наблюдателем.

Примеры:

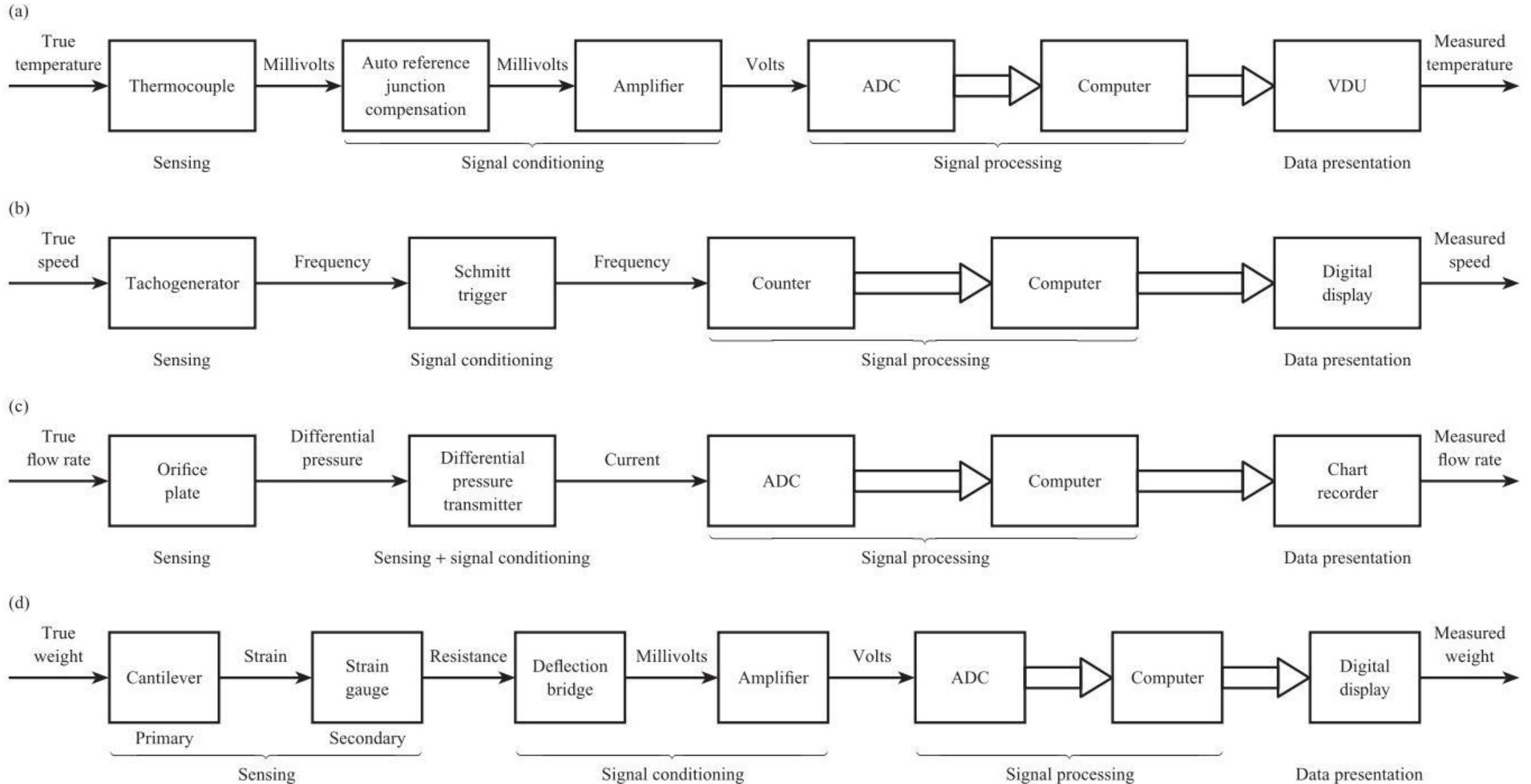
- Простой масштабный индикатор.
- Самописец.
- Буквенно-цифровой дисплей.
- Монитор.



Visual Display Unit



# Примеры измерительных систем



## Статические характеристики элементов измерительной системы

Статическая характеристика элемента (характеристика для установившегося состояния системы) – это соотношение между выходом элемента **out** ( $O$ ) и входом элемента **in** ( $I$ ), когда  $I$  имеет постоянное значение или изменяется медленно.



### Систематические характеристики элементов измерительной системы

Систематическими характеристиками являются такие статические характеристики, которые могут быть точно определены количественно математическими или графическими средствами.

### Статистические характеристики элементов измерительной системы

Статистическими характеристиками являются такие статические характеристики, которые не могут быть точно определены количественно. Они носят вероятностный характер.

## Систематические характеристики. Диапазон

Входной диапазон элемента измерительной системы определяется минимальным и максимальным значениями  $I$ , т.е.  $I_{MIN}$  и  $I_{MAX}$ . Выходной диапазон определяется минимальным и максимальным значениями  $O$ , т.е.  $O_{MIN}$  и  $O_{MAX}$ . Примеры:

- Датчик давления имеет входной диапазон от 0 до  $10^4$  Па и выходной диапазон от 4 до 20 мА.
- Термопара имеет входной диапазон от 100 до 250 °С и выходной диапазон от 4 до 10 мВ.

# Систематические характеристики. Нелинейность

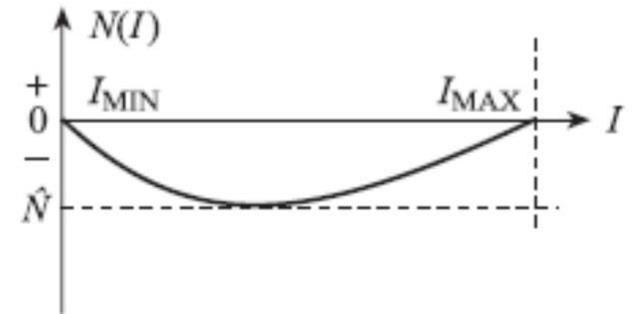
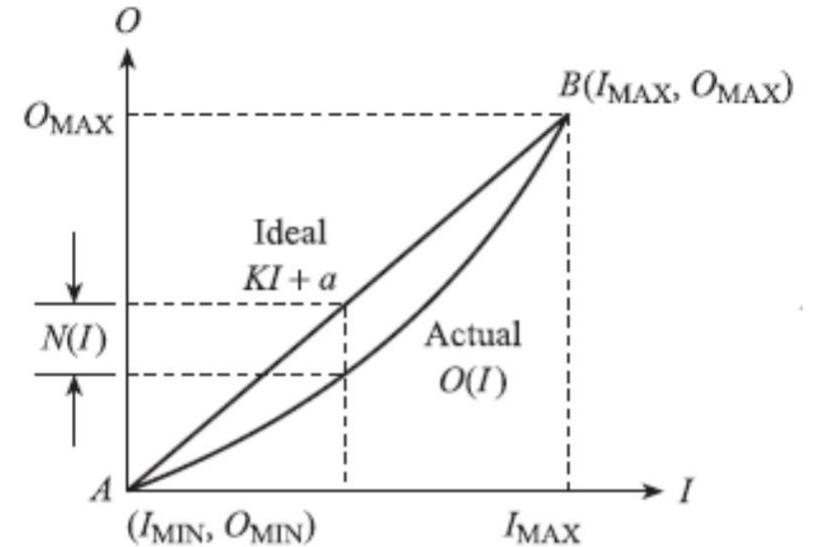
Передаточная характеристика элемента может быть нелинейна. Тогда её можно аппроксимировать прямой линией. Один из простых способов – проведение линии через минимальную и максимальную точку диапазона:

**$A(I_{MIN}, O_{MIN})$  и  $B(I_{MAX}, O_{MAX})$ .**

$$= \frac{O_{MAX} - O_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}}$$

= — коэффициент наклона прямой —

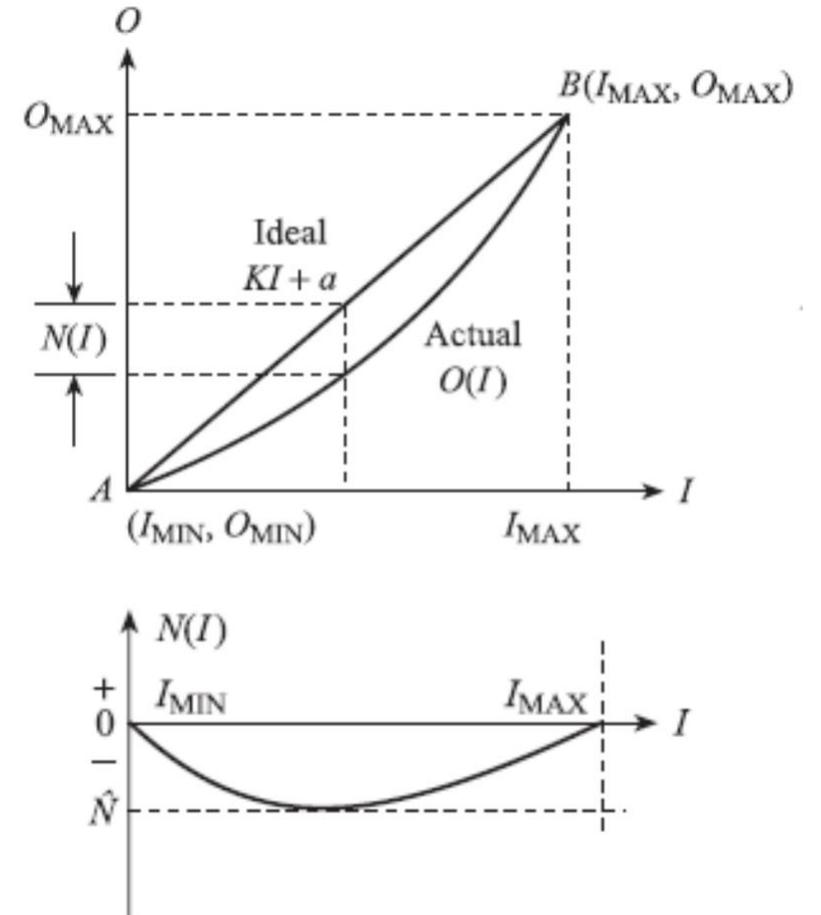
= — коэффициент наклона прямой



# Систематические характеристики. Нелинейность

Нелинейность  $N(I)$  определяется отклонением реальной характеристики элемента от линейной аппроксимации.

Часто рассчитывается максимальная нелинейность в процентах от полного выходного диапазона.



## Систематические характеристики. Нелинейность

Примеры:

- Датчик давления с максимальным отклонением от линейной характеристики 2 мВ. Если выходной диапазон датчика составляет 100 мВ, то нелинейность системы составляет 2%.
- Зависимость ЭДС  $E$  (мВ) термопары медь-константан (тип Т) от температуры спая  $T$  (°C) может быть представлена следующим полиномом:

$$E(T) = 38.74T + 3.319 \times 10^{-2}T^2 + 2.071 \times 10^{-4}T^3 - 2.195 \times 10^{-6}T^4 + \text{higher-order terms up to } T^8$$

в диапазоне от 0 до 400 °C.

Учитывая, что  $E(0) = 0$  мВ, а  $E(400) = 20\,869$  мВ, линейная аппроксимация имеет следующий вид:

$$E_{\text{IDEAL}} = 52.17T$$

Соответственно нелинейность характеристики термопары будет:

$$N(T) = E(T) - E_{\text{IDEAL}} = -13.43T + 3.319 \times 10^{-2}T^2 + 2.071 \times 10^{-4}T^3 - 2.195 \times 10^{-6}T^4 + \text{higher-order terms}$$

## Систематические характеристики. Чувствительность

Это изменение выхода элемента  $O$  по отношению к изменению входа  $I$ . При устремлении  $I$  к нулю, соотношение  $O/I$  становится производной  $dO/dI$ . Для линейного элемента чувствительность  $dO/dI$  соответствует коэффициенту наклона прямой  $K$ .

Пример:

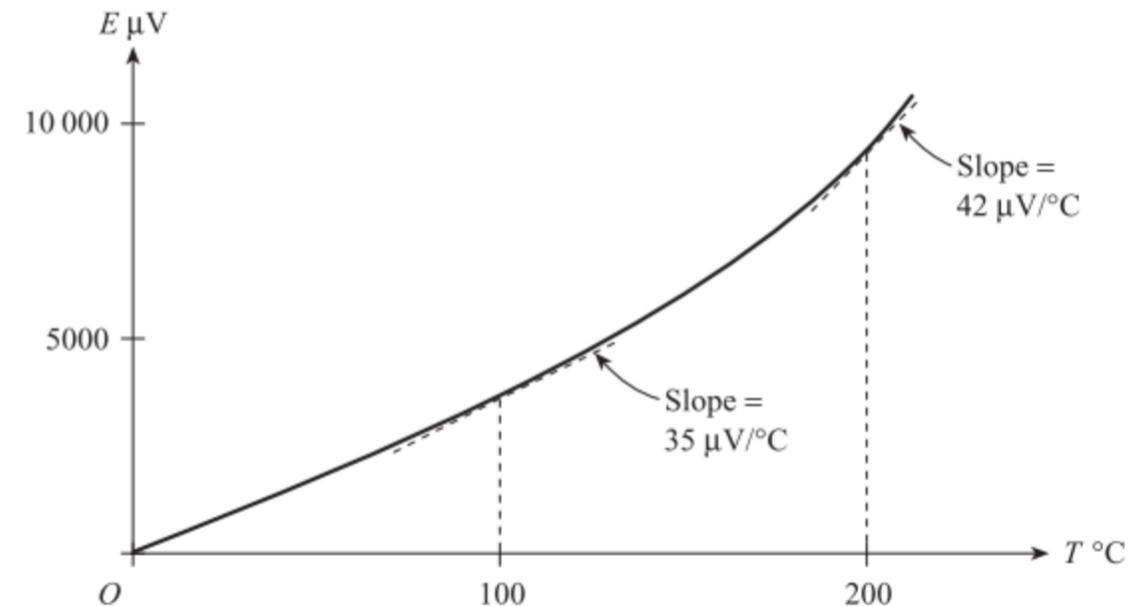
Линейный датчик давления имеет входной диапазон от 0 до  $10^4$  Па и выходной диапазон от 4 до 20 мА. Чувствительность равна  $1.6 \cdot 10^{-3}$  мА/Па.

Для нелинейного элемента чувствительность равна:

$$dO/dI = K + dN/dI$$

Пример:

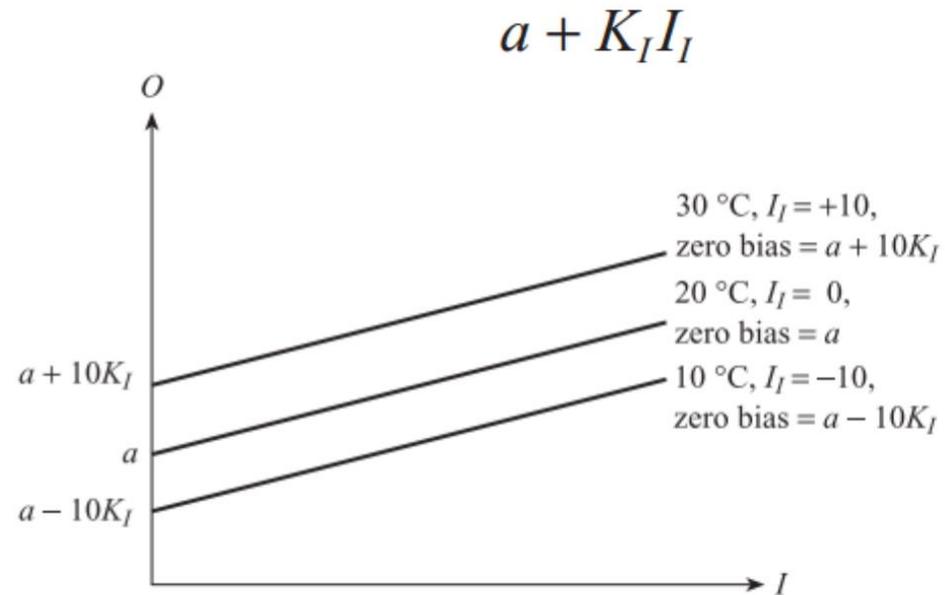
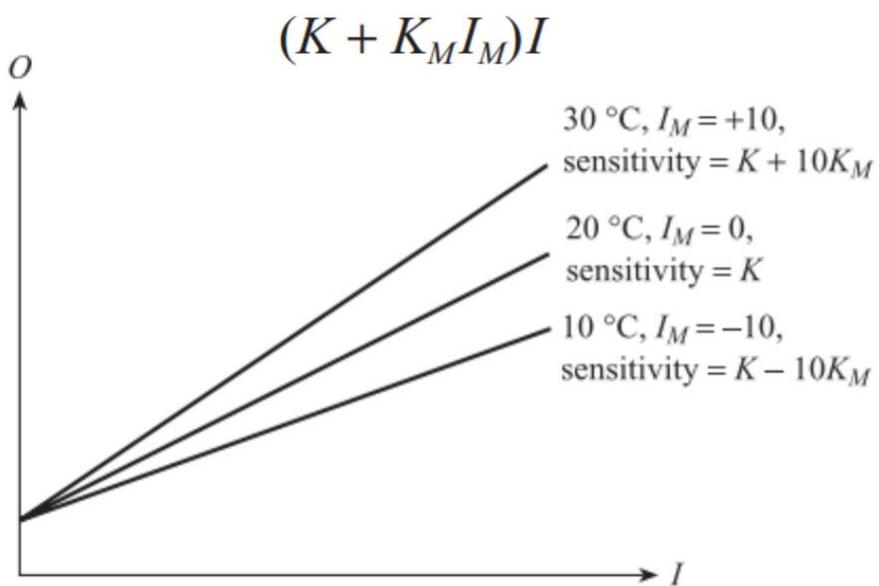
На рисунке приведена зависимость ЭДС термопары Т-типа от температуры спая. Видно, что чувствительность зависит от температуры.



## Систематические характеристики. Внешние помехи

В основном, выход  $O$  зависит не только от входа  $I$ , но и от внешних помех, таких как температура окружающей среды, атмосферное давление, относительная влажность, напряжение источника питания и т.д. Существует два основных результата воздействия внешних помех:

- Изменение чувствительности (наклона характеристики).
- Эффект приращения (сдвиг нуля характеристики).

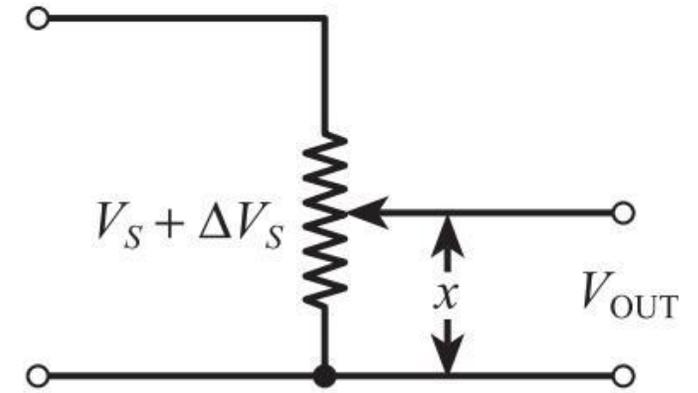


$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I$$

## Систематические характеристики. Внешние помехи

Пример:

- Примером внешней помехи является отклонение  $V_S$  питающего напряжения  $V_S$  в схеме потенциометра. Данная помеха изменяет наклон характеристики.
- Примером внешней помехи является температура холодного спая термопары. Данная помеха меняет сдвиг характеристики.



$$\begin{aligned} V_{OUT} &= (V_S + \Delta V_S)x \\ &= V_S x + \Delta V_S x \end{aligned}$$

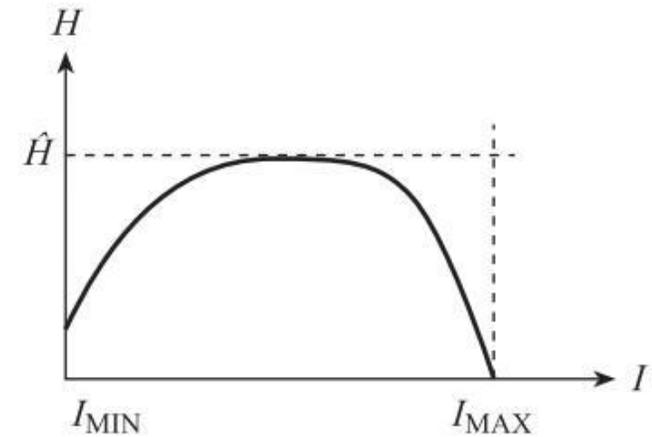
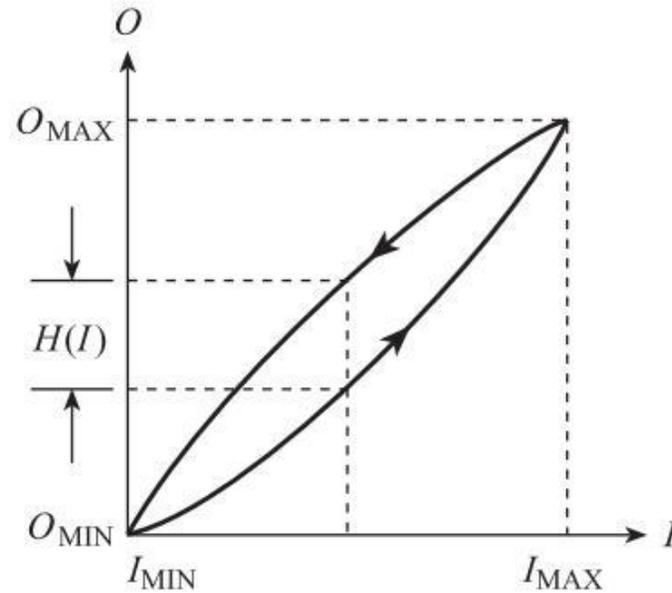
# Систематические характеристики. Гистерезис

Для заданного входного значения  $I$  выход элемента  $O$  может быть различным в зависимости от того, что  $I$  растёт или уменьшается. Гистерезис – это разница между этими различными выходами  $O$ . определяется отклонением реальной характеристики элемента от линейной аппроксимации.

$$= ( )_{\uparrow} - ( )_{\downarrow}$$

Часто рассчитывается максимальный гистерезис в процентах от полного выходного диапазона.

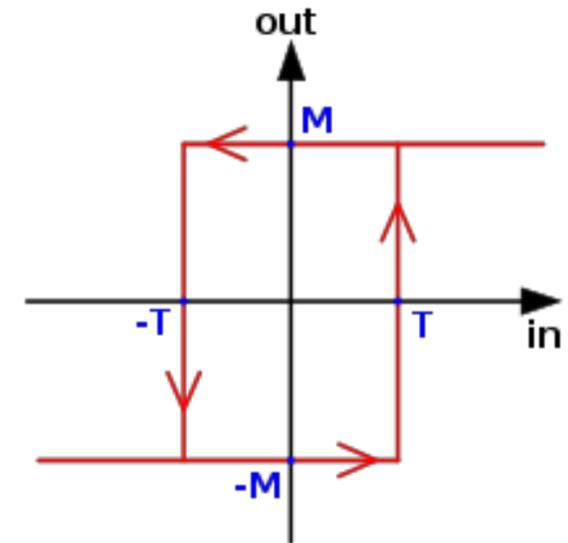
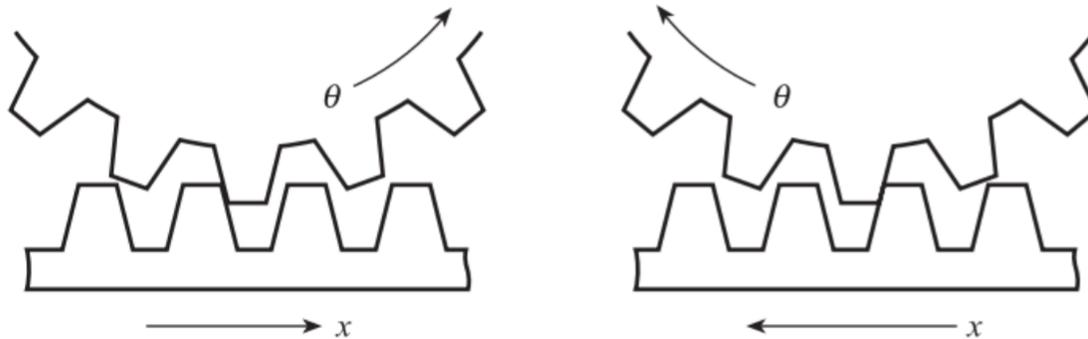
$$\frac{\times 100\%}{-}$$



# Систематические характеристики. Гистерезис

Примеры:

- Простая система передачи является элементом с гистерезисом из-за наличия люфтов.
- Триггер Шмитта также является элементом с гистерезисом.

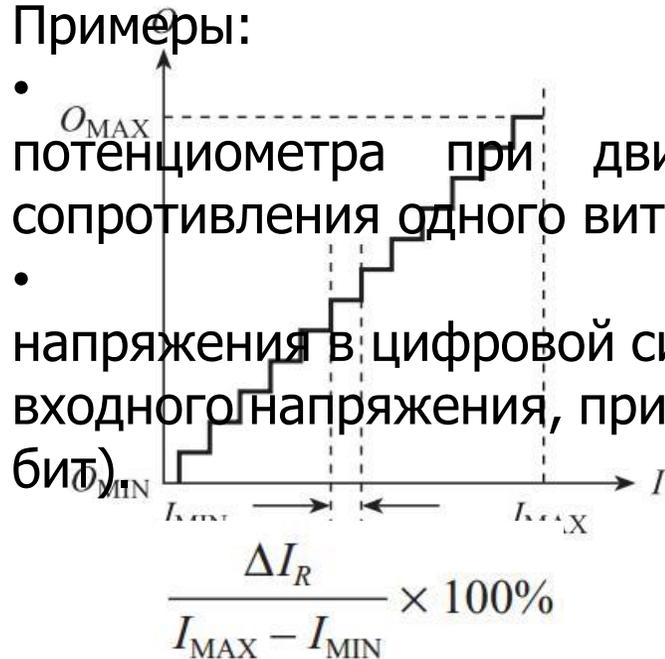


## Систематические характеристики. Разрешающая способность

Некоторые элементы характеризуются дискретным характером изменения выхода  $O$ . Разрешающая способность характеризуется максимальным изменением входной величины  $I$  без соответствующих изменений на выходе  $O$ .

Примеры:

- Изменение сопротивления проволочного потенциометра при движении ползунка происходит дискретно на величину сопротивления одного витка катушки.
- АЦП преобразует непрерывный входной сигнал напряжения в цифровой сигнал. При этом разрешающая способность равна изменению входного напряжения, приводящего к изменению сигнала на 1 бит (наименее значащий бит).



## Систематические характеристики. Старение и износ

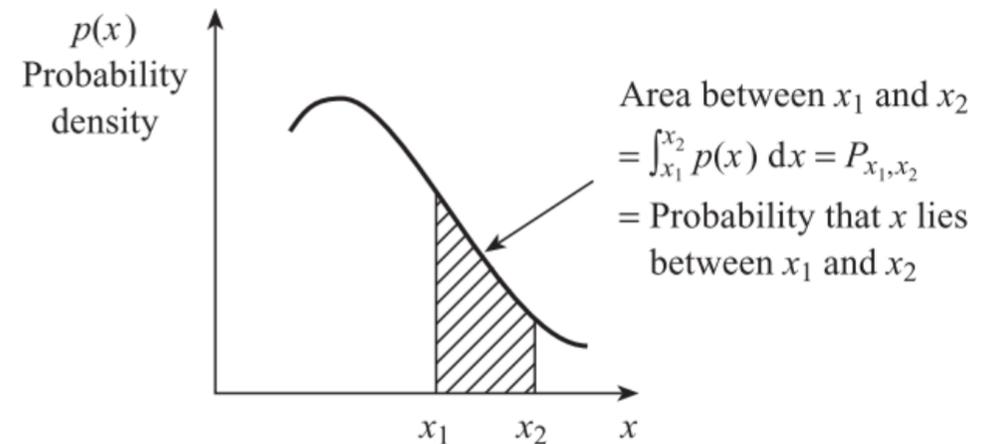
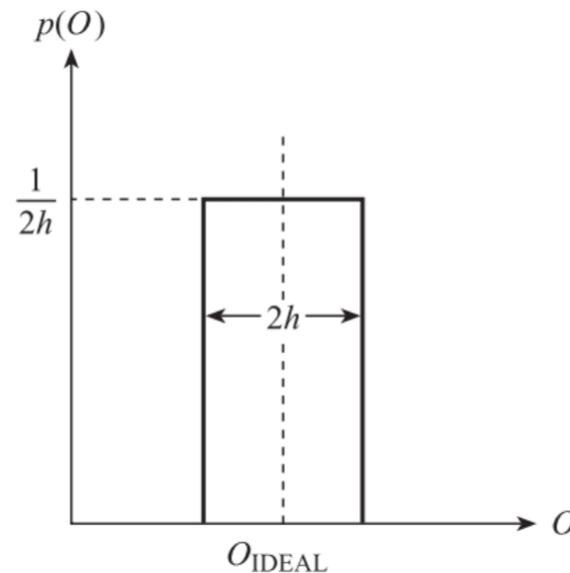
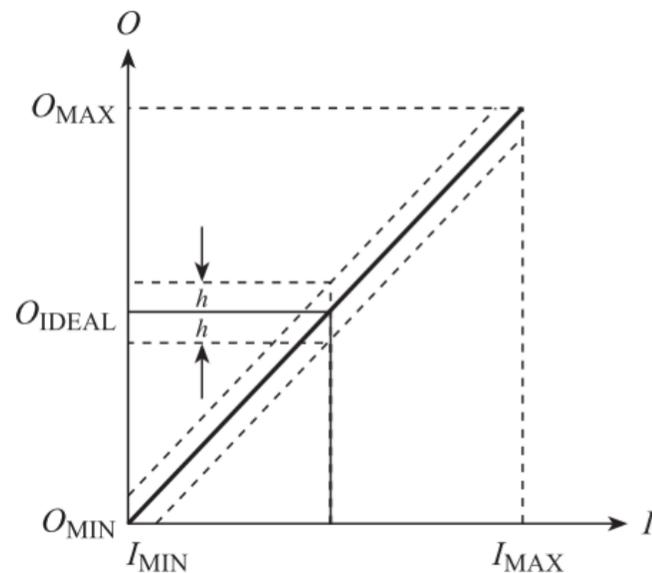
Старение и износ являются причиной медленного изменения характеристик элемента  $K$  и  $a$  в процессе эксплуатации.

Примеры:

- Изменение жёсткости пружины  $k(t)$  по мере её износа.
- Постоянные  $a_1, a_2$  и т.д. характеристики термопары в процессе измерения температуры в агрессивной среде меняются в результате изменения химического состава металлов, составляющих термопару.

## Систематические характеристики. Диапазон ошибки

Эффекты нелинейности, гистерезиса и разрешающей способности во многих современных датчиках и преобразователях настолько малы, что трудно и не имеет особого смысла определять каждый отдельный эффект. В этих случаях производитель использует характеристику – полоса ошибок (error band). В данном случае производитель утверждает, что для любого входного значения  $I$  выходное значение  $O$  будет находиться в пределах  $\pm h$  относительно переходной характеристики  $O_{IDEAL}$ .

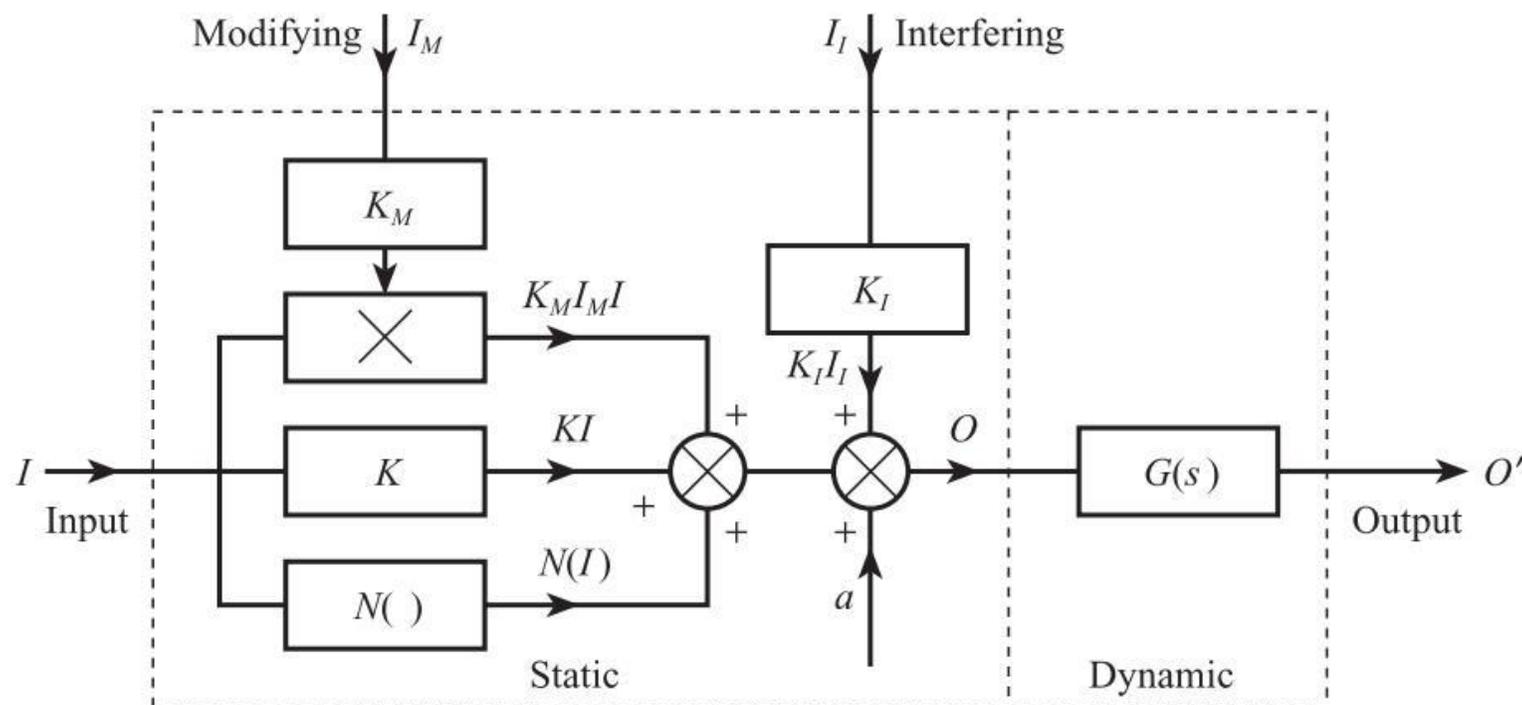


## Систематические характеристики. Обобщённая модель элемента

Переходная характеристика элемента, обладающего нелинейностью и подверженного внешним помехам имеет вид:

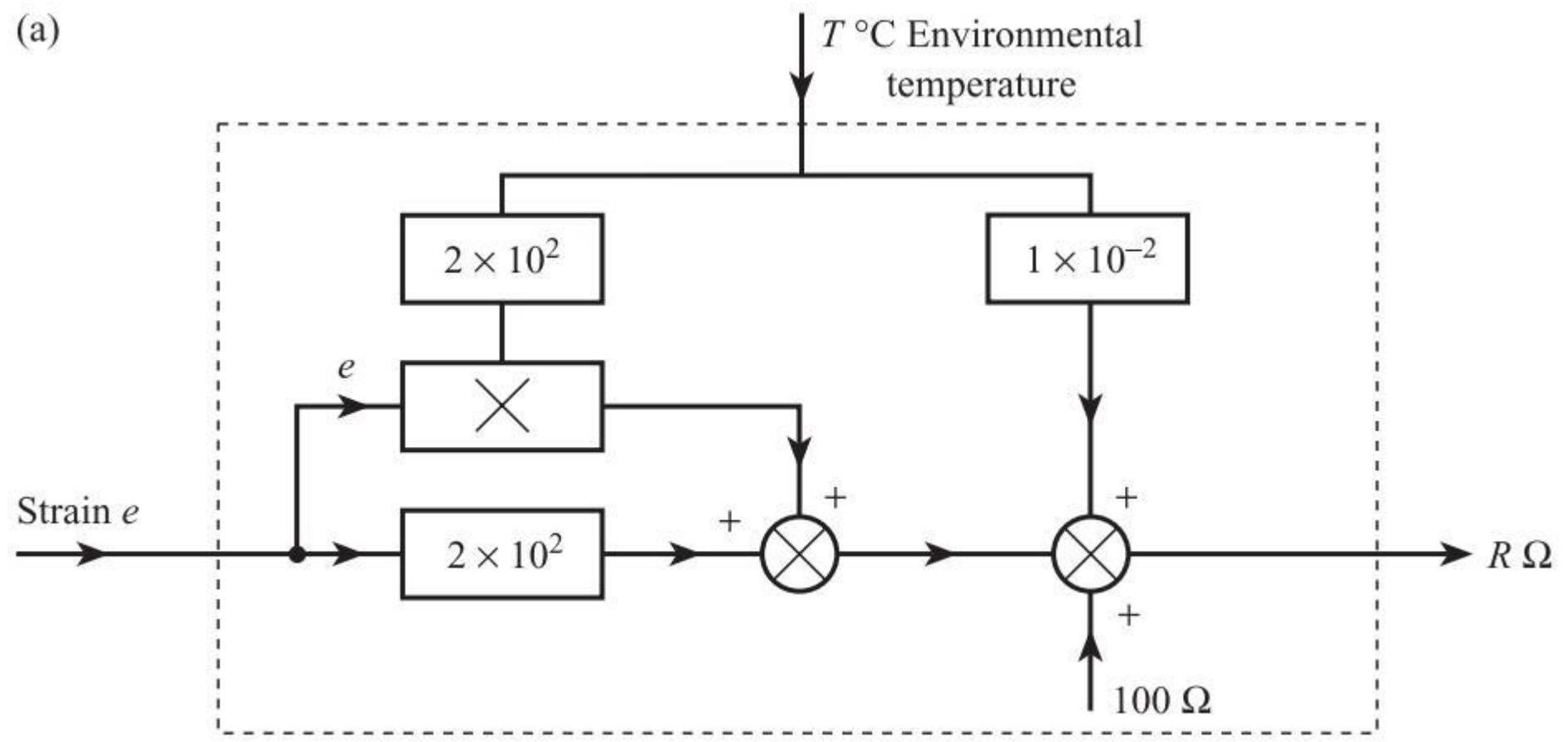
$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I$$

Модель элемента может быть описана с помощью блок-диаграммы (её статической части).



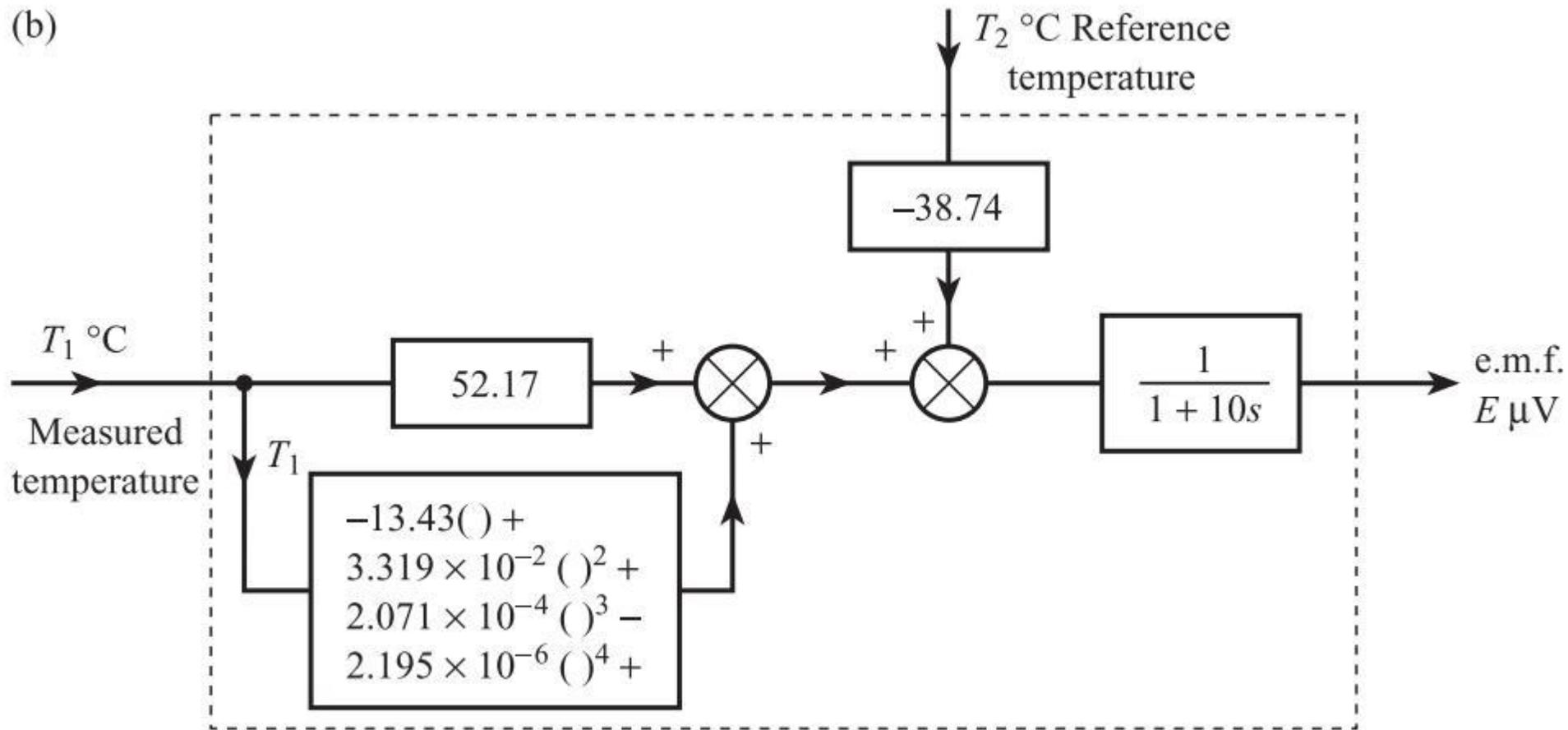
# Систематические характеристики. Обобщённая модель элемента

Пример: тензорезистор



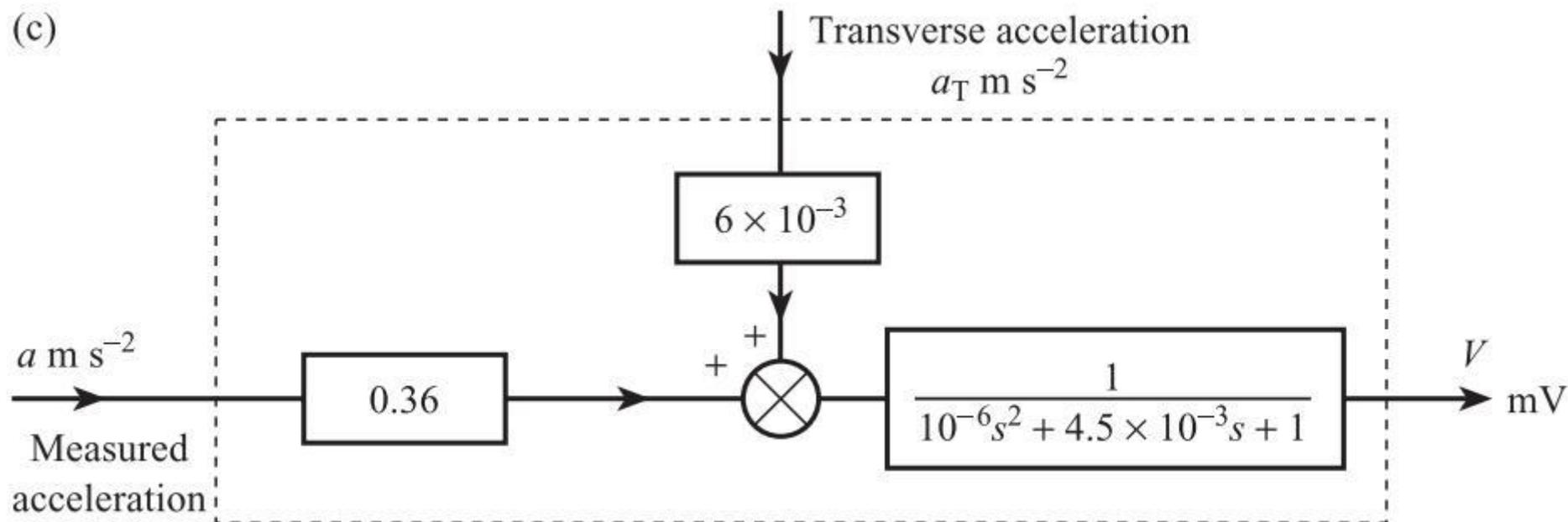
# Систематические характеристики. Обобщённая модель элемента

Пример: термопара медь-константан



# Систематические характеристики. Обобщённая модель элемента

Пример: акселерометр



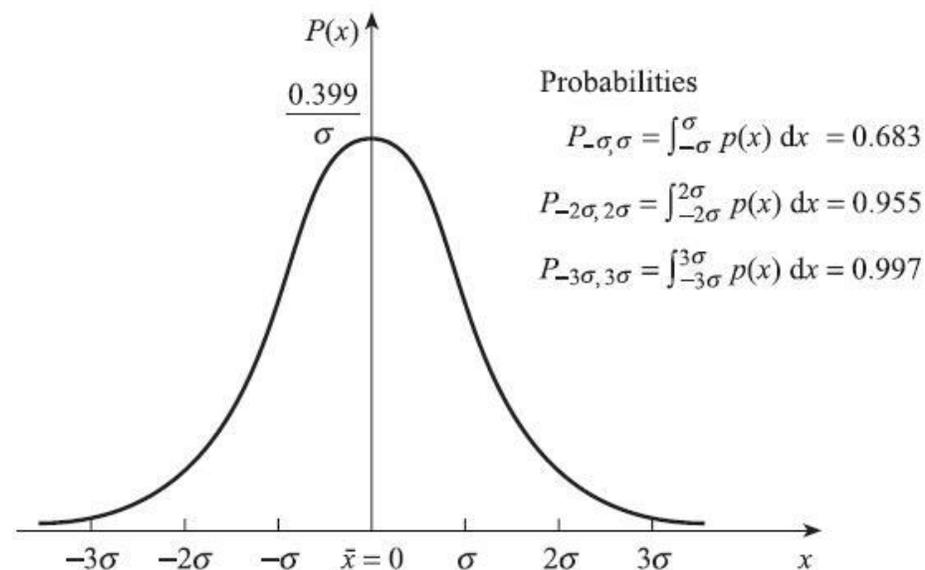
## Статистические характеристики – повторяемость

Повторяемость - это способность элемента неоднократно выдавать одно и то же выходное значение  $O$  для одного и того же входного воздействия  $I$ . Отсутствие повторяемости связано со случайными эффектами в элементе и окружающей среде. Наиболее распространенной причиной отсутствия повторяемости на выходе  $O$  являются случайные и  $I_I$ .

- Флуктуации температуры.

Наиболее вероятная функция плотности вероятности для  $I$ ,  $I_M$  и  $I_I$  - это нормальная или Гауссова функция распределения.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$$



- $\bar{x}$  среднее или ожидаемое значение (определяет центр распределения)
- $\sigma$  стандартное отклонение (определяет ширину распределения)

## Статистические характеристики – комбинирование погрешностей

Переходная характеристика элемента, обладающего нелинейностью и подверженного внешним помехам имеет вид:

$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I$$

Если  $O$  – небольшое отклонение выхода системы относительно среднего значения  $\bar{O}$  из-за отклонений (погрешностей)  $\Delta I$ ,  $\Delta I_M$ ,  $\Delta I_I$  относительно их средних значений  $\bar{I}$ ,  $\bar{I}_M$ ,  $\bar{I}_I$  тогда:

$$\Delta O = \left( \frac{\partial O}{\partial I} \right) \Delta I + \left( \frac{\partial O}{\partial I_M} \right) \Delta I_M + \left( \frac{\partial O}{\partial I_I} \right) \Delta I_I$$

Если входные погрешности имеют нормальное распределение с известными стандартными отклонениями  $\sigma$ , то можно определить стандартное отклонение выхода  $O$ :

$$\sigma_0 = \sqrt{\left( \frac{\partial O}{\partial I} \right)^2 \sigma_I^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial I_M} \right)^2 \sigma_{I_M}^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial I_I} \right)^2 \sigma_{I_I}^2}$$

## Статистические характеристики – комбинирование погрешностей

$$\sigma_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial O}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_M}\right)^2 \sigma_{I_M}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_I}\right)^2 \sigma_{I_I}^2} -$$

стандартное отклонение выхода элемента измерительной системы

- $\bar{O} = K\bar{I} + a + N(\bar{I}) + K_M\bar{I}_M\bar{I} + K_I\bar{I}_I$   
значение выхода элемента

соответствующее среднее (ожидаемое)

- $p(O) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(O - \bar{O})^2}{2\sigma_0^2}\right]$   
распределения выхода элемента

соответствующая функция вероятности

## Статистические характеристики – допуск

Эффект допуска наблюдается в любой партии «идентичных» элементов.

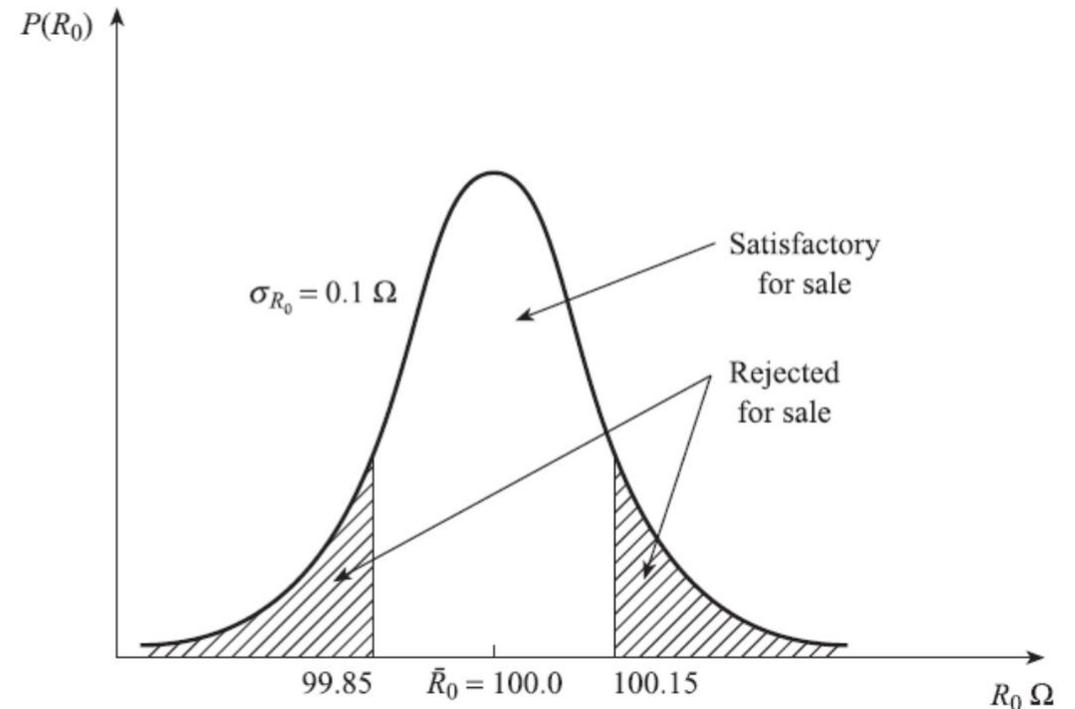
Пример:

При покупке партии терморезисторов с заявленным сопротивлением  $R_0$  100 Ом при температуре 0 °С измерения показывают отклонения как в одну так и в другую сторону от 99,8 до 100,2 Ом. Этот эффект обусловлен небольшими отклонениями в производстве элементов и хорошо соотносится с нормальным распределением:

$$p(R_0) = \frac{1}{\sigma_{R_0} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(R_0 - \bar{R}_0)^2}{2\sigma_{R_0}^2} \right]$$

$\bar{R}_0$  - среднее значение 100 Ом

- стандартное отклонение, например 0,1 Ом



## Статистические характеристики – общий случай

- в общем случае случайным изменениям подвержены как входы элемента системы  $I$ ,  $I_M$ ,  $I_I$ , так и параметры характеристики элемента  $K$  и  $a$  (наклон и смещение характеристики). Если принять что все рассмотренные отклонения являются нормально распределёнными, то функция распределения вероятности выхода элемента также имеет вид нормального распределения:

$$p(O) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(O - \bar{O})^2}{2\sigma_0^2} \right]$$

где:  $\bar{O} = \bar{K}\bar{I} + \bar{N}(\bar{I}) + \bar{a} + \bar{K}_M \bar{I}_M \bar{I} + \bar{K}_I \bar{I}_I$  - среднее значение выхода элемента

$$\sigma_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial O}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_M}\right)^2 \sigma_{I_M}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_I}\right)^2 \sigma_{I_I}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial K}\right)^2 \sigma_K^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \dots}$$

- стандартное отклонение выхода элемента

## Статические характеристики

Статические характеристики объединяют систематические и статистические характеристики элемента. Примеры статистических характеристик:

Модель термопары типа хромель-алюмель:

---

Model equation	$E_{T,T_a} = a_0 + a_1(T - T_a) + a_2(T^2 - T_a^2) \quad (50 \text{ to } 150 \text{ } ^\circ\text{C})$
Mean values	$\bar{a}_0 = 0.00, \bar{a}_1 = 4.017 \times 10^{-2}, \bar{a}_2 = 4.66 \times 10^{-6}, \bar{T}_a = 10$
Standard deviations	$\sigma_{a_0} = 6.93 \times 10^{-2}, \sigma_{a_1} = 0.0, \sigma_{a_2} = 0.0, \sigma_{T_a} = 6.7$
Partial derivatives	$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 1.0, \quad \frac{\partial E}{\partial T_a} = -4.026 \times 10^{-2}$
Mean value of output	$\bar{E}_{T,T_a} = \bar{a}_0 + \bar{a}_1(\bar{T} - \bar{T}_a) + \bar{a}_2(\bar{T}^2 - \bar{T}_a^2)$
Standard deviation of output	$\sigma_E^2 = \left(\frac{\partial E}{\partial a_0}\right)^2 \sigma_{a_0}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial T_a}\right)^2 \sigma_{T_a}^2$

---

## Статические характеристики

Статические характеристики объединяют систематические и статистические характеристики элемента. Примеры статистических характеристик:

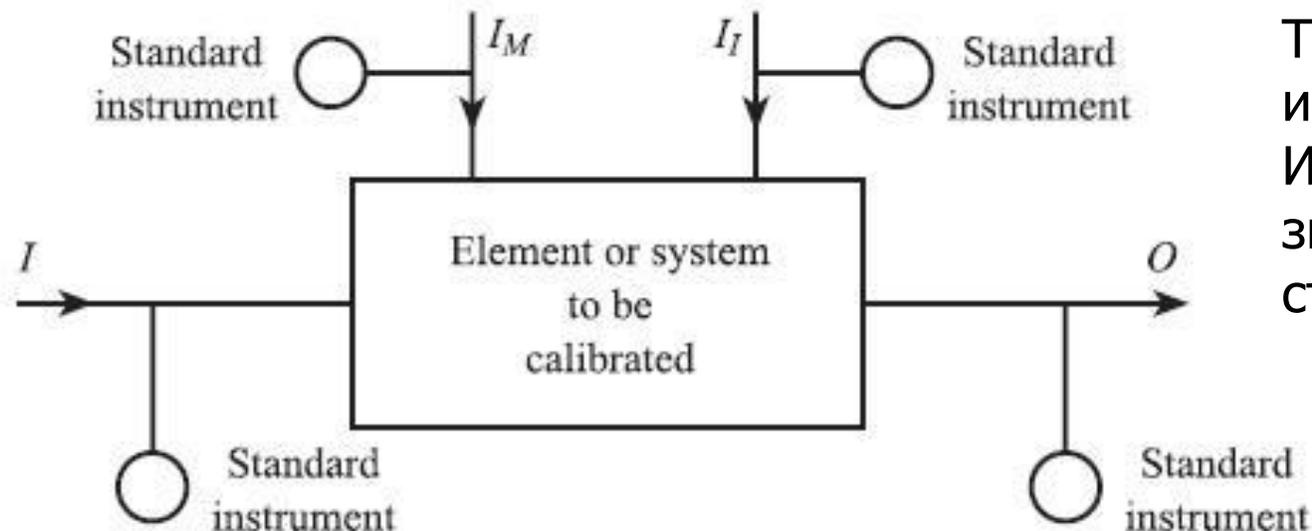
Модель преобразователя ЭДС термопары в токовый сигнал:

Model equation	$i = KE + K_M E \Delta T_a + K_I \Delta T_a + a$ 4 to 20 mA output for 2.02 to 6.13 mV input $\Delta T_a$ = deviation in ambient temperature from 20 °C
Mean values	$\bar{K} = 3.893, \bar{a} = 3.864, \Delta \bar{T}_a = -10$ $\bar{K}_M = 1.95 \times 10^{-4}, \bar{K}_I = 2.00 \times 10^{-3}$
Standard deviations	$\sigma_a = 0.14, \sigma_{\Delta T_a} = 6.7$ $\sigma_K = 0.0, \sigma_{K_M} = 0.0, \sigma_{K_I} = 0.0$
Partial derivatives	$\frac{\partial i}{\partial E} = 3.891, \quad \frac{\partial i}{\partial \Delta T_a} = 2.936 \times 10^{-3}, \quad \frac{\partial i}{\partial a} = 1.0$
Mean value of output	$\bar{i} = \bar{K}\bar{E} + \bar{K}_M \bar{E} \Delta \bar{T}_a + \bar{K}_I \Delta \bar{T}_a + \bar{a}$
Standard deviation of output	$\sigma_i^2 = \left( \frac{\partial i}{\partial E} \right)^2 \sigma_E^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial \Delta T_a} \right)^2 \sigma_{\Delta T}^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2$

## Определение статической характеристики – калибровка

Статическая характеристика элемента может быть определена экспериментально путём измерения соответствующих значений входа  $I$ , выхода  $O$ , внешних воздействий  $I_I$  и  $I_M$  при неизменном или медленно изменяющемся входе  $I$ .

Такой эксперимент называется калибровкой, а измерение переменных  $I$ ,  $O$ ,  $I_I$  и  $I_M$  должно быть точным, чтобы получить значимые результаты. Инструменты и методы, используемые для количественной оценки этих переменных, называются **стандартами**.



Точность измерения – это близость измерения к истинному значению. Истинное значение – измеренное значение, полученное с помощью стандарта предельной точности.

# Единицы измерения – международная система единиц СИ

## Базовые единицы СИ:

Время: секунда (с)	секунда - это длительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями основного состояния атома цезия-133
Длина: метр (м)	метр - это длина пути, пройденного светом в вакууме за интервал 1/299 792 458 секунды
Масса: килограмм (кг)	килограмм - это единица массы; он равен массе международного прототипа килограмма
Электрический ток: амперы (А)	Ампер - это тот постоянный ток, который, если поддерживать его в двух параллельных проводниках бесконечной длины с незначительным круглым поперечным сечением и размещать на расстоянии 1 метра в вакууме, будет создавать между этими проводниками силу, равную $2 \times 10^{-7}$ ньютон на метр длины
Температура: кельвин (К)	Кельвин, единица термодинамической температуры, является 1/273,16 долей от термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества: моль (моль)	Моль - это количество вещества в системе, которое содержит столько элементарных образований, сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода-12
Сила света: кандела (кд)	Кандела - это сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение с частотой $540 \times 10^{12}$ герц и имеющего интенсивность излучения в этом направлении 1/683 Вт на стерадиан

# Единицы измерения – производные от базовых единиц СИ

Величина	Единица		Обозначение		Выражение через основные единицы
	русское наименование	французское/английское наименование	русское	международное	
Плоский угол	радиан <sup>[К 3]</sup>	radian	рад	rad	$\text{м} \cdot \text{м}^{-1} = 1$
Телесный угол	стерадиан <sup>[К 3]</sup>	steradian	ср	sr	$\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2} = 1$
Температура Цельсия <sup>[К 4]</sup>	градус Цельсия	degré Celsius/degree Celsius	°C	°C	К
Частота	герц	hertz	Гц	Hz	$\text{с}^{-1}$
Сила	ньютон	newton	Н	N	$\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия	джоуль	joule	Дж	J	$\text{Н} \cdot \text{м} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность	ватт	watt	Вт	W	$\text{Дж}/\text{с} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Давление	паскаль	pascal	Па	Pa	$\text{Н}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Световой поток	люмен	lumen	лм	lm	кд ср
Освещённость	люкс	lux	лк	lx	$\text{лм}/\text{м}^2 = \text{кд} \cdot \text{ср}/\text{м}^2$
Электрический заряд	кулон	coulomb	Кл	C	А с
Разность потенциалов	вольт	volt	В	V	$\text{Дж}/\text{Кл} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Сопротивление	ом	ohm	Ом	$\Omega$	$\text{В}/\text{А} = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Емкость	фарад	farad	Ф	F	$\text{Кл}/\text{В} = \text{с}^4 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Магнитный поток	вебер	weber	Вб	Wb	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	tesla	Тл	T	$\text{Вб}/\text{м}^2 = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	генри	henry	Гн	H	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	сименс	siemens	См	S	$\text{Ом}^{-1} = \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Активность радиоактивного источника	беккерель	becquerel	Бк	Bq	$\text{с}^{-1}$
Поглощённая доза ионизирующего излучения	грей	gray	Гр	Gy	$\text{Дж}/\text{кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$
Керма ионизирующего излучения	грей	gray	Гр	Gy	$\text{Дж}/\text{кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$
Эквивалент дозы ионизирующего излучения	зиверт	sievert	Зв	Sv	$\text{Дж}/\text{кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$
Активность катализатора	катал	katal	кат	kat	моль/с

# Измерение температуры – международная практическая температурная шкала

- Международная температурная шкала (МТШ) включает всебя ряд хорошо воспроизводимых фиксированных точек (реперных точек): точки замерзания, кипения тройные точки чистых веществ при определенных условиях (фазовые переходы).
- Промежуточные точки МТШ воспроизводятся по интерполяционным формулам, устанавливающим связь между температурой термометрическими свойствами эталонных приборов, откалиброванных по фиксированным точкам. Пример: платиновый термометр сопротивления может быть откалиброван по трём точкам (например по воде, галлию и индию).

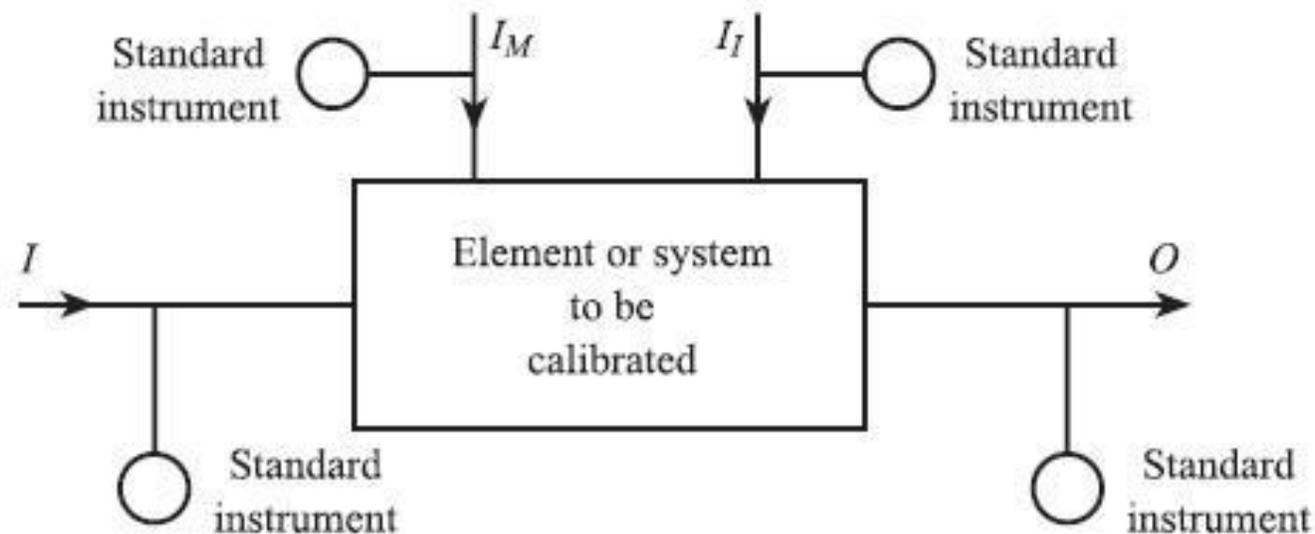
$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

Реперная точка		T <sub>90</sub> /K	t <sub>90</sub> /°C
e-H <sub>2</sub>	Тройная точка	13.8033	-259.3467
e-H <sub>2</sub>	Давление паров	≈17	≈ -256.15
e-H <sub>2</sub>	Давление паров	≈20.3	≈ -252.85
Ne	Тройная точка	24.5561	-248.5939
O <sub>2</sub>	Тройная точка	54.3584	-218.7916
Ar	Тройная точка	83.8058	-189.3442
Hg	Тройная точка	234.3156	-38.8344
H <sub>2</sub> O	Тройная точка	273.16	0.01
Ga	Точка плавления	302.9146	29.7646
In	Точка затвердевания	429.7485	156.5985
Sn	Точка затвердевания	505.078	231.928
Zn	Точка затвердевания	692.677	419.527
Al	Точка затвердевания	933.473	660.323
Ag	Точка затвердевания	1234.93	961.78
Au	Точка затвердевания	1337.33	1064.18
Cu	Точка затвердевания	1357.77	1084.62

## Экспериментальные измерения при калибровке и оценка результатов

Экспериментальные измерения при калибровке разбиваются на 3 основных этапа:

- Измерение выходного значения  $O$  при изменении входного значения  $I$  при «стандартных» внешних условиях, т.е. при отсутствии внешних помех ( $I_I = I_M = 0$ ).
- Измерение выходного значения  $O$  при неизменном входе  $I$  и при воздействии внешних помех  $I_M, I_I$ .
- Тест на повторяемость результата измерения – многократное измерение выходного значения  $O$  при неизменном входе  $I$  в «рабочих» условиях.



## Экспериментальные измерения при калибровке – 1 этап

Зависимость  $O$  от  $I$  при  $I_I = I_M = 0$

В идеале тест должен проводиться при «стандартных» условиях, т.е.  $I_I = I_M = 0$ . Если это невозможно, то все внешние помехи должны измеряться. Тест проводится в следующем порядке:

- Вход  $I$  должен медленно меняться от минимального значения диапазона  $I_{MIN}$  до максимального значения  $I_{MAX}$ . При этом входные  $I$  и соответствующие выходные значения  $O$  фиксируются через каждый интервал, равный 10% относительно входного диапазона (т.е. выборка составляет 11 пар значений).
- Следующие 11 пар значений вход-выход фиксируются при медленном уменьшении входного сигнала  $I$ .
- Весь процесс должен быть повторён для ещё двух «возрастаний» и «убываний» входного сигнала. В результате получатся 2 выборки:

$$\text{set } (I_i, O_i)_{I\uparrow} \quad \text{и} \quad \text{set } (I_j, O_j)_{I\downarrow} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (n = 33)$$

- По полученной выборке рассчитывается полиномиальное уравнение регрессии:

$$O(I) = \sum_{q=0}^{q=m} a_q I^q$$

## Экспериментальные измерения при калибровке – 1 этап

Зависимость  $O$  от  $I$  при  $I_I = I_M = 0$

- При расчёте уравнения регрессии используется метод наименьших квадратов:

$$O(I) = \sum_{q=0}^{q=m} a_q I^q \quad - \text{искомое уравнение регрессии}$$

- $d_i = O(I_i) - O_i$       разница между значением уравнения регрессии  $O(I_i)$  и измеренным значением  $O_i$

$$\sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 \quad \text{минимально} - \text{условие наименьших квадратов}$$

Примечание:

Датчики температуры часто калибруются с использованием соответствующих реперных точек, а не стандартного прибора. Например, термopара может быть откалибрована в диапазоне от 0 до 500 °C путём измерения ЭДС для 3 реперных точек (лёд, пар и цинк). Если при этом зависимость ЭДС от температуры рассматривать как кубическую, то коэффициенты уравнения регрессии  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  можно получить решив систему линейных уравнений.

$$E = a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad - \text{кубическое уравнение регрессии}$$

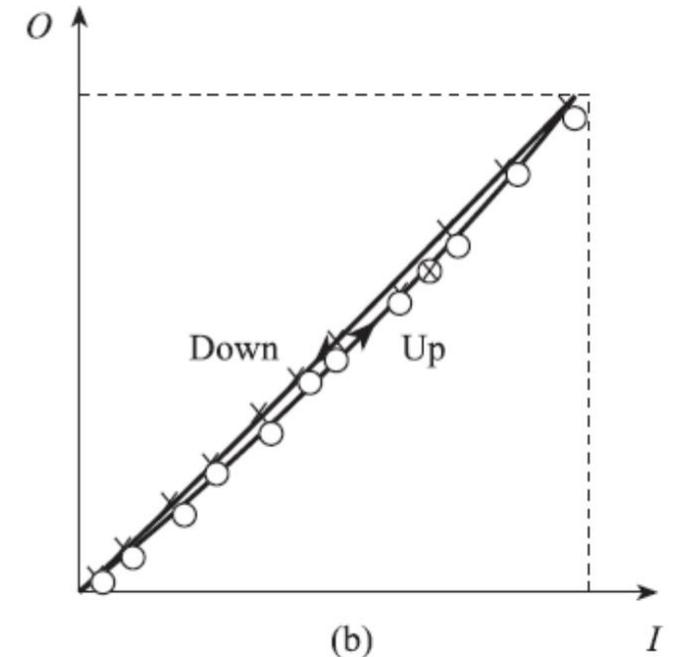
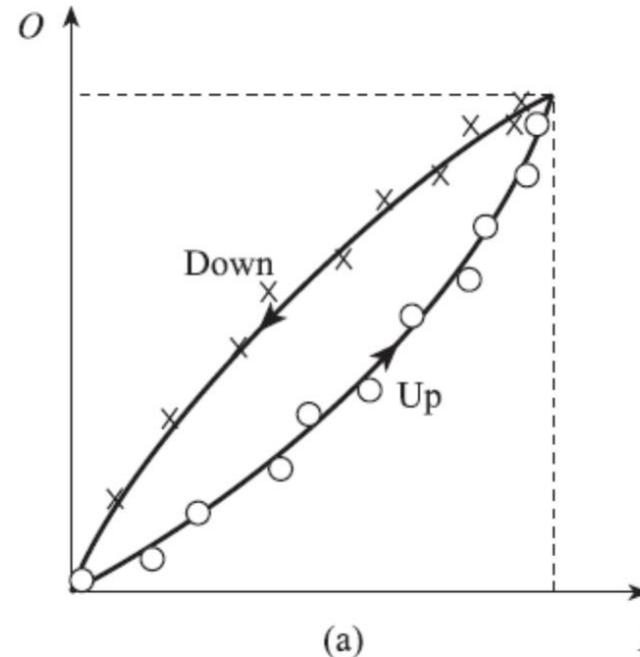
# Экспериментальные измерения при калибровке – 1 этап

- Проверяется наличие гистерезиса. Для каждой из выборок: «возрастающей» и «убывающей» рассчитывается своё уравнение регрессии:

$$O(I)_{I\uparrow} = \sum_{q=0}^{q=m} a_q^{\uparrow} I^q$$

$$O(I)_{I\downarrow} = \sum_{q=0}^{q=m} a_q^{\downarrow} I^q$$

$$H(I) = O(I)_{I\downarrow} - O(I)_{I\uparrow}$$



Значимый гистерезис (a) и не значимый гистерезис b)

- Определяется уравнение аппроксимирующей прямой линии передаточной характеристики. Рассчитывается нелинейность:

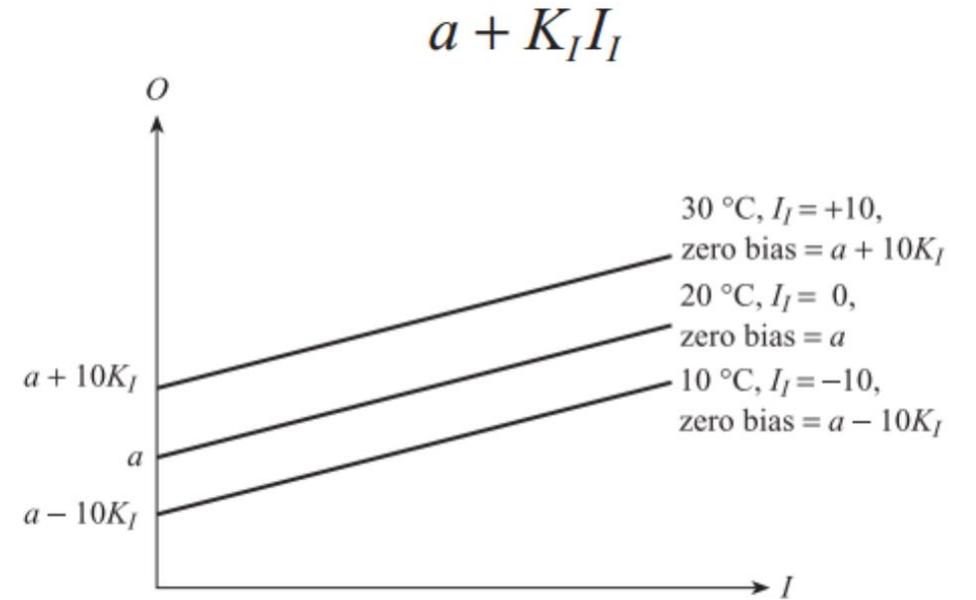
$$N(I) = O(I) - (KI + a)$$

## Экспериментальные измерения при калибровке – 2 этап

Зависимость  $O$  от  $I_I, I_M$  при  $I = \text{const}$

Определяются внешние помехи приводящие к смещению передаточной характеристики (т.е. изменению коэффициента  $a$  аппроксимирующей прямой). Входное значение  $I$  держится постоянным на уровне  $I_{MIN}$ . Одна из внешних помех меняется на заданную величину, остальные внешние условия сохраняются «стандартными». Если в результате изменения внешней помехи, произошло изменение выхода на величину  $O$ , то данная помеха вызывает смещение характеристики и можно рассчитать соответствующий коэффициент  $K_I$ :

$$K_I = \Delta O / \Delta I_I$$

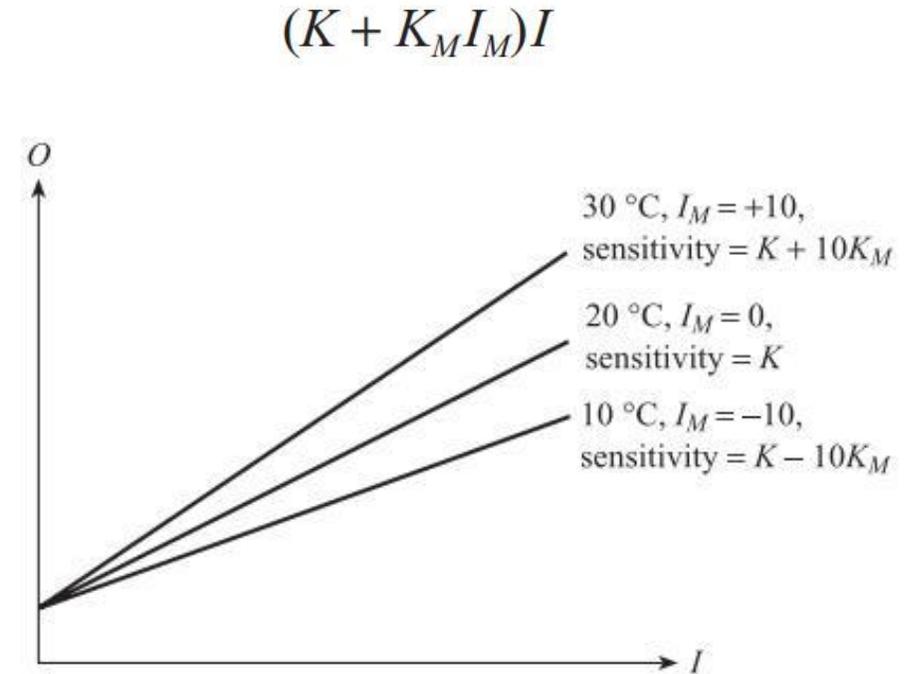


## Экспериментальные измерения при калибровке – 2 этап

Зависимость  $O$  от  $I_I, I_M$  при  $I = \text{const}$

Определяются внешние помехи приводящие к изменению наклона передаточной характеристики (т.е. изменению коэффициента  $K$  аппроксимирующей прямой). Входное значение  $I$  держится постоянным на уровне середины входного диапазона  $(I_{MIN} + I_{MAX})/2$ . Одна из внешних помех меняется на заданную величину, остальные внешние условия сохраняются «стандартными». Если в результате изменения внешней помехи, произошло изменение выхода на величину  $O$  и данная помеха не приводила к смещению то данная помеха вызывает изменение наклона характеристики и можно рассчитать соответствующий коэффициент  $K_M$ :

$$K_M = \frac{1}{I} \frac{\Delta O}{\Delta I_M} = \frac{2}{I_{MIN} + I_{MAX}} \frac{\Delta O}{\Delta I_M}$$



## Экспериментальные измерения при калибровке – 2 этап

Зависимость  $O$  от  $I_I, I_M$  при  $I = \text{const}$

Если в результате изменения внешней помехи, произошло изменение выхода на величину  $O$  и данная помеха приводила к смещению, то необходимо проверить приводит ли данная помеха также и к изменению наклона характеристики:

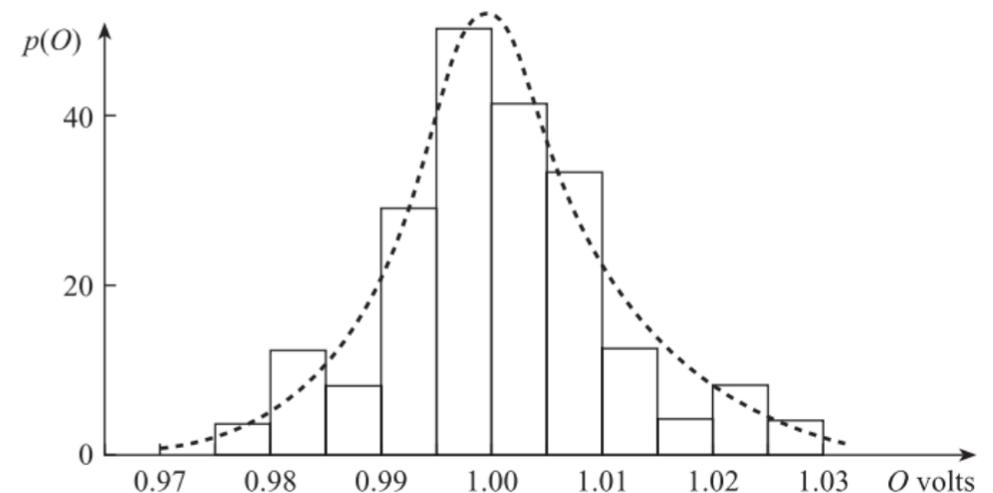
$$\Delta O = K_I \Delta I_{I,M} + K_M \Delta I_{I,M} \frac{I_{\text{MIN}} + I_{\text{MAX}}}{2} \longrightarrow K_M = \frac{2}{I_{\text{MIN}} + I_{\text{MAX}}} \left[ \frac{\Delta O}{\Delta I_{I,M}} - K_I \right]$$

## Экспериментальные измерения при калибровке – 3 этап

### Тест на повторяемость

Этот тест должен проводиться в нормальной рабочей среде элемента, где воздействия окружающей среды  $I_M$  и  $I_I$  подвержены случайным изменениям. Входной сигнал  $I$  должен быть постоянным и равным значению из середины входного диапазона, а выходной сигнал  $O$  должен измеряться в течение длительного периода, обеспечивая выборку  $O_k$ , где  $k = 1, 2, .. N$ . По полученной выборке строится гистограмма. Для данной выборки рассчитываются среднее значение и стандартное отклонение:

$$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} O_k \quad \sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} (O_k - \bar{O})^2}$$



# Точность измерительной системы в установившемся состоянии

Ошибка измерительной системы:

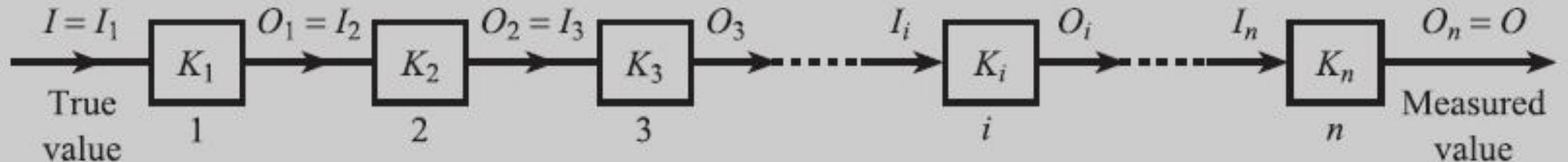
$$E = \text{измеренное значение} - \text{истинное значение} = \text{выход системы} - \text{вход системы}$$

Для измерительной системы из  $n$  идеальных линейных элементов (с нулевым смещением):

$$O_i = K_i \cdot I_i \quad \text{для } i\text{-го элемента, т.е.:$$

$O_2 = K_2 \cdot I_2 = K_2 \cdot K_1 \cdot I$ ;  $O_3 = K_3 \cdot I_3 = K_3 \cdot K_2 \cdot K_1 \cdot I$  и т.д., а для всей системы:

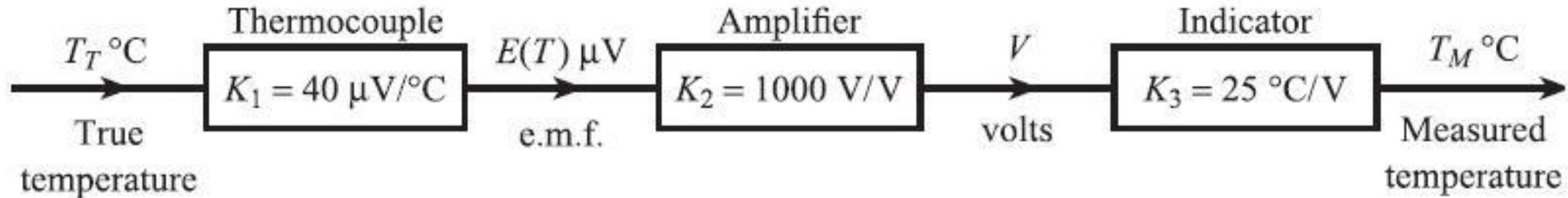
$$O_n = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots K_i \dots K_n \cdot I$$



$$E = (K_1 K_2 K_3 \dots K_n - 1) I \quad \rightarrow \quad E = 0 \text{ при } K_1 K_2 K_3 \dots K_n = 1$$

# Точность измерительной системы в установившемся состоянии

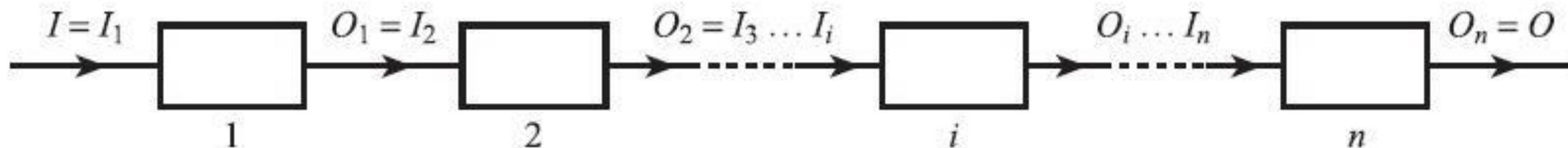
Пример «точной» измерительной системы:



Причины возникновения ошибки измерения:

- Нелинейность характеристик
- Влияние внешних воздействий
- Износ и старение

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов



Для каждого неидеального элемента:

$$p(O) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(O - \bar{O})^2}{2\sigma_0^2} \right]$$

$$\bar{O} = \bar{K}\bar{I} + \bar{N}(\bar{I}) + \bar{a} + \bar{K}_M \bar{I}_M \bar{I} + \bar{K}_I \bar{I}_I$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\left( \frac{\partial O}{\partial I} \right)^2 \sigma_I^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial I_M} \right)^2 \sigma_{I_M}^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial I_I} \right)^2 \sigma_{I_I}^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial K} \right)^2 \sigma_K^2 + \left( \frac{\partial O}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 + \dots}$$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов

Средние значения выходов элементов:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I} \\ \bar{I}_2 &= \bar{O}_1 = \bar{K}_1 \bar{I}_1 + \bar{N}_1(\bar{I}_1) + \bar{a}_1 + \bar{K}_{M_1} \bar{I}_{M_1} \bar{I}_1 + \bar{K}_{I_1} \bar{I}_{I_1} \\ \bar{I}_3 &= \bar{O}_2 = \bar{K}_2 \bar{I}_2 + \bar{N}_2(\bar{I}_2) + \bar{a}_2 + \bar{K}_{M_2} \bar{I}_{M_2} \bar{I}_2 + \bar{K}_{I_2} \bar{I}_{I_2} \\ &\vdots \\ \bar{I}_{i+1} &= \bar{O}_i = \bar{K}_i \bar{I}_i + \bar{N}_i(\bar{I}_i) + \bar{a}_i + \bar{K}_{M_i} \bar{I}_{M_i} \bar{I}_i + \bar{K}_{I_i} \bar{I}_{I_i} \\ &\vdots \\ \bar{O} &= \bar{O}_n = \bar{K}_n \bar{I}_n + \bar{N}_n(\bar{I}_n) + \bar{a}_n + \bar{K}_{M_n} \bar{I}_{M_n} \bar{I}_n + \bar{K}_{I_n} \bar{I}_{I_n} \end{aligned}$$

$$\bar{E} = \bar{O} - \bar{I}$$

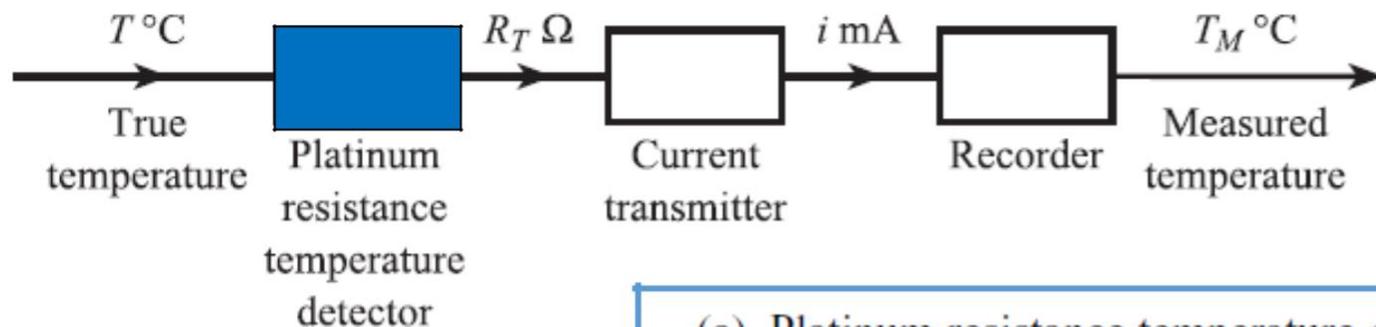
Стандартные отклонения выходов элементов:

$$\begin{aligned} \sigma_{I_1}^2 &= 0 \\ \sigma_{I_2}^2 &= \sigma_{O_1}^2 = \left(\frac{\partial O_1}{\partial I_1}\right)^2 \sigma_{I_1}^2 + \left(\frac{\partial O_1}{\partial I_{M_1}}\right)^2 \sigma_{I_{M_1}}^2 + \left(\frac{\partial O_1}{\partial I_{I_1}}\right)^2 \sigma_{I_{I_1}}^2 + \left(\frac{\partial O_1}{\partial K_1}\right)^2 \sigma_{K_1}^2 + \dots \\ \sigma_{I_3}^2 &= \sigma_{O_2}^2 = \left(\frac{\partial O_2}{\partial I_2}\right)^2 \sigma_{I_2}^2 + \left(\frac{\partial O_2}{\partial I_{M_2}}\right)^2 \sigma_{I_{M_2}}^2 + \left(\frac{\partial O_2}{\partial I_{I_2}}\right)^2 \sigma_{I_{I_2}}^2 + \left(\frac{\partial O_2}{\partial K_2}\right)^2 \sigma_{K_2}^2 + \dots \\ &\vdots \\ \sigma_{I_{i+1}}^2 &= \sigma_{O_i}^2 = \left(\frac{\partial O_i}{\partial I_i}\right)^2 \sigma_{I_i}^2 + \left(\frac{\partial O_i}{\partial I_{M_i}}\right)^2 \sigma_{I_{M_i}}^2 + \left(\frac{\partial O_i}{\partial I_{I_i}}\right)^2 \sigma_{I_{I_i}}^2 + \left(\frac{\partial O_i}{\partial K_i}\right)^2 \sigma_{K_i}^2 + \dots \\ \sigma_O^2 &= \sigma_{O_n}^2 = \left(\frac{\partial O_n}{\partial I_n}\right)^2 \sigma_{I_n}^2 + \left(\frac{\partial O_n}{\partial I_{M_n}}\right)^2 \sigma_{I_{M_n}}^2 + \left(\frac{\partial O_n}{\partial I_{I_n}}\right)^2 \sigma_{I_{I_n}}^2 + \left(\frac{\partial O_n}{\partial K_n}\right)^2 \sigma_{K_n}^2 + \dots \end{aligned}$$

$$\sigma_E = \sigma_O$$

$$p(E) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_E^2} (E - \bar{E})^2\right] \quad \text{ошибка системы}$$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов (пример расчёта)



Модель сенсора

(a) Platinum resistance temperature detector

Model equation  $R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$

Individual mean values  $\bar{R}_0 = 100.0 \Omega, \bar{\alpha} = 3.909 \times 10^{-3}, \bar{\beta} = -5.897 \times 10^{-7}$   
(between 100 and 130 °C)

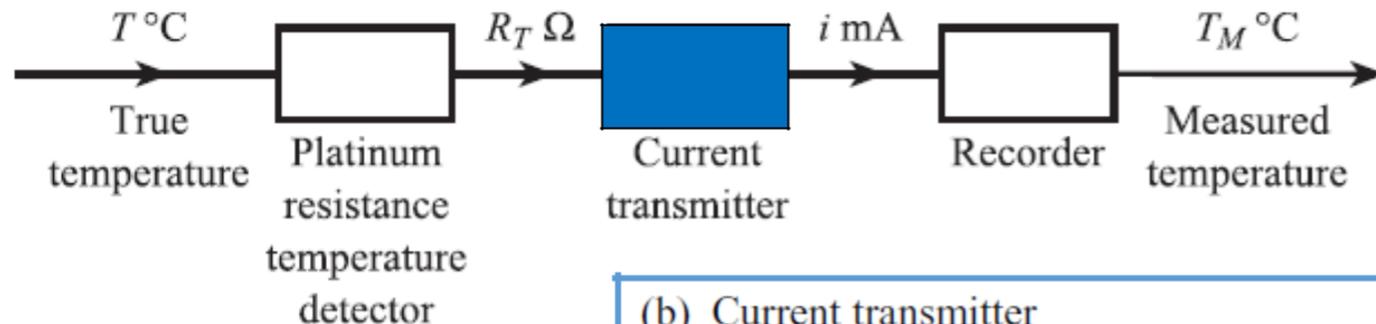
Individual standard deviations  $\sigma_{R_0} = 4.33 \times 10^{-2}, \sigma_{\alpha} = 0.0, \sigma_{\beta} = 0.0$

Partial derivatives  $\frac{\partial R_T}{\partial R_0} = 1.449$  at  $T = 117 \text{ °C}$

Overall mean value  $\bar{R}_T = \bar{R}_0(1 + \bar{\alpha}\bar{T} + \bar{\beta}\bar{T}^2)$

Overall standard deviation  $\sigma_{R_T}^2 = \left(\frac{\partial R_T}{\partial R_0}\right)^2 \sigma_{R_0}^2$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов (пример расчёта)



Модель преобразователя

(b) Current transmitter

Model equation

4 to 20 mA output for 138.5 to 149.8 Ω input (100 to 130 °C)  
 $\Delta T_a$  = deviation of ambient temperature from 20 °C  
 $i = KR_T + K_M R_T \Delta T_a + K_I \Delta T_a + a$

Individual mean values

$\bar{K} = 1.4134$ ,  $\bar{K}_M = 1.4134 \times 10^{-4}$ ,  $\bar{K}_I = -1.637 \times 10^{-2}$   
 $\bar{a} = -191.76$ ,  $\Delta \bar{T}_a = -10$

Individual standard deviations

$\sigma_K = 0.0$ ,  $\sigma_{K_M} = 0.0$ ,  $\sigma_{K_I} = 0.0$   
 $\sigma_a = 0.24$ ,  $\sigma_{\Delta T_a} = 6.7$

Partial derivatives

$\frac{\partial i}{\partial R_T} = 1.413$ ,  $\frac{\partial i}{\partial \Delta T_a} = 4.11 \times 10^{-3}$ ,  $\frac{\partial i}{\partial a} = 1.00$

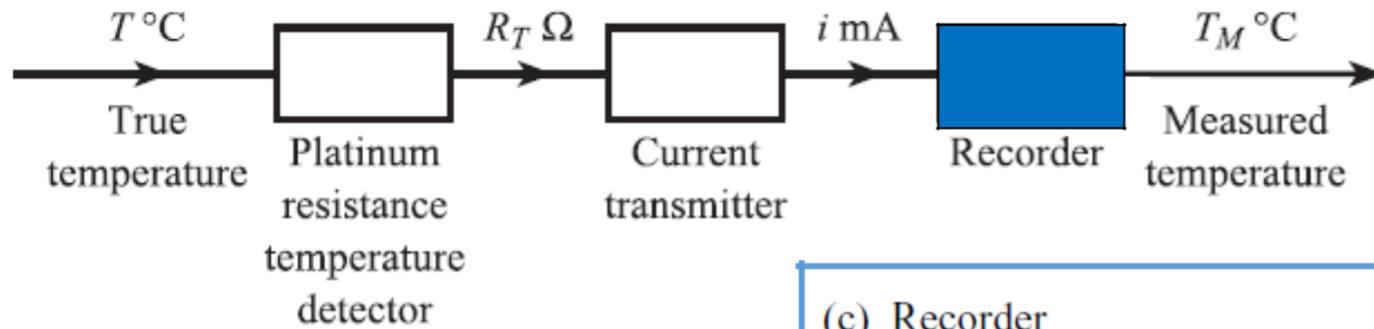
Overall mean value

$\bar{i} = \bar{K} \bar{R}_T + \bar{K}_M \bar{R}_T \Delta \bar{T}_a + \bar{K}_I \Delta \bar{T}_a + \bar{a}$

Overall standard deviation

$\sigma_i^2 = \left( \frac{\partial i}{\partial R_T} \right)^2 \sigma_{R_T}^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial \Delta T_a} \right)^2 \sigma_{\Delta T_a}^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов (пример расчёта)



Модель индикатора

(c) Recorder

Model equation

$$T_M = Ki + a$$

Individual mean values

$$\bar{K} = 1.875, \bar{a} = 92.50$$

(100 to 130 °C record for 4 to 20 mA input)

Individual standard deviations

$$\sigma_k = 0.0, \sigma_a = 0.10$$

Partial derivatives

$$\frac{\partial T_M}{\partial i} = 1.875, \frac{\partial T_M}{\partial a} = 1.00$$

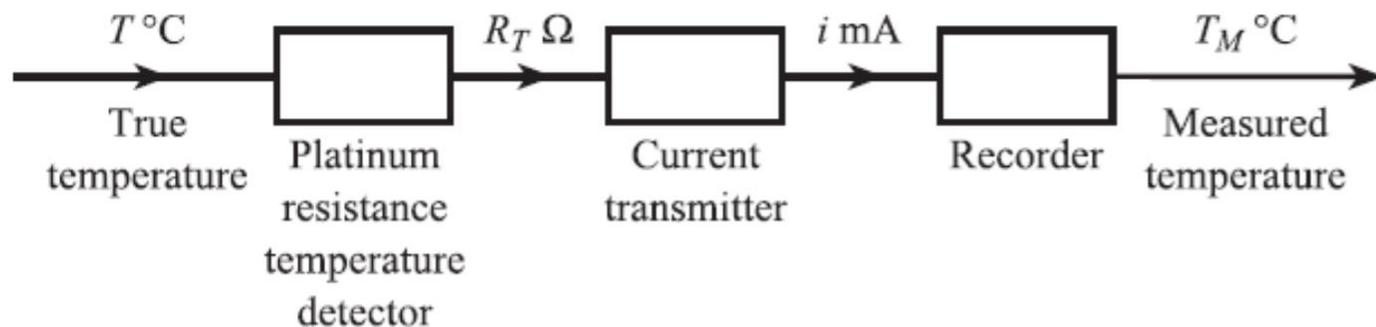
Overall mean value

$$\bar{T}_M = \bar{K}\bar{i} + \bar{a}$$

Overall standard deviation

$$\sigma_{T_M}^2 = \left(\frac{\partial T_M}{\partial i}\right)^2 \sigma_i^2 + \left(\frac{\partial T_M}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2$$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения, состоящей из неидеальных элементов (пример расчёта)



## Ошибка системы

Mean  $\bar{E}$

$$\bar{T} = 117 \text{ °C} \quad \bar{R}_T = 144.93 \text{ Ω}$$

$$\bar{i} = 13.04 \text{ mA} \quad \bar{T}_M = 116.95 \text{ °C}$$

$$\bar{E} = \bar{T}_M - \bar{T} = -0.005 \text{ °C}$$

Standard deviation  $\sigma_E$

$$\sigma_T^2 = 0$$

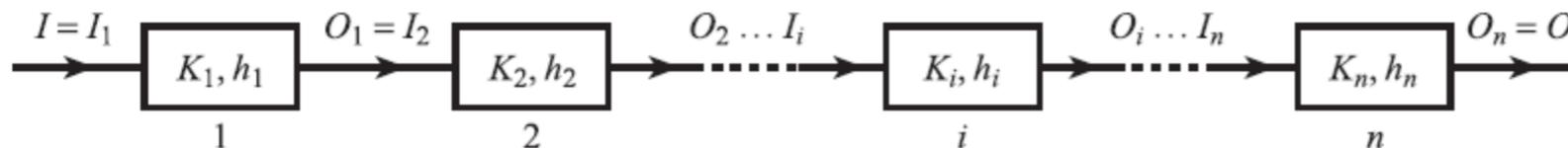
$$\sigma_{R_T}^2 = \left( \frac{\partial R_T}{\partial R_0} \right)^2 \sigma_{R_0}^2 = 39.4 \times 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \left( \frac{\partial i}{\partial R_T} \right)^2 \sigma_{R_T}^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial \Delta T_a} \right)^2 \sigma_{\Delta T_a}^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 \\ &= 78.7 \times 10^{-4} + 8.18 \times 10^{-4} + 5.76 \times 10^{-2} \\ &= 6.62 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\sigma_{T_M}^2 = \left( \frac{\partial T_M}{\partial i} \right)^2 \sigma_i^2 + \left( \frac{\partial T_M}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 = 24.3 \times 10^{-2}$$

$$\sigma_E = \sigma_{T_M} = 0.49 \text{ °C}$$

# Плотность распределения вероятности ошибки системы измерения. Диапазон ошибки.



$$\bar{O}_i = K_i \bar{I}_i$$

$$\bar{O} = K_1 K_2 \dots K_i \dots K_n \bar{I}$$

$$\bar{E} = \bar{O} - \bar{I} [= 0, \text{ if } K_1 K_2 \dots K_n = 1]$$

$$\sigma_{I_1}^2 = 0$$

$$\sigma_{I_2}^2 = \sigma_{O_1}^2 = \frac{h_1^2}{3}$$

$$\sigma_{I_3}^2 = \sigma_{O_2}^2 = K_2^2 \sigma_{I_2}^2 + \frac{h_2^2}{3}$$

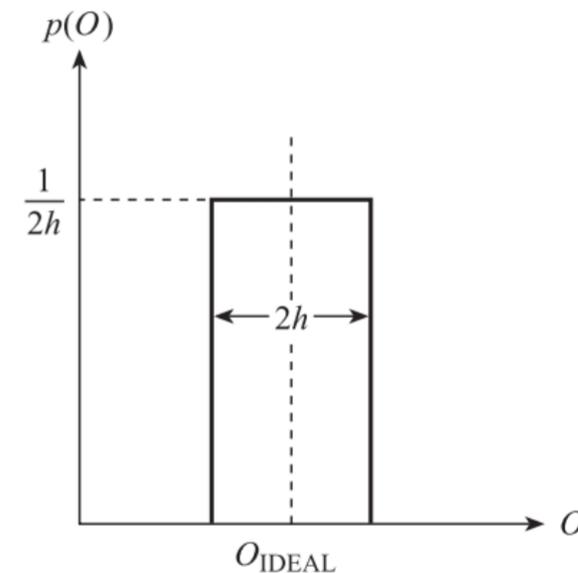
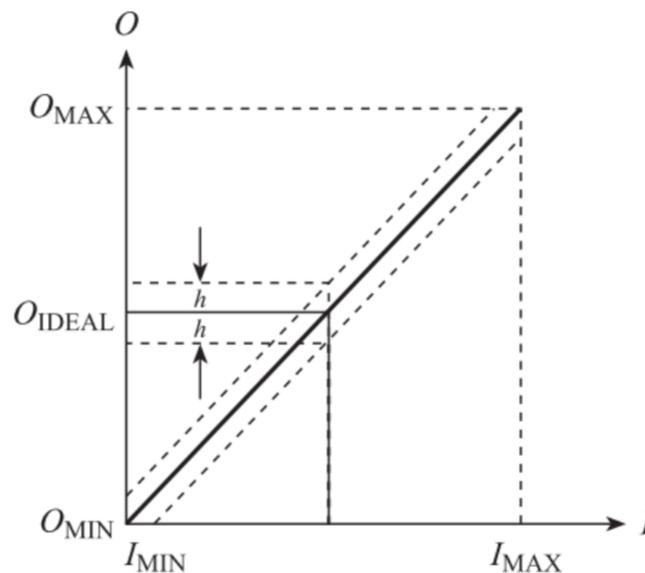
⋮ ⋮

$$\sigma_{I_{i+1}}^2 = \sigma_{O_i}^2 = K_i^2 \sigma_{I_i}^2 + \frac{h_i^2}{3}$$

⋮ ⋮

$$\sigma_O^2 = \sigma_{O_n}^2 = K_n^2 \sigma_{I_n}^2 + \frac{h_n^2}{3}$$

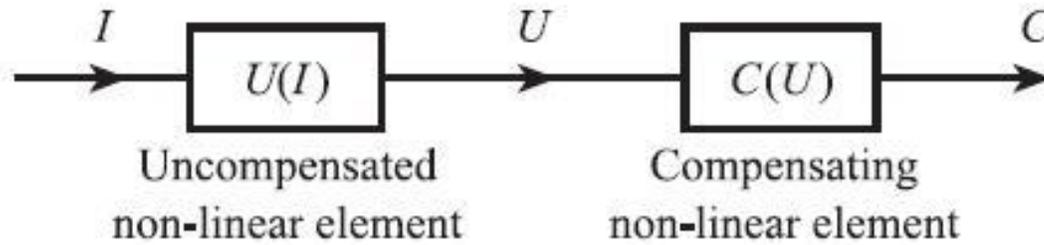
$$\sigma_E = \sigma_O$$



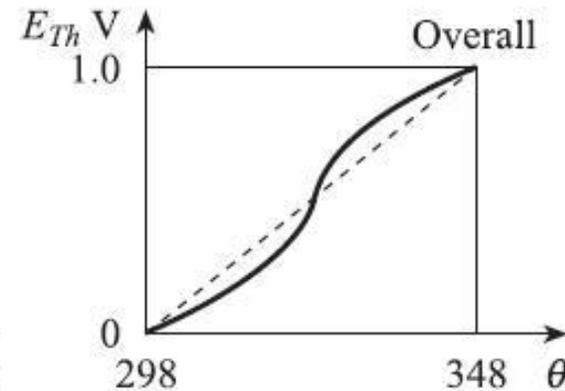
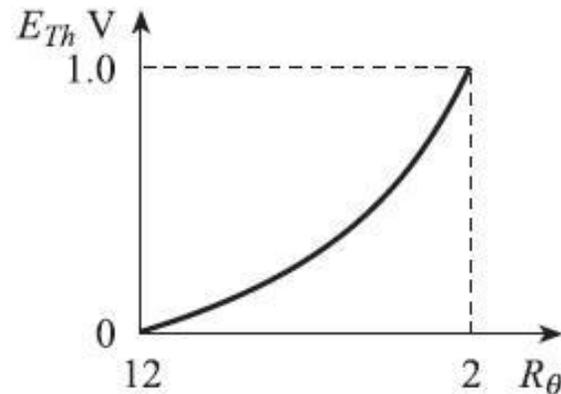
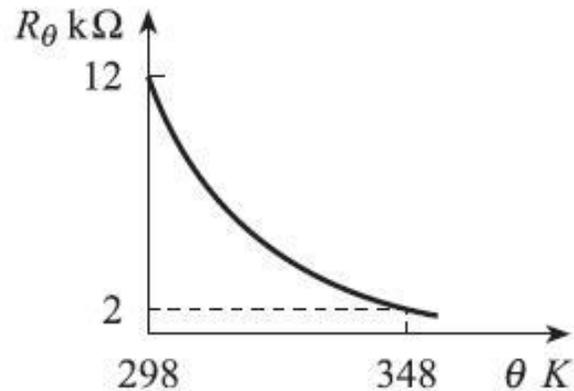
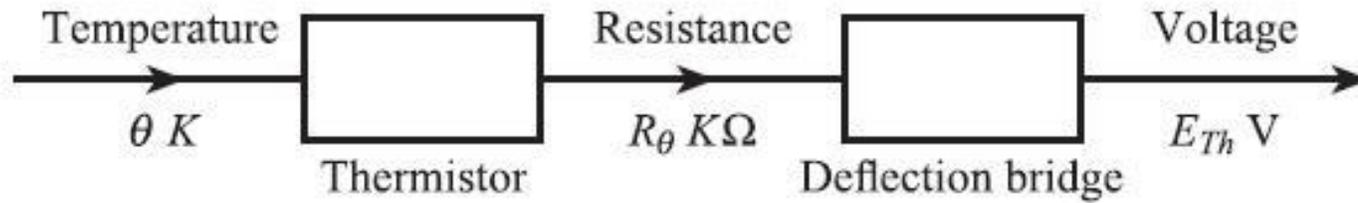
$$h_i / \sqrt{3}$$

- стандартное отклонение прямоугольного распределения шириной 2h

# Способы уменьшения ошибки. Компенсация нелинейности.



- способ компенсации нелинейности заключается в добавлении нелинейного элемента  $C(U)$ , компенсирующего нелинейность элемента  $U(I)$



# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения.

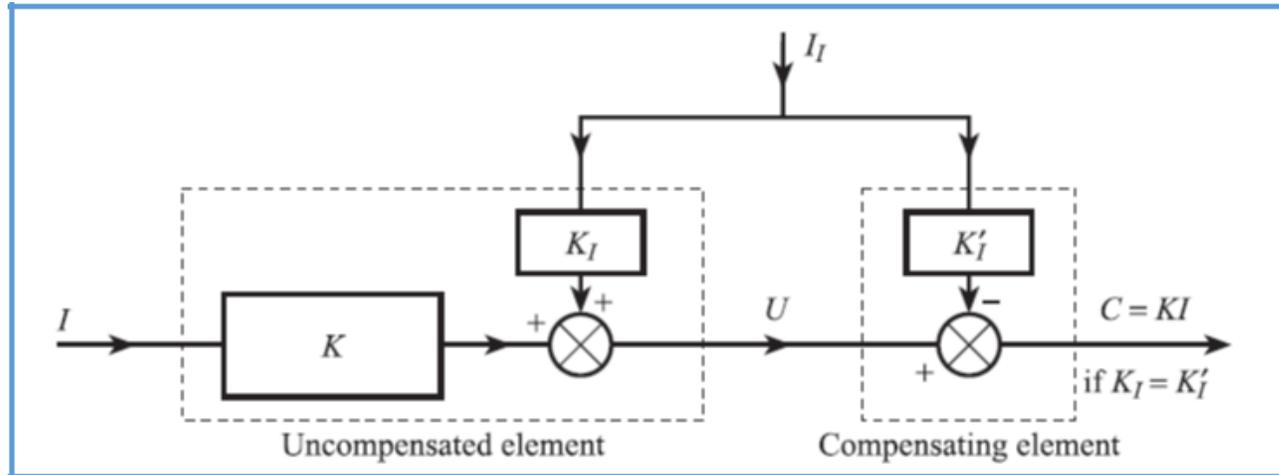
Способы компенсации внешнего возмущения:

- Изолирование элемента от внешнего возмущения, т.е.  $I_M = I_I = 0$ .
- Снижение чувствительности элемента, т.е.  $K_M = K_I = 0$ .
- Метод противодействия внешним возмущениям.
- Использование дифференциальных систем.
- Использование отрицательной обратной связи.
- Вычислительная оценка измерения.

Примеры:

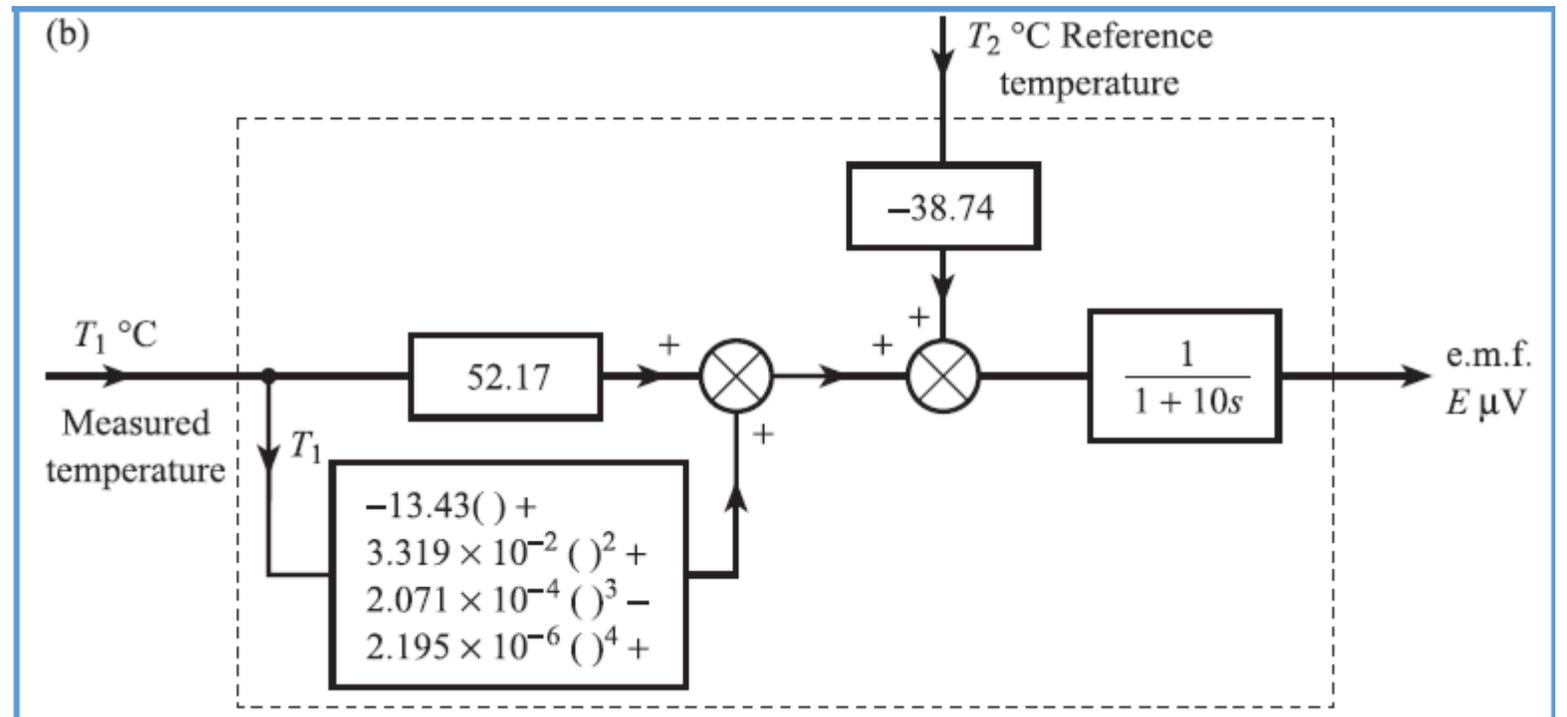
- Помещение холодного спая термопары в изолированную среду.
- Использование пружинных опор для компенсации вибрации.
- Использование сплава с низким коэффициентом температурного расширения для тензодатчиков.

# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения. Метод противодействия.

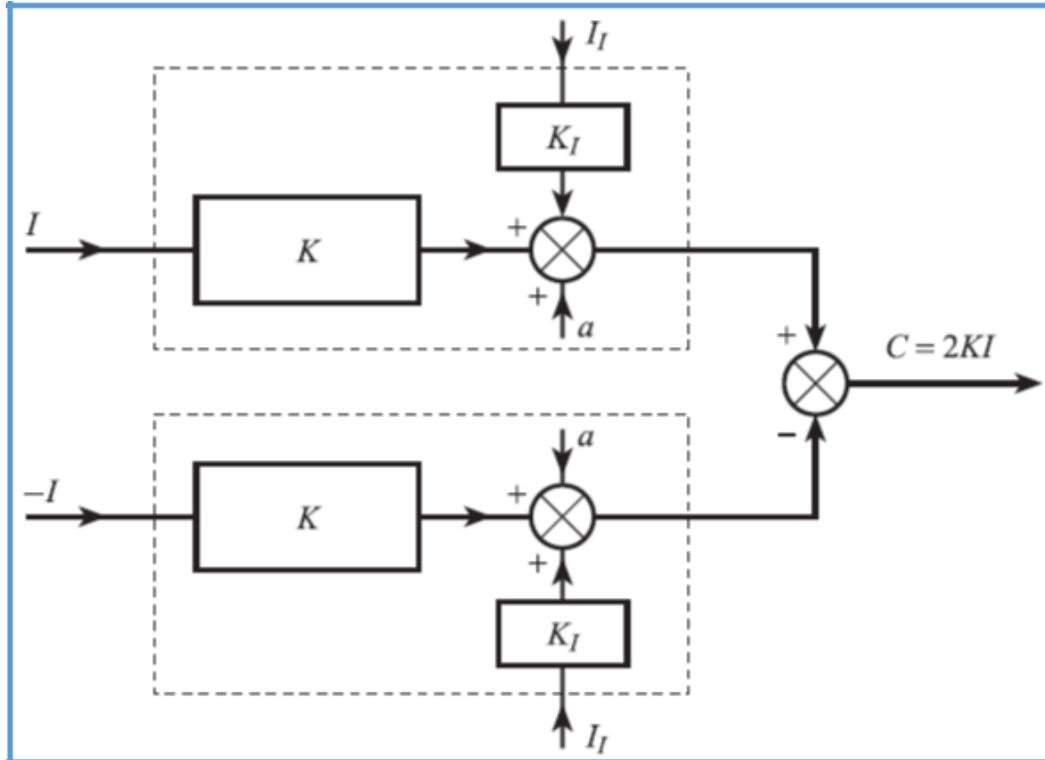


метод противодействия

Пример: для компенсации температуры холодного спая используется измерение температуры T2 термистором.



# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения. Дифференциальные схемы.



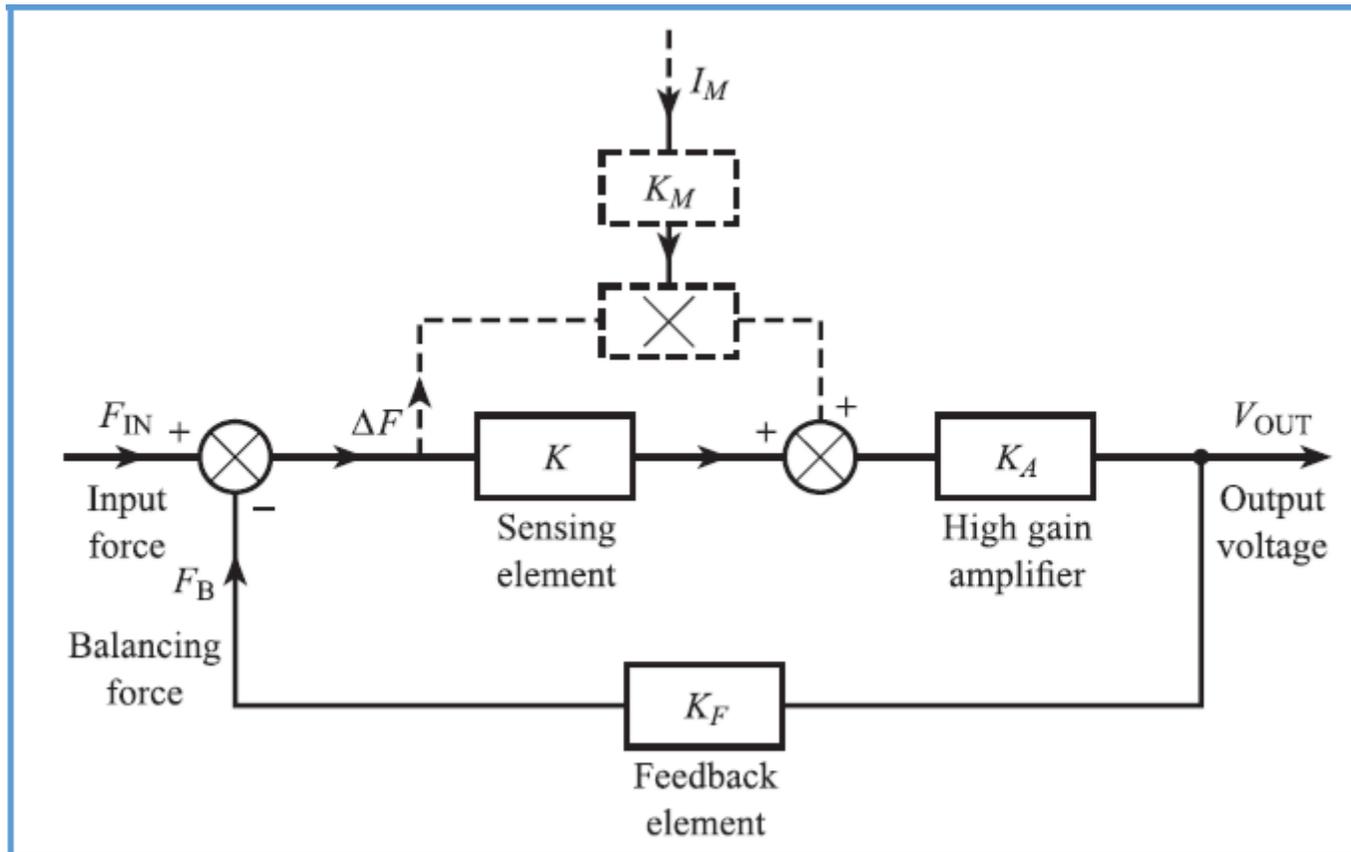
Дифференциальная схема

Примеры:

- Использование двух согласованных тензодатчиков в смежных плечах моста для компенсации изменения внешней температуры.
- Дифференциальный усилитель не усиливает синфазную помеху.

# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения. Отрицательная обратная связь.

Отрицательная обратная связь (ООС) используется для компенсации внешних возмущений, приводящих к изменению наклона характеристики  $I_M$  и компенсации нелинейности.



Использование ООС в датчике измерения силы

Без учёта возмущения:

$$\Delta F = F_{IN} - F_B$$

$$V_{OUT} = KK_A \Delta F \quad \rightarrow \quad V_{OUT} = \frac{KK_A}{1 + KK_A K_F} F_{IN}$$

$$F_B = K_F V_{OUT}$$

$$KK_A K_F \gg 1 \quad \rightarrow \quad V_{OUT} \approx \frac{1}{K_F} F_{IN}$$

С учётом возмущения:

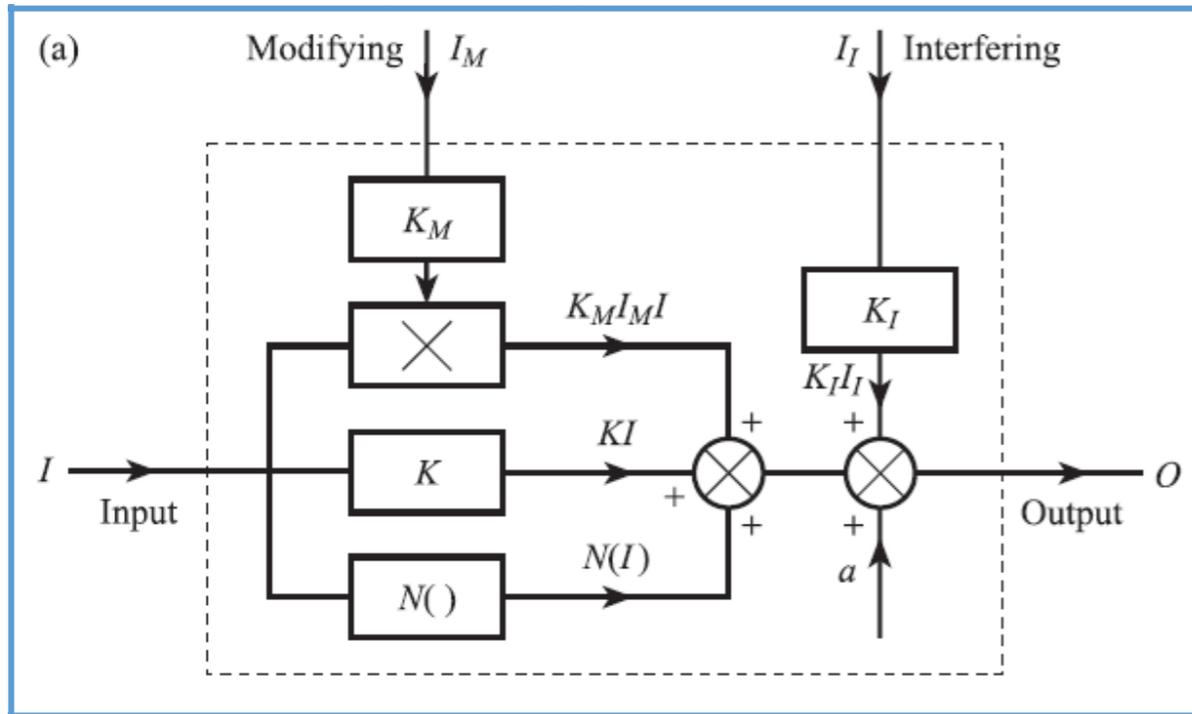
$$V_{OUT} = \frac{(K + K_M I_M) K_A}{1 + (K + K_M I_M) K_A K_F} F_{IN}$$

$$(K + K_M I_M) K_A K_F \gg 1 \quad \rightarrow \quad V_{OUT} \approx \frac{1}{K_F} F_{IN}$$

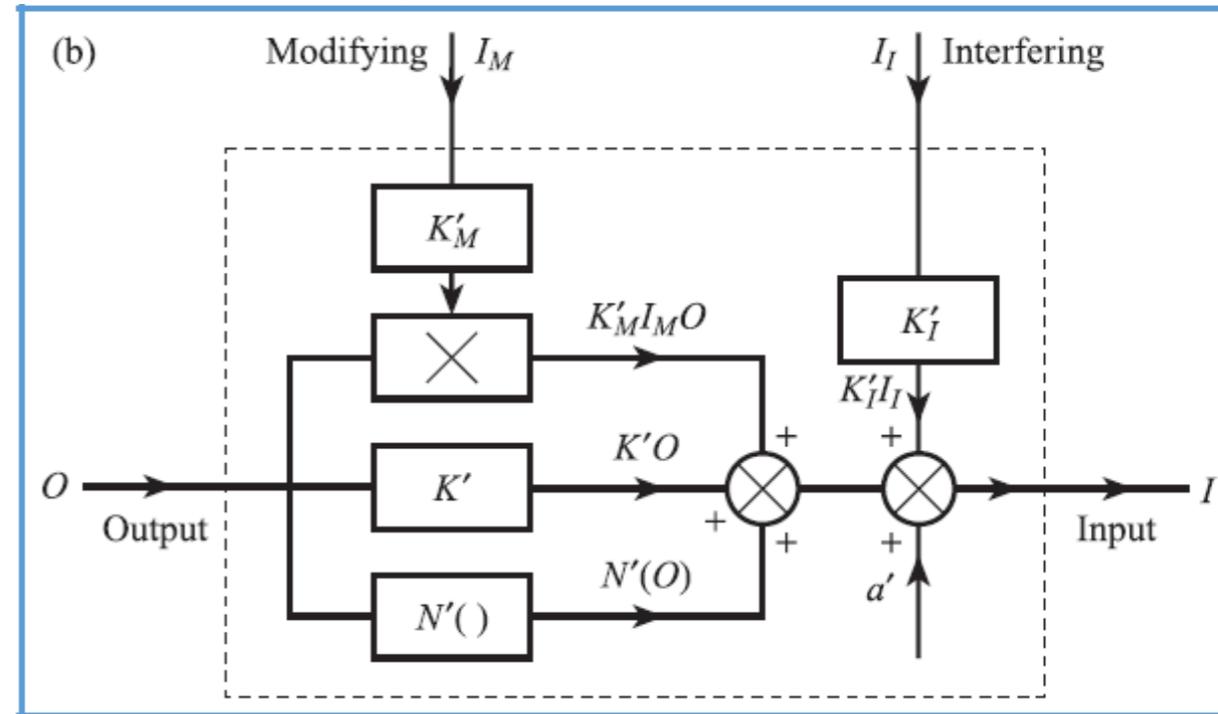
# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения. Вычислительная оценка измерения.

В качестве вычислительного элемента измерительной системы используется микроконтроллер. Для данного метода требуется модель элементов системы. Установившееся состояние элемента системы может быть описано прямым и инверсным уравнениями:

- прямое уравнение



- инверсное уравнение



$$O = KI + a + N(I) + K_M I_M I + K_I I_I$$

$$I = K'O + N'(O) + a' + K'_M I_M O + K'_I I_I$$

## Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения. Вычислительная оценка измерения.

Прямое уравнение используется для оценки полной ошибки, а инверсное – для уменьшения ошибки.

Пример прямого и обратного уравнения для константановой термопары:

$$E = 3.845 \times 10^{-2}T + 4.682 \times 10^{-5}T^2 - 3.789 \times 10^{-8}T^3 + 1.652 \times 10^{-11}T^4 \text{ mV} \quad - \text{ прямое уравнение}$$

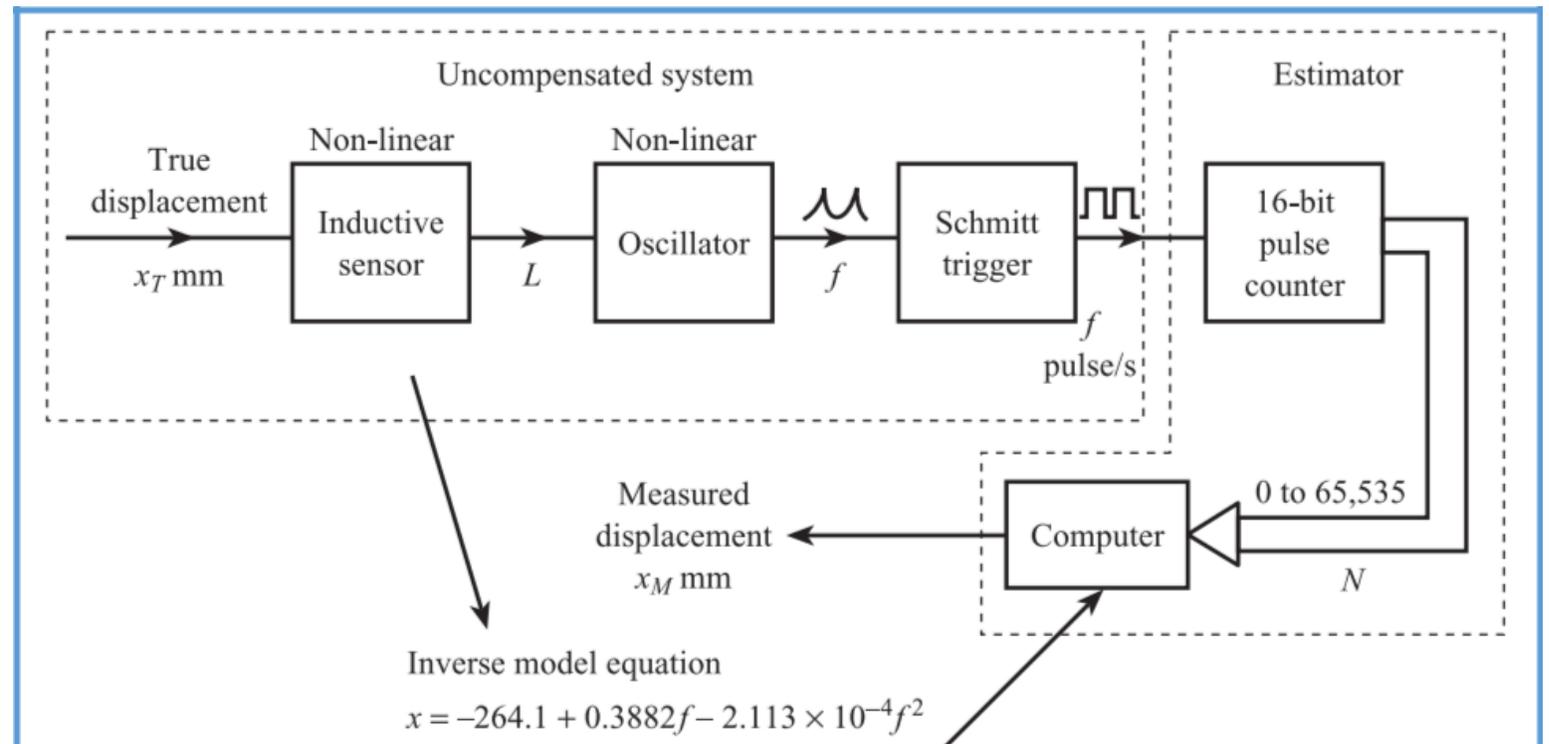
$$T = 25.55E - 0.5973E^2 + 2.064 \times 10^{-2}E^3 - 3.205 \times 10^{-4}E^4 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \text{ инверсное уравнение}$$

# Способы уменьшения ошибки. Компенсация внешнего возмущения.

## Вычислительная оценка измерения.

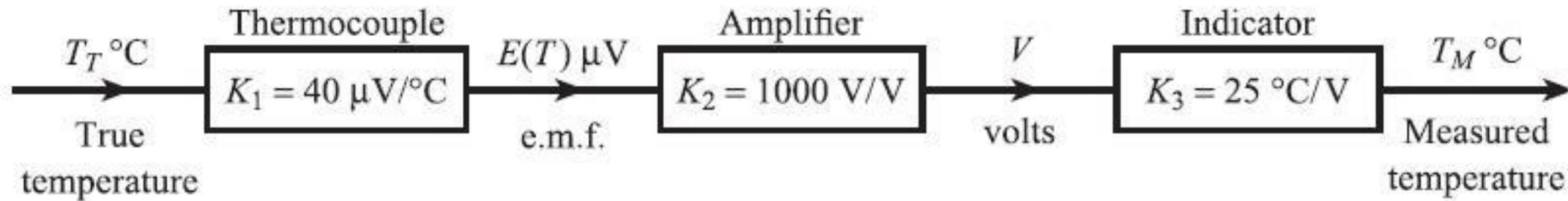
Пример:

Система измерения перемещения включает в себя индукционный сенсор, осциллятор и триггер Шмитта. Сенсор и осциллятор имеют нелинейную характеристику. Схема оценки включает счётчик, считающий импульсы с триггера для определения частоты  $f$ , и контроллер, рассчитывающий перемещение  $x$  по рассчитанной частоте  $f$  по инверсному уравнению (модели).



## Влияние нагрузки.

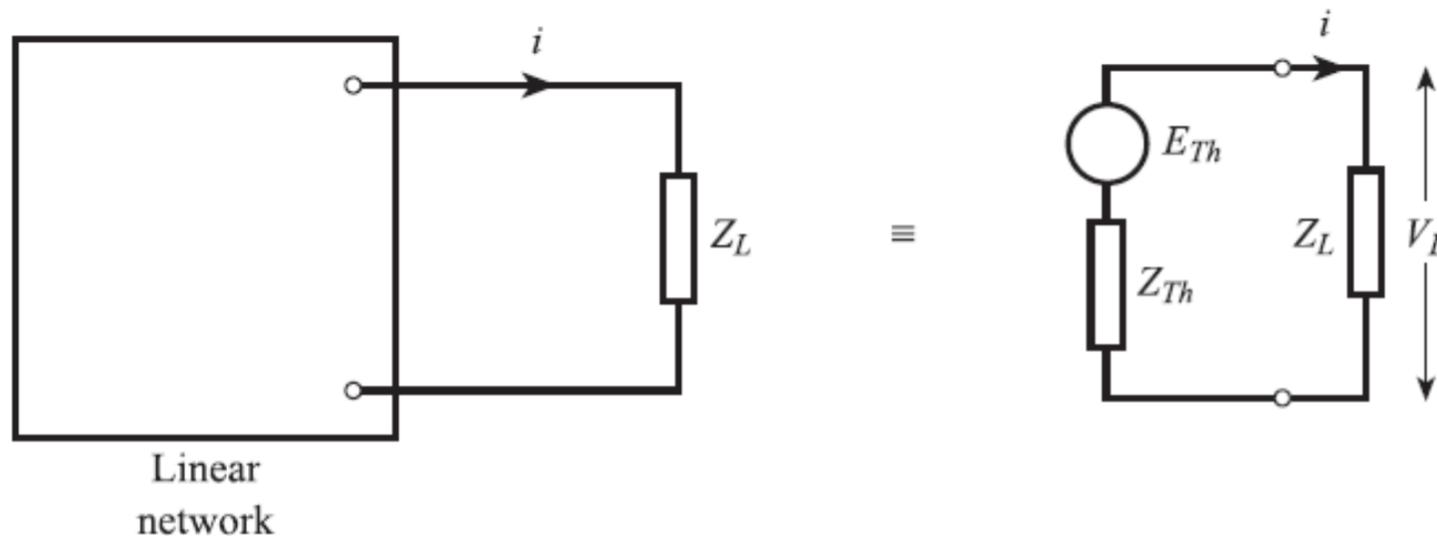
Одним из важных эффектов, влияющих на точность измерительной системы, является влияние нагрузки, при которой данный элемент в системе может изменять характеристики предыдущего элемента. В свою очередь, характеристики этого элемента могут быть изменены следующим элементом в системе



Для удобства элементы системы представляются четырёхполюсниками и заменяются эквивалентными схемами.

## Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Любую по сложности линейную электрическую схему, имеющую два вывода для подключения нагрузки, можно заменить эквивалентным источником напряжения. ЭДС этого источника равна напряжению холостого хода на выводах схемы, а внутреннее сопротивление равно сопротивлению между выводами схемы при исключении из схемы источников (методами короткого замыкания для ЭДС и методами холостого хода для источников тока)



$$i = \frac{E_{Th}}{Z_{Th} + Z_L}$$

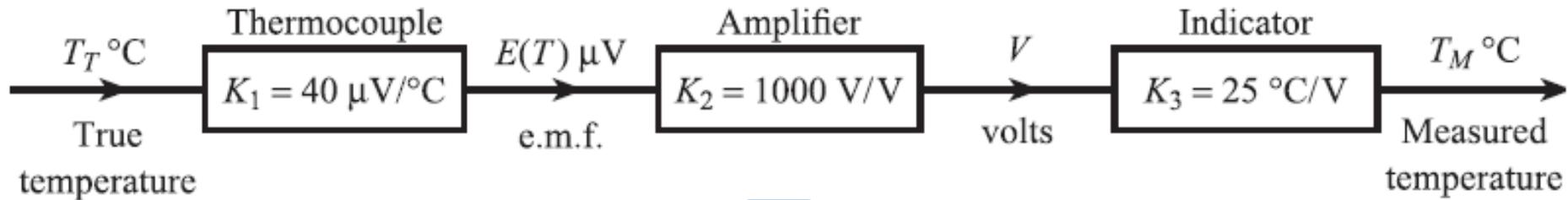


$$V_L = iZ_L = E_{Th} \frac{Z_L}{Z_{Th} + Z_L}$$

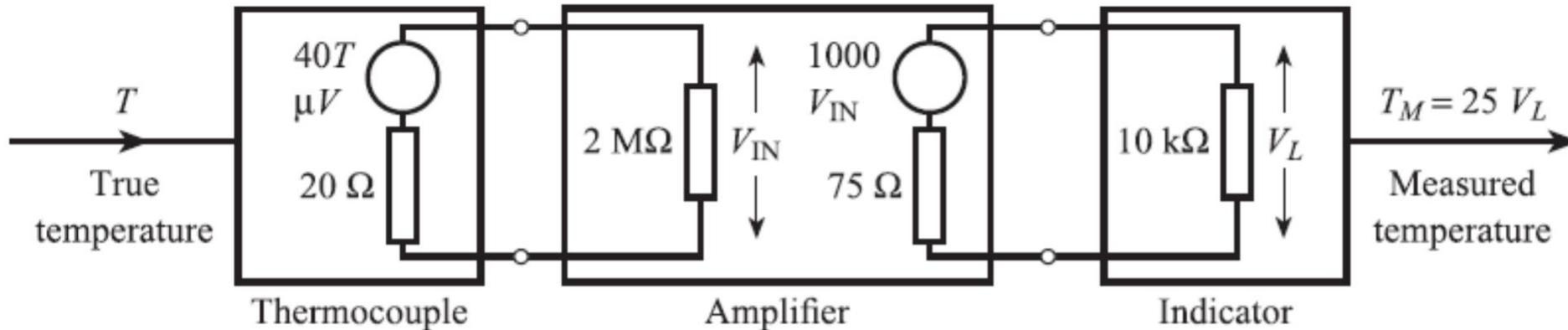
$$Z_L \gg Z_{Th}$$

# Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Пример: система измерения температуры:



Эквивалентная схема:



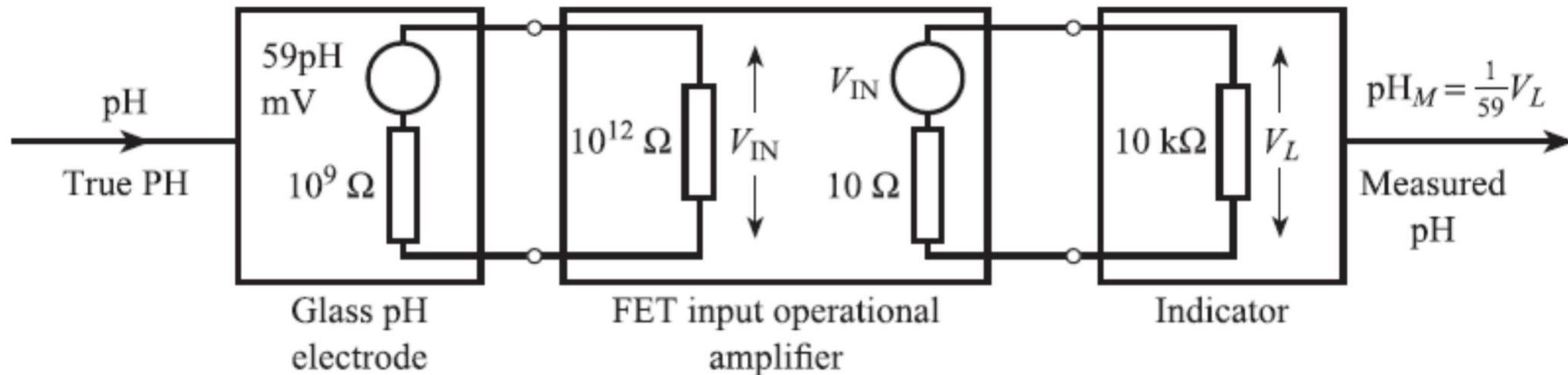
$$V_{IN} = 40 \times 10^{-6} T \left( \frac{2 \times 10^6}{2 \times 10^6 + 20} \right)$$

$$V_L = 1000 V_{IN} \left( \frac{10^4}{10^4 + 75} \right)$$

$$T_M = \left( \frac{2 \times 10^6}{2 \times 10^6 + 20} \right) \left( \frac{10^4}{10^4 + 75} \right) T = 0.9925 T$$

# Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Пример: система измерения кислотности pH – эквивалентная схема:



$$pH_M = 59pH \left( \frac{10^{12}}{10^{12} + 10^9} \times \frac{10^4}{10^4 + 10} pH \right) \frac{1}{59}$$

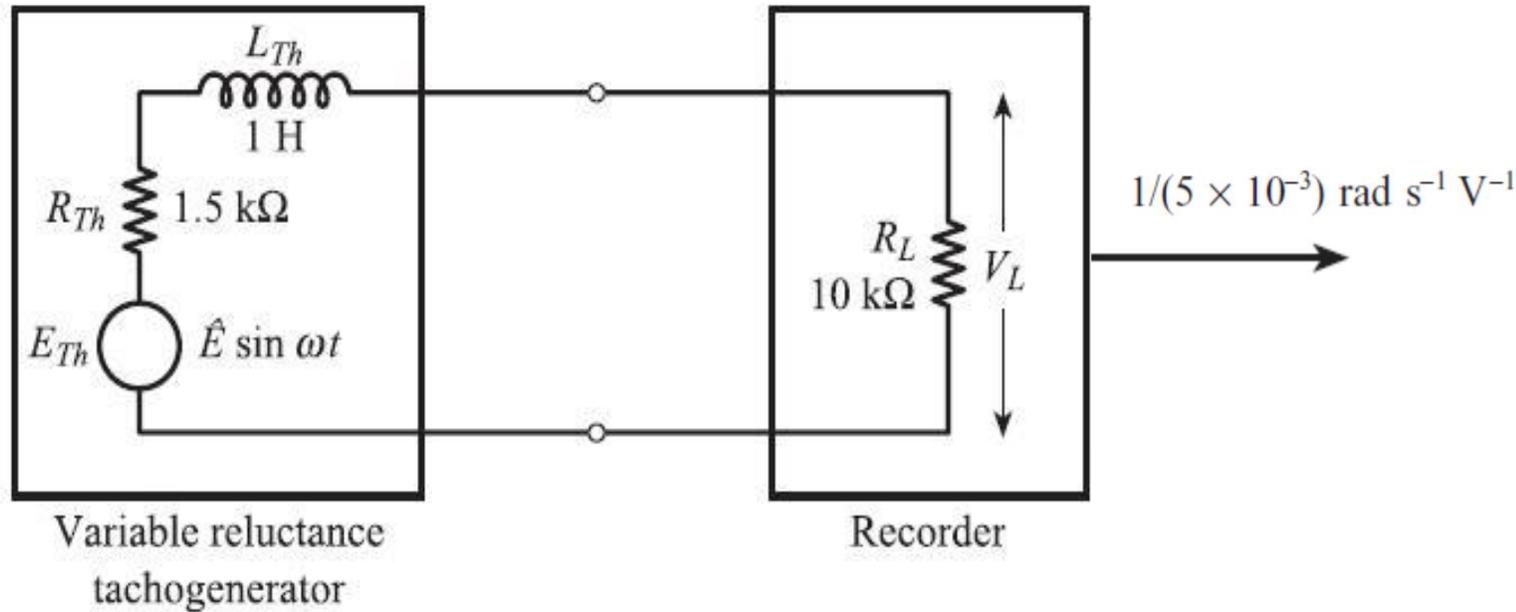
ошибка измерения  $-0.002pH$

При подключении электрода напрямую к индикатору без буферного усилителя:

$$pH_M = 59pH \left( \frac{10^4}{10^4 + 10^9} \right) \frac{1}{59} \approx 10^{-5} pH$$

# Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Пример: система измерения круговой скорости – эквивалентная схема:



Параметры схемы:

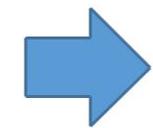
$$\hat{E} = (5.0 \times 10^{-3}) \omega_r$$

$$\omega = 6\omega_r$$

$$Z_{Th} = R_{Th} + j\omega L_{Th}$$

$\omega_r = 10^3 \text{ rad s}^{-1}$   $\rightarrow$

$\hat{E} = 5 \text{ V}, \omega = 6 \times 10^3 \text{ rad s}^{-1}$   
 $Z_{Th} = 1.5 + 6.0j \text{ k}\Omega$

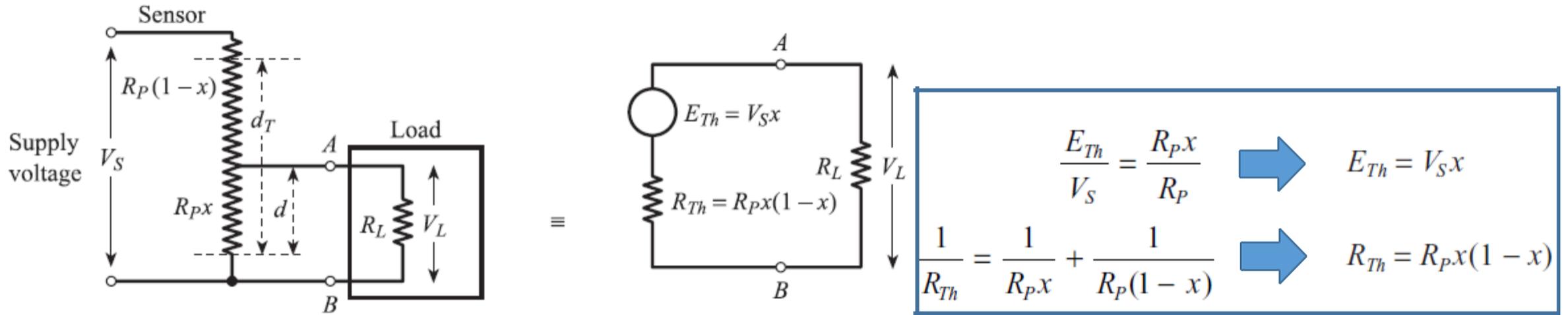


$$\hat{V}_L = \hat{E} \frac{R_L}{|Z_{Th} + R_L|} = 5 \frac{10}{\sqrt{(11.5)^2 + (6.0)^2}} = 3.85 \text{ V}$$

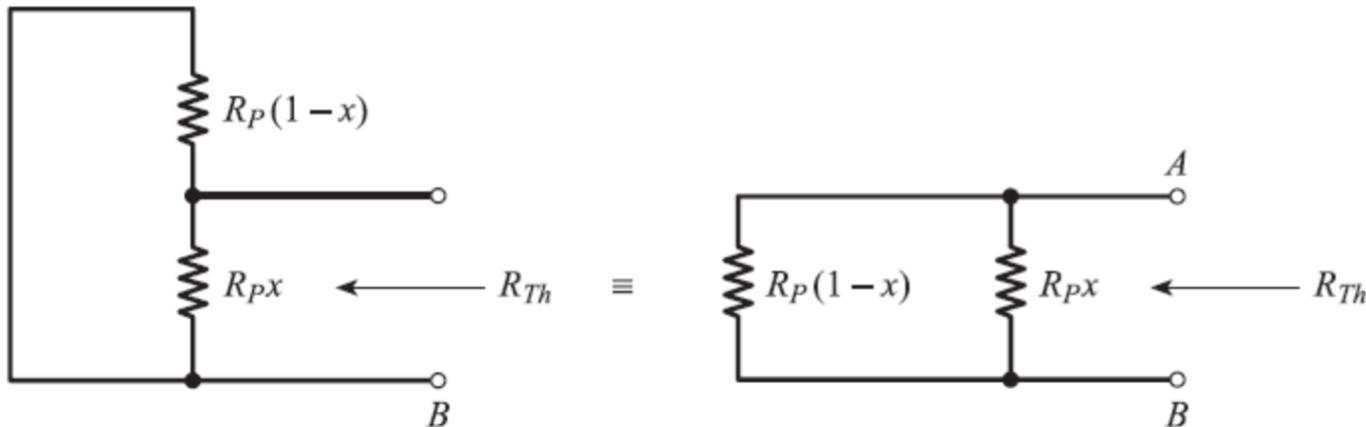
$\omega_r = 770 \text{ rad s}^{-1}$

# Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Пример расчёта эквивалентной схемы для потенциометра (измерение перемещения  $d$ ):



Расчёт эквивалентного сопротивления:



$$V_L = E_{Th} \frac{R_L}{R_{Th} + R_L} = V_S x \frac{1}{(R_P/R_L)x(1-x) + 1}$$

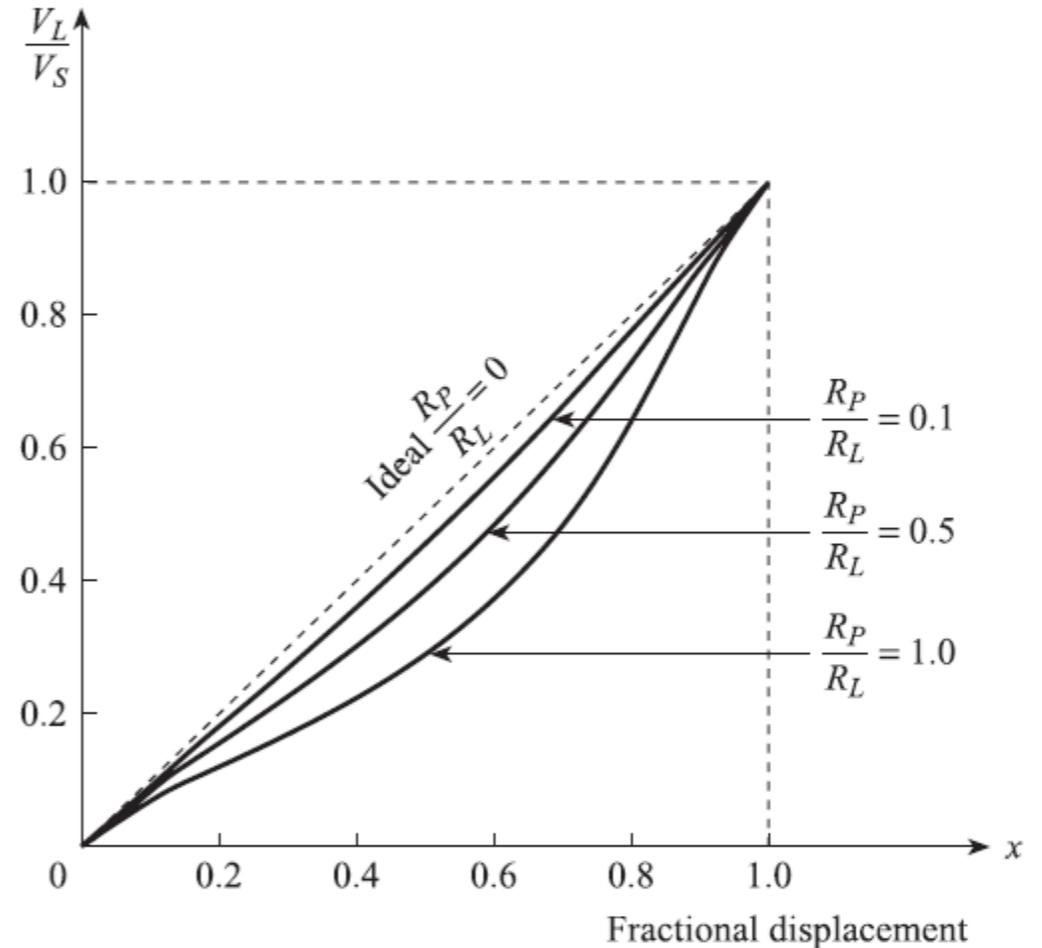
# Теорема об эквивалентном источнике напряжения (теорема Тевенина)

Пример расчёта эквивалентной схемы для потенциометра (измерение перемещения  $d$ ):

$$V_L = E_{Th} \frac{R_L}{R_{Th} + R_L} = V_S x \frac{1}{(R_P/R_L)x(1-x) + 1}$$

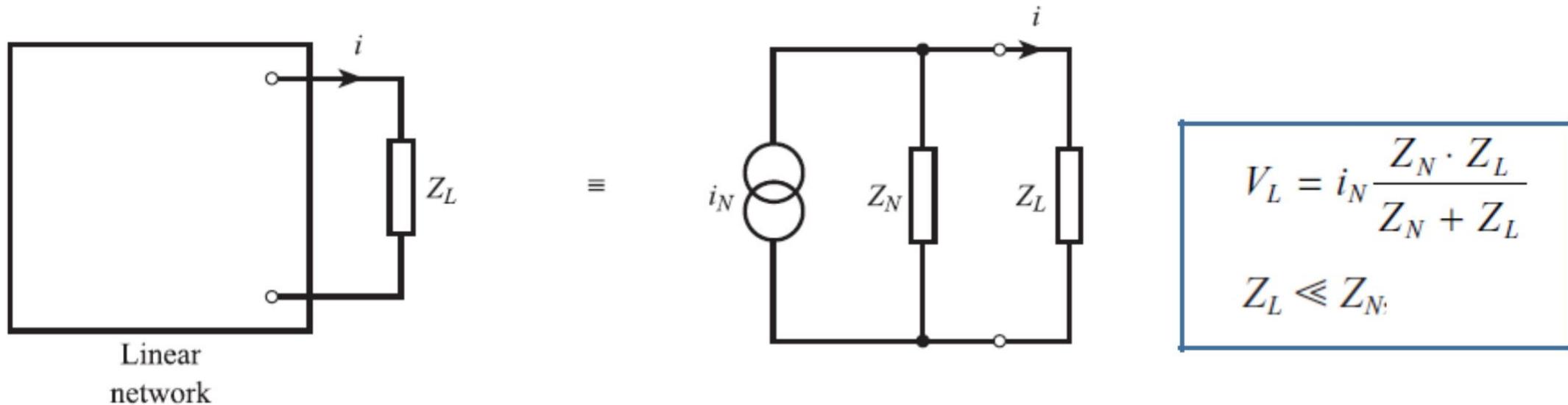


$$N(x) = E_{Th} - V_L = V_S \left\{ \frac{x^2(1-x)(R_P/R_L)}{1 + (R_P/R_L)x(1-x)} \right\}$$



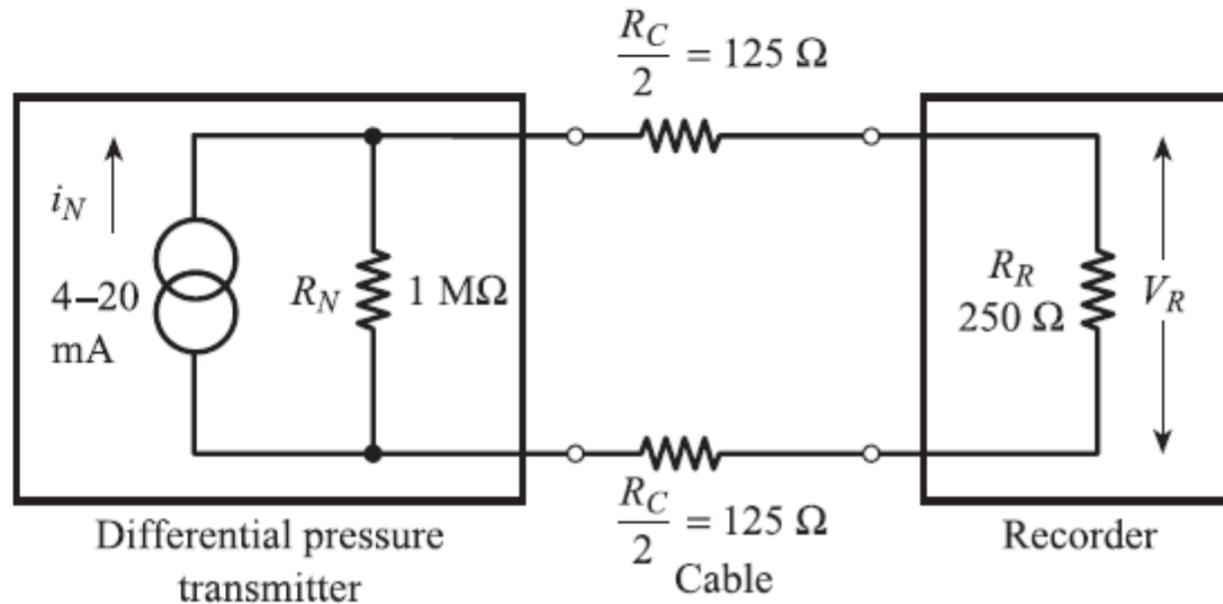
## Теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Нортон)

Любую по сложности линейную электрическую схему, имеющую два вывода для подключения нагрузки, можно заменить эквивалентным источником тока. Ток этого источника равен току короткого замыкания схемы, а внутренняя проводимость равна проводимости между выводами схемы при исключении из схемы источников (методами короткого замыкания для ЭДС и методами холостого хода для источников тока)



# Теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Нортон)

Пример: датчик перепада давления, выдающий стандартный токовый сигнал 4..20 мА, пропорциональный разности давлений от 0 до  $2 \cdot 10^4$  Па:



$$V_L = i_N \frac{R_N(R_C + R_R)}{R_N + R_C + R_R}$$

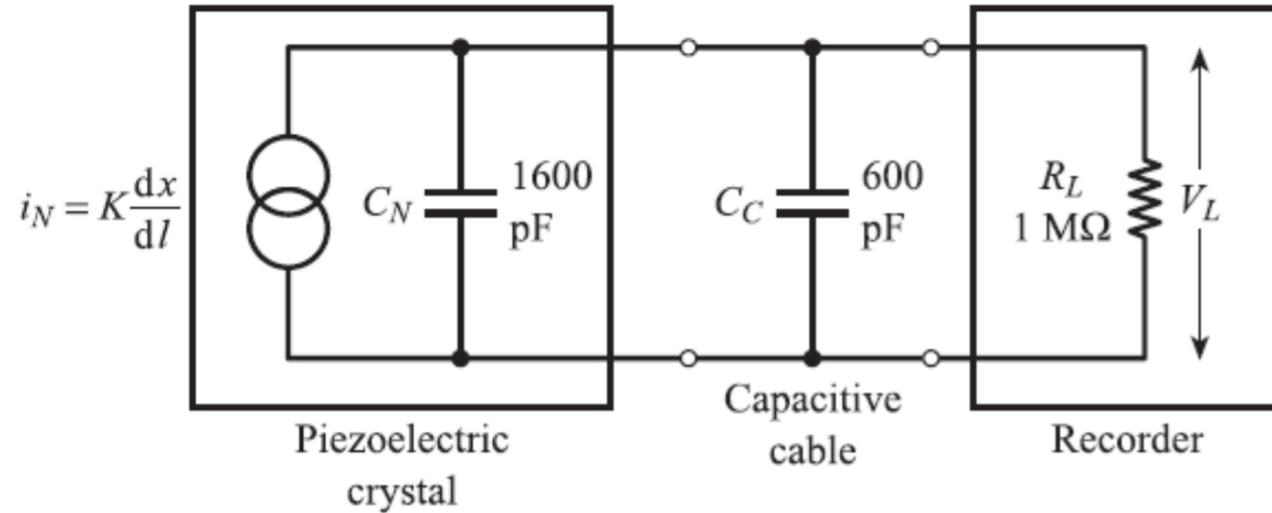
$$V_R/V_L = R_R/(R_C + R_R)$$



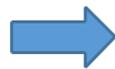
$$V_R = i_N R_R \frac{R_N}{R_N + R_C + R_R} = 0.9995 i_N R_R$$

# Теорема об эквивалентном источнике тока (теорема Нортон)

Пример: пьезоэлектрический датчик измерения усилия:



$$\frac{1}{Z} = C_N s + C_C s + \frac{1}{R_L}$$



$$Z = \frac{R_L}{1 + R_L(C_N + C_C)s}$$



$$\frac{\Delta \vec{V}_L(s)}{\Delta \vec{i}_N(s)} = \frac{R_L}{1 + R_L(C_N + C_C)s} = \frac{10^6}{1 + 2.2 \times 10^{-3}s}$$

## Теория четырёхполюсников. Обобщение переменных процессов разной природы

Влияние электрической нагрузки может быть описано с помощью пары переменных, напряжения и тока. Напряжение является примером относительной переменной или переменной усилия; ток является примером сквозной переменной или переменной потока. Переменная усилия проводит переменную потока через импеданс. Другими примерами пар переменных являются: сила/скорость, крутящий момент/угловая скорость, разность давлений/объемный расход и разность температур/тепловой поток.

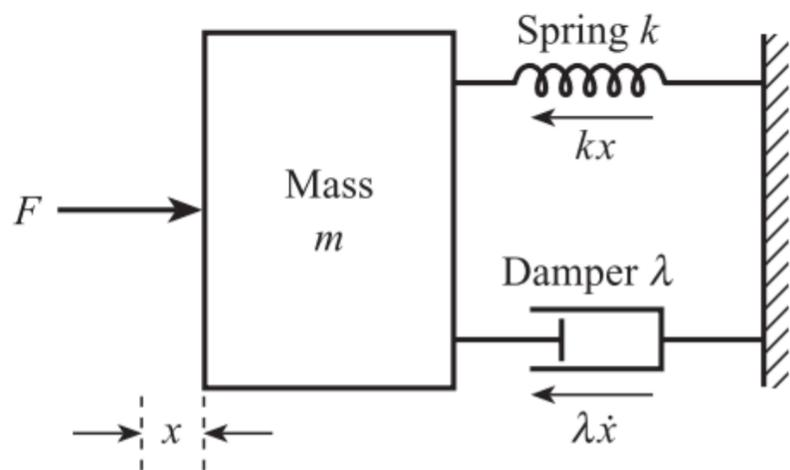
Каждая пара  $y-\dot{x}$  имеет следующие свойства:

- Произведение переменных  $y\dot{x}$  представляет мощность;
- Отношение переменных  $y/\dot{x}$  представляет импеданс (сопротивление).
- таблице ниже приведены пары переменных для процессов различной природы (для различных форм энергии) и для каждой пары определены соответствующие величины импеданса, жесткости, податливости и инертности.

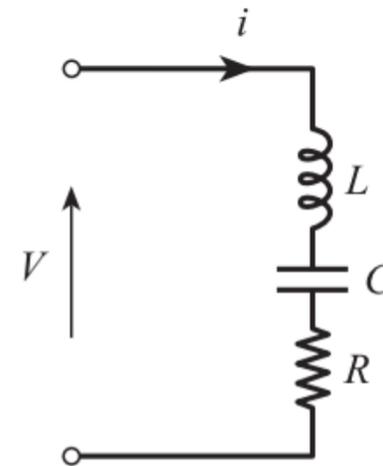
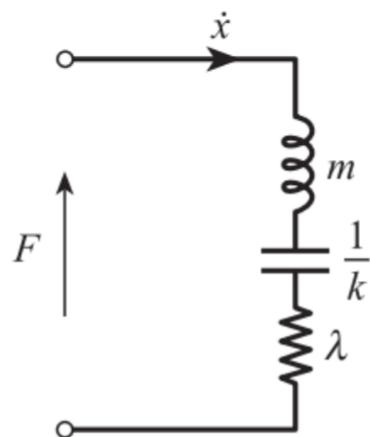
Variables	$\frac{d}{dt} \dot{x}$	$\int \dot{x} dt$	Flow $\dot{x}$	Effort $y$	Impedance $\frac{y}{\dot{x}}$	Stiffness $\frac{y}{\int \dot{x} dt}$	Compliance $\frac{\int \dot{x} dt}{y}$	Inertance $\frac{y}{d\dot{x}/dt}$
Mechanical-translation	acceleration	displacement	velocity	force	$\frac{\text{force}}{\text{velocity}} =$ damping constant	$\frac{\text{force}}{\text{displacement}} =$ mechanical stiffness	$\frac{\text{displacement}}{\text{force}} =$ $\frac{1}{\text{mech. stiffness}}$	$\frac{\text{force}}{\text{acceleration}} =$ mass
Mechanical-rotation	angular acceleration	angular displacement	angular velocity	torque	$\frac{\text{torque}}{\text{ang. velocity}} =$ damping constant	$\frac{\text{torque}}{\text{angular disp.}} =$ mechanical stiffness	$\frac{\text{angular disp.}}{\text{torque}} =$ $\frac{1}{\text{mech. stiffness}}$	$\frac{\text{torque}}{\text{angular accn}} =$ moment of inertia
Electrical	$\frac{d}{dt}$ (current)	charge	current	voltage	$\frac{\text{voltage}}{\text{current}} =$ electrical resistance	$\frac{\text{voltage}}{\text{charge}} =$ $\frac{1}{\text{elect. capacitance}}$	$\frac{\text{charge}}{\text{voltage}} =$ electrical capacitance	$\frac{\text{voltage}}{\frac{d}{dt}(\text{current})} =$ inductance
Fluidic		volume	volume flow rate	pressure	$\frac{\text{pressure}}{\text{vol. flow rate}} =$ fluidic resistance	$\frac{\text{pressure}}{\text{volume}} =$ $\frac{1}{\text{fluid capacitance}}$	$\frac{\text{volume}}{\text{pressure}} =$ fluidic capacitance	$\frac{\text{pressure}}{\frac{d}{dt}(\text{flow rate})} =$ fluidic inertance
Thermal		heat	heat flow rate	temperature	$\frac{\text{temperature}}{\text{heat flow rate}} =$ thermal resistance	$\frac{\text{temperature}}{\text{heat}} =$ $\frac{1}{\text{therm. capacitance}}$	$\frac{\text{heat}}{\text{temperature}} =$ thermal capacitance	

# Теория четырёхполюсников. Обобщение переменных процессов разной природы

Пример: механическая и электрическая системы:



Механическая система: Электрическая система:



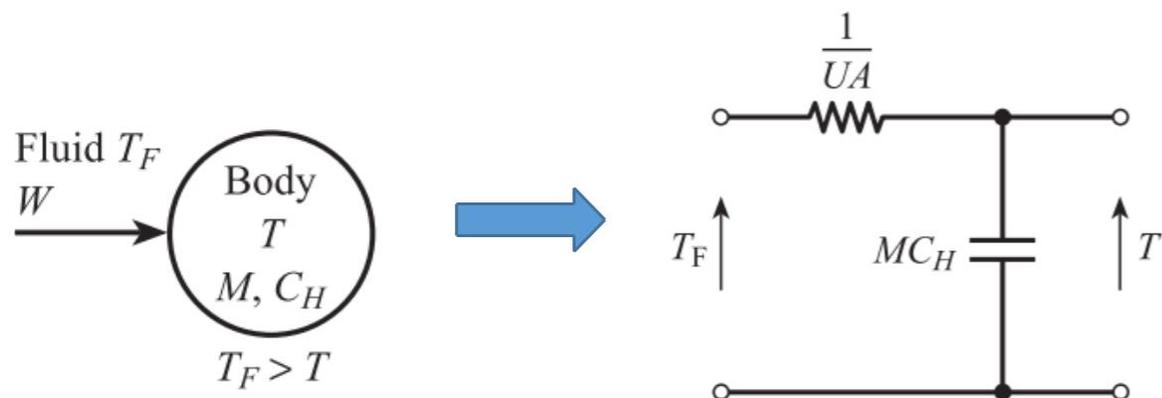
$$Z_M(s) = \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta \dot{\vec{x}}} = ms + \lambda + \frac{k}{s}$$

$$Z_E(s) = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta \dot{\vec{i}}} = Ls + R + \frac{1}{Cs}$$

# Теория четырёхполюсников. Обобщение переменных процессов разной природы

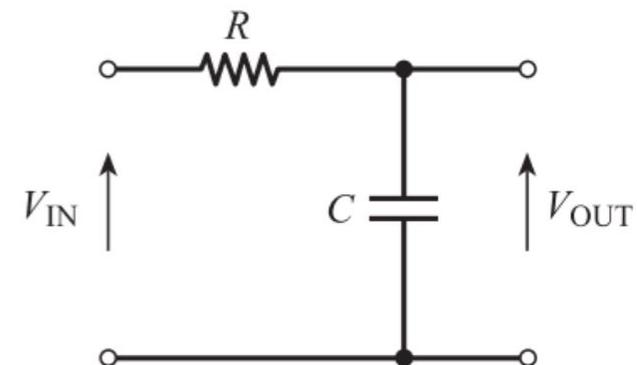
Пример: термодинамическая и электрическая системы:

Термодинамическая система:



$$MC_H \frac{dT}{dt} = UA(T_F - T)$$

Электрическая система:



$$C \frac{dV_{OUT}}{dt} = \frac{1}{R}(V_{IN} - V_{OUT})$$