

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

А.И. Солдатов

Изучение преобразователей на основе тензорезистора
Методические указания по выполнению лабораторной работы по
дисциплине «Измерительные преобразователи в робототехнических
комплексах» для студентов направлений
15.04.06 Мехатроника и робототехника.

Томск 2023

УДК 372.862

ББК 30

С 60

Рецензент:

Костина М.А., доцент каф. управления инновациями ТУСУР,

канд. техн. наук

Солдатов, Алексей Иванович

С 60 Изучение преобразователей на основе тензорезистора: метод. указания по выполнению студентами лабораторных работ/ А.И.Солдатов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 32 с.

Методические указания по выполнению студентами лабораторной работы «Изучение преобразователей на основе тензорезистора» разработаны для студентов магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника.

Одобрено на заседании научно-методической комиссии ФИТ, протокол

№ 5 от 28.12.2022 г.

УДК 372.862

ББК 30

© Солдатов А.И., 2023

© Томск.гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

Оглавление

Цель работы	2
Задачи	2
Краткие теоретические сведения:	2
Конструктивное исполнение тензорезисторов.....	6
<i>Устройство проволочных тензорезисторов</i>	7
<i>Фольговые тензорезисторы</i>	10
Используемое оборудование:	21
Описание лабораторной установки:.....	25
Предварительное задание:.....	29
Программа работы:	29
Содержание отчета.....	29
Контрольные вопросы:	29
Источники информации:	30

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Изучение преобразователей на основе тензорезистора

Цель работы

Изучение измерительного преобразователя на основе тензорезистора.

Задачи

Изучить принцип работы тензорезистора. Изучить характеристику преобразования тензорезистора. Определить чувствительность и разрешающую способность датчика на основе тензорезистора. Определить погрешность тензорезистора.

Краткие теоретические сведения:

Слово **тензорезистор** образовано слиянием двух латинских слов «tensus» и «resisto», которые переводятся как напряжённый и сопротивляюсь). Тензорезистор это резистор, изготовленный из проводящего материала, нанесенного на гибкую подложку. При деформировании подложки величина сопротивления тензорезистора изменяется [1]. Основная область применения тензорезисторов это тензометрия. Для измерения величины деформации конструкций или отдельных элементов конструкции тензорезистор должен быть связан с этой конструкцией [2]. Тензорезистор является чувствительным элементов всех типов тензодатчиков, в которых измеряется сила, давление, вес, механическое напряжение, крутящий момент и т.д.

При увеличении длины проводника тензорезистора, что происходит во время деформации растяжения, увеличивается его сопротивление. При уменьшении длины проводника тензорезистора, что происходит во время деформации сжатия, уменьшается его сопротивление. Как правило изменение величины сопротивления не превышает 0,1% при максимальной деформации. Следует отметить, что тензорезистор, изготовленный из полупроводника, обладает большей чувствительностью по сравнению с проволочным тензорезистором. Изменение величины сопротивления измеряют с помощью измерительного моста, преобразуя деформацию в электрический сигнал.

Сопротивление проводника рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad 4.1$$

где R - сопротивление проводника, S – площадь поперечного сечения, L - длина проводника, ρ - удельное сопротивление проводника.

При деформации растяжения длина проводника увеличивается, площадь его поперечного сечения уменьшается, следовательно, сопротивление проводника увеличивается. Кроме того, при деформации изменяется структура кристаллической решетки проводника, что увеличивает удельное сопротивление и, следовательно, увеличивает общее сопротивление проводника. Учет этих эффектов отражен в формуле 4.2:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R} = \frac{(1+2\mu)\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad 4.2$$

где ε_r — относительное изменение сопротивления;

μ — коэффициент Пуассона;

ΔL – абсолютное изменение длины проводника тензорезистора вследствие деформации, м;

L_0 – начальная длина проводника тензорезистора в недеформированном состоянии, м;

$\frac{\Delta L}{L}$ — относительное изменение длины;

$\Delta\rho_0$ – абсолютное изменение удельного сопротивления тензорезистора вследствие деформации, Ом\м;

ρ_0 – начальное значение удельного сопротивления тензорезистора в недеформированном состоянии, Ом\м;

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ — относительное изменение удельного сопротивления.

Составляющая $\frac{(1+2\mu)\Delta L}{L_0}$ в выражении 4.2 учитывает геометрические изменения проводника при деформации. Составляющая $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ в этом же выражении учитывает изменение удельного сопротивления проводника из-за деформации.

Для характеристики разных тензочувствительных материалов ввели коэффициент тензочувствительности, который характеризует чувствительность к деформации. Его можно вычислить по формуле (4.3):

$$G = \frac{(\Delta R/R)}{(\Delta L/L)} = 1 + 2\mu + \frac{(\Delta\rho/\rho)}{(\Delta L/L)} \quad 4.3$$

С учетом того, что коэффициент μ (коэффициент Пуассона) для большой группы тензочувствительных металлов находится в районе 0,3, то

коэффициент тензочувствительности для этих металлов немного превышает значение 1,6.

Например, коэффициент тензочувствительности пленочных тензорезисторов, изготовленных из металла, не намного превышает 2 [4]. Его величина определяется длиной провода, площадью поперечного сечения и пьезорезистивным эффектом материала, из которого изготовлен проводник. Для справки в таблице 1 отражена чувствительность и температурный коэффициент сопротивления некоторых материалов, обладающих эффектом тензочувствительности. Следует заметить, что полупроводники обладают существенно большим коэффициентом тензочувствительности (в 50-70 раз), чем металлы. Платина и никель, которые не используются в чистом виде, перечислены только для целей сравнения.

Таблица 1. Коэффициенты чувствительности тензометрических материалов

№	Материал	Чувствительность (G)	ТКС °С-! 10-5
1	Платина (Pt 100%)	6,1	7
2	Платина- Иридий (Pt 95%, Ir 5%)	5,1	5
3	Платина- вольфрам (Pt 92%, W 8%)	4,0	5
4	Изоэластик (Fe 55.5%, Ni 36% Cr 8%, Mn 0.5%)	3,6	17
5	Константан / Advance / Копель (Ni 45%, Cu 55%)	2,1	2
6	Нихром V (Ni 80%, Cr 20%)	2,1	10
7	Карма (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%)	2,0	2
8	Броня D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%)	2,0	24
9	Монель (Ni 67%, Cu 33%)	1,9	
10	Манганин (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	0,47	2
11	Никель (Ni 100%)	-12,1	-12...20
12	Металлическая фольга	2...5	3
13	Монокристаллический кремний	-125...+200	70...700
14	Поликристаллический кремний	±30	70...700
15	Тонкопленочные резистивные материалы	100	4

Поскольку большинство металлических материалов имеют коэффициент Пуассона от 0,25 до 0,35, ожидается, что член $(1 + 2\mu)$ в коэффициенте чувствительности к деформации G будет составлять от 1,5 до 1,7. Однако сам коэффициент чувствительности к деформации G колеблется от -12,1 для никеля до 6,1 для платины. Этот широкий разброс указывает на то, что составляющая $\Delta\rho/\rho$ в выражении (4.2) является очень большой для некоторых материалов.

Достоинства и недостатки материалов, обладающих свойством тензочувствительности, и используемых при изготовлении тензодатчиков

Константан (сплав Advance, Copel) является старейшим и наиболее широко используемым тензометрическим материалом.

Достоинства:

- Он имеет достаточно высокое электрическое сопротивление ($\rho = 0,49 \mu\Omega \cdot \text{м}$), чтобы обеспечить надлежащее сопротивление при малой расчетной длине.
- Он имеет относительно низкую деформацию, вызванную температурой, в диапазоне температур от -30 до 193 °C (от -20 до 380 °F). Таким образом, считается, что этот материал имеет самокомпенсацию температуры.
- Он имеет почти постоянную чувствительность в широком диапазоне напряжений.
- Отожженный константан можно использовать даже в пластической области с деформацией > 5%.

Недостатки:

Сопротивление константана постоянно дрейфует, когда температура поднимается выше 65 °C (150 °F), что может стать проблемой для измерения деформации в течение длительного периода времени или при высокой температуре.

Изоэластичный сплав подходит для измерения динамической деформации при вибрации и ударе.

Достоинства:

- Он имеет более высокую чувствительность (3,6 против 2,1 у Константина), что улучшает соотношение сигнал/шум.
- Он имеет более высокое сопротивление, так что большинство изоэластичных тензорезисторов имеют сопротивление 350 Ом по сравнению со 120 Ом у обычных тензорезисторов из константана, что также увеличивает чувствительность к деформации

- Он обладает лучшими усталостными свойствами среди тензометрических материалов.

Недостатки:

- Изоэластик не обладает свойством самокомпенсации температуры, в отличие от Константина или Кармы.

- Он слишком чувствителен к изменениям температуры, поэтому не подходит для измерений, которые длятся в течение длительного периода времени при колебаниях температуры.

- Чувствительность снижается с 3,1 до 2,5, когда деформация превышает 7500 мкм.

Сплав Карма имеет сходные общие свойства с константаном.

Достоинства:

- Обладает эффективной функцией самокомпенсации температуры от -73 до 260 °C (от -100 до 500 °F).

- Обладает более высокой устойчивостью к циклическим нагрузкам, чем константан.

Недостатки:

- Паять сложнее.

Нихром V, Броня D и сплавы на основе платины используются в условиях высоких температур (> 230°C; 450°F) или для других специальных целей.

Недостатки ,

- Паять сложнее.

Конструктивное исполнение тензорезисторов

Самый широко распространенный способ закрепления тензорезистора на детали является приклейка с помощью специального клея. Клей должен обладать хорошей эластичностью, чтобы при деформировании детали оставалось надежное соединение тензорезистора и детали. Кроме того, клей должен обладать хорошей теплопроводностью, чтобы передавать тепло от тензорезистора, появляющегося при деформации, в деталь и тем самым осуществлять необходимый температурный режим. Использование некачественного клея может повлиять на точность измерения. В частности из-за высокой эластичности клея деформация тензорезистора может отличаться от деформации детали. Отклонение будет зависеть от качества приклейки, температуры окружающей

среды и величины деформации. Погрешность в самом лучшем случае будет находиться в диапазоне 0,05...0,2%.

Температурный диапазон, в котором работают тензорезисторы, в основном определяется характеристиками клея. Температурный диапазон клея существенно меньше температурного диапазона тензочувствительного материала. Тензорезисторы, предназначенные для работы при высоких температурах, приклеивают с помощью неорганических фосфатных цементов и жаростойких окислов алюминия. Клей наносится методом газоплазменного напыления. При этом максимальная рабочая температура тензорезистора зависит от ухудшения изоляционных свойств клея при высоких температурах. Максимальная рабочая температура тензорезисторов составляет 350...600 градусов Цельсия при измерении статической деформации и 600...800 градусов Цельсия при измерении динамической деформации.

Устройство проволочных тензорезисторов

Проволочный тензорезистор закрепляют на тонкой основе, изготовленной из бумаги, пропитанной клеем, или на лаковой пленке. Для высокотемпературных тензорезисторов используется стеклоткань в качестве основы, пропитанная высокотемпературным цементом.

На тонкую полоску основы наклеивают тонкую проволоку диаметром 0,02...0,05 мм зигзагообразной формы. На концах проволоки закрепляют медные выводы. Для защиты от внешнего воздействия проволока покрывается лаком. Длина полоски, на которой расположена проволока, называется измерительной базой тензорезистора (рис.1). Широко распространенной базой является база длиной 5...10 мм, при этом сопротивление может варьироваться в диапазоне 30...500 Ом.

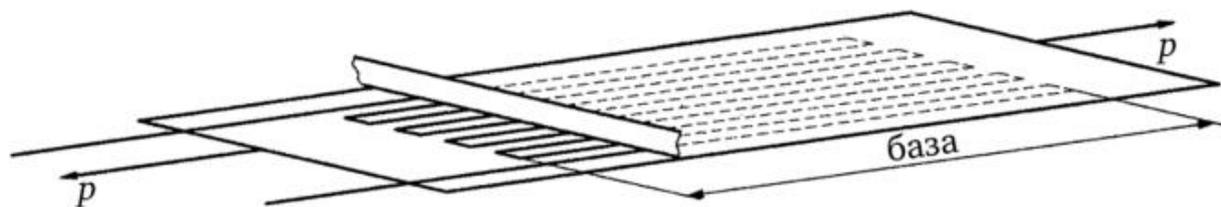


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции проволочного тензорезистора

Проволочные тензорезисторы изготавливают из материалов с высоким коэффициентом тензочувствительности и небольшим температурным коэффициентом сопротивления. К таким материалам относится константан. Для изготовления основы широко используют

бакелитовый лак (температурный диапазон от -40 до +200 градусов Цельсия) или клей БФ-2 (температурный диапазон от -40 до +70 градусов Цельсия). Клеи Б-58 и БН-15 обладают более лучшими температурными характеристиками и способны работать в диапазоне температур от -40 до 400 градусов Цельсия. Цементы Б-56 и ВН-12 обладают еще более лучшими температурными характеристиками и способны работать в диапазоне температур от -40 до 800 градусов Цельсия. В таблице 2 приведен перечень проволочных тензорезисторов серийно выпускаемых в России.

Система обозначения тензорезисторов состоит из нескольких букв. Первая буква (П) обозначает, что тензорезистор проволочный; вторая буква (К — константан) обозначает материал проволоки; третья буква (Б — бумажная, П — плёночная) определяет материал основы; далее следует величина базы и номинальное сопротивление. Последняя буква (Х или Г) определяет температуру основы (Х — не более 30 °С, Г — не более +180 °С).

Коэффициент тензочувствительности G , всех указанных в таблице 2 тензорезисторов, равен $2 \pm 0,2$. Все тензорезисторы рассчитаны на рабочий ток 30 мА и максимальную относительную деформацию не более 0,3 %.

Зигзагообразная конфигурация проволоки в тензорезисторе приводит к появлению тензорезистивного эффекта при поперечной деформации. Поперечная чувствительность у проволочных тензорезисторов примерно в 50 раз хуже продольной и в практических измерениях его можно не учитывать.

Таблица.2. Параметры широко распространенных проволочных тензорезисторов

Обозначение тензорезистора	База, мм	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры в мм	
			Длина	Ширина
Бумажная основа				
2ПКБ-5-50Х	5	50	17	8
2ПКБ-5-100Г	5	100	17	8
2ПКБ-20-100Х	20	100	32	9,1

2ПКБ-30-200Г	30	200	42	9Д
2ПКБ-30-400Х	30	400	42	10
Плёночная основа				
2ПКП-5-100	5	100	17	8
2ПКП-10-100	10	100	22	10
2ПКП-15-200	15	200	27	10
2ПКП-20-100	20	100	32	9,1
2ПКП-30-400	30	400	42	10

Существуют тензорезисторы без подложки, проволока свободно размещена в пространстве и сохраняет свою форму только за счет жесткости проволоки. Такие тензорезисторы обладают высокой временной стабильностью параметров. Основным недостатком таких тензорезисторов является сложность изготовления, поэтому на практике они применяются очень редко. Особо сложную задачу представляет измерение деформации в области концентрации напряжений, в области краевых эффектов, на микродеталях. Для этих целей промышленность выпускает тензорезисторы с малой базой, например МБП. Их параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры малобазных проволочных тензорезисторов

База, мм	Номинальное сопротивление, Ом	Предел изменения сопротивления, Ом	Коэффициент тензо-чувствительности
1	63	50...125	2,8...3,2
	80		
	100		
2	100	80...200	2,6...3,0
	125		

	160		
3	125	100...250	2,4...2,8

Фольговые тензорезисторы

Одной из модификаций проволочных тензорезисторов являются фольговые тензорезисторы. Конструктивно фольговые тензорезисторы представляют собой полоски фольги прямоугольного сечения, которые приклеивают на лаковую основу. Тензорезисторы, изготовленные из фольги, называют фольговыми. Из тонкой фольги (4...12 мкм) прямоугольного размера вытравливается зигзагообразная форма, которая образует чувствительный элемент, к его краям припаиваются медные выводы. Такая конструкция имеет меньшие габариты по сравнению с проволочными тензорезисторами. Производятся тензорезисторы с базой до 0,8 мм.

Величина сопротивления тензорезистора зависит также и от расстояния между витками, которое влияет на количество витков и, следовательно, на длину тензочувствительного элемента. Кроме того, расстояние между витками влияет на допустимый ток через тензорезистор, при протекании которого тензорезистор нагревается. Чем меньше расстояние между витками, тем сильнее нагрев. Благодаря большей площади контакта чувствительного элемента фольгового тензорезистора с объектом измерения гораздо больше, чем у проволочных тензорезисторов, следовательно, тепловое сопротивление ниже и теплоотдача значительно выше. Это позволяет повысить чувствительность тензопреобразователя за счет увеличения силы тока через резистор до 0,5 А.

Еще одной особенностью фольгового тензорезистора, является возможность изготовления чувствительного элемента произвольной конфигурации (рис. 2), подгоняя необходимую конфигурацию к условиям измерения. Так, конфигурация чувствительного элемента, показанная на рис.2.а пригодна для измерения линейных деформаций. Конфигурация чувствительного элемента, показанная на рис. 2.б пригодна для контроля деформации на круглых валах. Конфигурация чувствительного элемента, показанная на рис. 2.в пригодна для наклейки на мембраны.

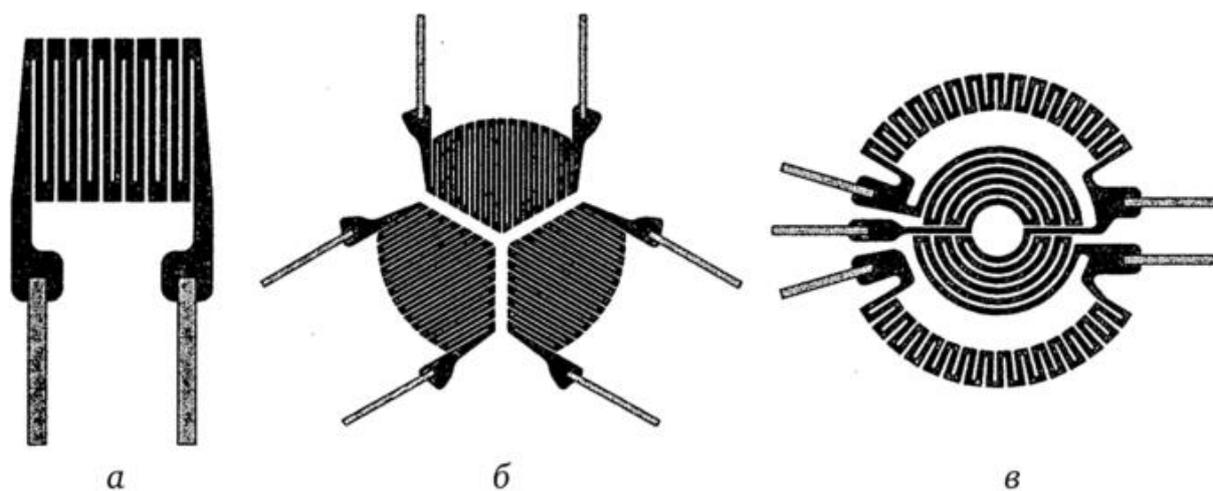


Рис. 2. Конструкция фольговых тензорезисторов, а — прямоугольные; б — розеточные; в — мембранные

Характеристики наиболее распространенных фольговых тензорезисторов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Типы некоторых фольговых тензорезисторов и их основные параметры

Обозначение	База (диаметр), мм	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм		Подтип схема решётки.
			Длина	Ширина	
Прямоугольные					
2ФКПА-1-50Г	1	50	7	5	(рис. 4.2 а)
2ФКПА-5-100Х	5	100	И	9,5	
2ФКПА-5-200Г	5	200	И	6	
2ФКПА-20-200Х	20	200	30	15	

2ФКПД-5-50Г	5	50	30	24	
2ФКПД-5-100Х	5	100	30	37	
Розеточные					
2ФКРВ-5-50Х (Г)	5	50	16	16	(рис. 4.2 б)
2ФКРГ-5-50Х (Г)	5	50	21	21	
2ФКРГ-5-100Х (Г)	5	100	30	30	
Мембранные					
2ФКМВ-10-100Х (Г)	10	100	12	12	(рис. 4.2 в)
2ФКМВ-20-100Х (Г)	20	100	24	24	
2ФКМВ-30-200Х (Г)	30	200	34	34	
2ФКМГ-20-50Х (Г)	20	50	24	24	
2ФКМГ-30-100Х(Г)	30	100	34	34	
2ФКМГ-20-200Х(Г)	30	200	34	34	

Система обозначения фольгового тензорезистора включает 4 буквы. Первая буква обозначает конструкцию тензорешётки (Ф – фольговая). Вторая буква обозначает материал чувствительного элемента (К – константан). Третья буква обозначает тип решётки (П – прямоугольная, Р – розеточная, М – мембранная). Четвертая буква обозначает конструктивные особенности (подтип). Первое число после четвертой буквы обозначает базу. Второе число обозначает сопротивление в недеформированном состоянии. Последняя буква обозначает температуру наклейки (Х – не более 30 °С, Г – не более 180 °С).

Чувствительность фольговых тензорезисторов совпадает с тензочувствительностью проволочных ($G = 2,1 \pm 0,25$). Максимальная измеряемая деформация составляет 0,3 %. Диапазон рабочих температур составляет от -40 °С до +70 °С. Измерительный ток для разных типов варьируется в пределах 15...80 мА и указывается в паспорте на тензорезистор.

Сопротивление рассмотренных выше тензорезисторов зависит от температуры, поэтому для работы в широком диапазоне температур они не подходят. Для этих целей были разработаны термокомпенсированные фольговые преобразователи типа ФКТК. Конструктивно они похожи на тензорезисторы 2ФКПА, Однако их чувствительный элемент имеет примерно такой же ТКС (температурный коэффициент сопротивления), что и материал, для которого он компенсирован. Основные характеристики термокомпенсированных тензорезисторов приведены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры термокомпенсированных фольговых тензорезисторов

Тип	База, мм	Номинальное сопротивление, Ом	Размеры, мм		Примечание
			Длина	Ширина	
1ФКТК-5-100	5	100	14	8	Основа — плёнка БФ-2; проклейка, требуется термообработка согласно инструкции
1ФКТК-5-200	5	200	14	13	
1 ФКТК-10-100	10	100	19	6	

1ФКТК-10-200	10	200	19	8	
1 ФКТК-10-400	10	400	19	13	
1 ФКТК-15-100	15	100	24	5	
1 ФКТК-15-200	15	200	24	6,5	
1 ФКТК-15-400	15	400	24	10	
2ФКТК-5-100	5	100	14	8	Основа — бумага, пропитанная клеем БФ-2; при наклейке термообработка не требуется
2ФКТК-10-100	10	100	19	6	
2ФКТК-10-200	10	200	19	8	
2ФКТК-10-400	10	400	19	13	
2ФКТК-15-100	15	100	24	5	
2ФКТК-15-200	15	200	24	6,5	
2ФКТК-15-400	15	400	24	10	
3ФКТК-5-100	5	100	14	8	Основа — бумага, пропитанная клеем ВК-32- 2. Компоненты клея прилагаются к образцам
3ФКТК-5-200	5	200	14	13	

3ФКТК-10-100	10	100	19	6	
3ФКТК-10-200	10	200	19	8	
3ФКТК-10-400	10	400	19	13	
3ФКТК-15-100	15	100	24	5	
3ФКТК-15-200	15	200	24	6,5	
3ФКТК-15-400	15	400	24	10	

Обозначение термокомпенсированных тензорезисторов состоит из цифры, четырех букв, тире, цифра, тире и цифра, буква.

Первая цифра обозначает тип основы (1, 2, 3). Четыре буквы обозначают название (ФКТК). Первая буква обозначает тип (Ф-фольговый). Вторая буква обозначает материал чувствительного элемента (К – константан). Третья буква обозначает термокомпенсацию (буква Т). Четвертая буква обозначает конструктивные особенности (подтип). Первое число после букв обозначает размер базы. Второе число обозначает номинальное сопротивление. Последняя буква обозначает материал, для которого термокомпенсирован тензорезистор (С – сталь, М – медь, А – алюминий) Последняя римская цифра обозначает класс точности.

Обозначение 1ФКТК-10-200С-II означает: тензорезистор на основе плёнки из клея БФ-2 II класса, компенсированный для стали, с базой 10 мм и сопротивлением 200 Ом,

Диапазон рабочих температур тензорезисторов 1ФКТК и 2ФКТК составляет $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а 3ФКТК $+10\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; максимальная деформация не должна превышать 0,3 %; предельное отклонение сопротивления от номинала для I класса точности $\pm 5\%$, для II класса точности $\pm 10\%$, для III класса точности $\pm 15\%$.

Полупроводниковые тензорезисторы

Полупроводниковые тензорезисторы изготавливают из тонких полосок кремния р- или n-типа. Длина тензорезистора может варьироваться в диапазоне 2...12 мм, ширина — 0,15...0,5 мм, что намного меньше размеров проволочных тензорезисторов. Номинальное сопротивление может составлять 50... 10000 Ом. Коэффициент тензочувствительности может составлять 50...200, что в 50...60 раз превышает чувствительность проволочных тензорезисторов. Благодаря большому значению коэффициента тензочувствительности они позволяют получить высокий уровень сигнала на выходе измерительной схемы. Соответственно не нужны прецизионные схемы усилителей. Очень важным достоинством полупроводниковых тензорезисторов является возможность изготовления с разными значениями номинального сопротивления (100 Ом ... 50 кОм) и коэффициента тензочувствительности (-100 ... +200). При этом размеры тензорезисторов не изменяются. Изменение параметров тензорезисторов достигается путем легирования исходного материала или изменением технологии изготовления. Однако высокий ТКС ограничивает область их использования.

Эластичные резистивные тензодатчики

Эластичные резистивные тензодатчики нашли наиболее широкое применение в медицине для медико-биологических измерений, особенно при кардиоваскулярных (сердечно-сосудистых) и респираторных размерных и плетизмо- графических (объёмных) обследованиях.

При изготовлении эластичного тензорезистора используют резиновую трубку с очень маленьким диаметром (внутренний диаметр 0,5 мм, внешний – 2 мм). Длина трубки выбирается в диапазоне 30...250 мм. Трубка заполняется веществом, способным сохранять свои свойства при деформации. Обычно это жидкие вещества или вещества, обладающие свойством текучести (ртутью, пастообразным электролитом или проводящей пастой). герметизируется. На концах трубка герметизируется и к ним прикрепляются электроды, изготовленные из амальгамированной меди, серебра или платины. При этом обеспечивается контакт электродов с веществом внутри трубки. При деформации растяжения длина трубки увеличивается, диаметр уменьшается, что приводит к

увеличению сопротивления. Относительное изменение сопротивления можно вычислить по формуле:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{2\Delta L}{L_0} + \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)^2 \quad 4.4$$

где R_0 — сопротивление в недеформированном состоянии, ΔR — абсолютное изменение сопротивления в деформированном состоянии, L_0 — длина трубки в недеформированном состоянии, ΔL — абсолютное изменение длины трубки в деформированном состоянии.

В зависимости от используемого резистивного вещества внутри трубки, удельное сопротивление может быть в диапазоне 2 ... 200 мОм/мм. По сравнению с другими типами тензорезисторов, эластичные тензорезисторы, могут работать при существенно больших деформациях.

Зависимость сопротивления от величины деформации является нелинейной. Причем величина нелинейности увеличивается с увеличением деформации. При малых деформациях (<10%) нелинейность составляет менее 1%. При средних деформациях (10 % ... 30 %) нелинейность возрастает до 4%. При максимальной деформации нелинейность характеристики может возрасти до 30%. При малых деформациях (<10%) нелинейность связана с ненапрянутостью трубки. Резиновым изделиям присуща временная текучесть, что приводит к изменению размеров резиновой трубки и, соответственно, к изменению удельного сопротивления эластичного тензорезистора с течением времени. Регулярная калибровка позволяет нивелировать этот недостаток. Кроме того, для измерения величины изменения деформации этот недостаток компенсируется.

Среди недостатков эластичных тензорезисторов следует отметить необходимость контроля временного дрейфа сопротивления, большой температурный коэффициент сопротивления, ненадежность контактного соединения проводящего вещества с контактами, возможность разрыва столба проводящего вещества внутри трубки и т.д.. Кроме того, возникают трудности с точной калибровкой из-за сложности связей между массой и упругостью, напряжением и деформацией в комплексе ткань-тензодатчик. Также следует отметить невозможность получения тензорезисторов с большим удельным сопротивлением, а при малых удельных сопротивлениях возрастает ток потребления.

Измерительные цепи тензорезисторов

Для измерения изменения сопротивления тензорезистора широко используются мостовые схемы. Напряжение питания моста определяется рабочим током тензорезистора и сопротивлениями мостовой схемы. Как

правило, рабочий ток может находиться в диапазоне 5..20 мА, напряжение питания 2...12 В. Выходное напряжение моста с проволочным тензорезистором может находиться в диапазоне 10...50 мВ при изменении деформации до 1%. У полупроводниковых тензорезисторов этот показатель на порядок выше. При питании импульсным током измерительный сигнал не должен превышать частоты 200 Гц.

Измерительная цепь тензорезистора должна удовлетворять требованиям маленького температурного дрейфа и высокой чувствительности. Наиболее просто это осуществить в дифференциальной схеме, что позволяет на порядок уменьшить температурный дрейф. Наибольшая температурная компенсация достигается использованием четырех тензорезисторов в мостовой схеме. На рис.3 приведена схема измерительной цепи, состоящей из четырех тензорезисторов. Измерительный мост состоит из четырех тензорезисторов, включенных попарно в дифференциальную схему. Для питания измерительного моста используется источник питания $U_{п}$. Выходной сигнал с горизонтальной диагонали моста поступает на инструментальный усилитель, реализованный на микросхемах ДА1...ДА2. С выхода инструментального усилителя сигнал поступает на дифференциальный усилитель на микросхеме ДА3 и после усиления на АЦП. В качестве источника питания можно использовать источник напряжения, так как для проволочных и фольговых тензорезисторов относительные изменения сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$ не превышают 2 %, следовательно, ток, протекающий через мостовую схему, не будет зависеть от их изменения, а нелинейности, вносимые мостовой схемой, относительно малы.

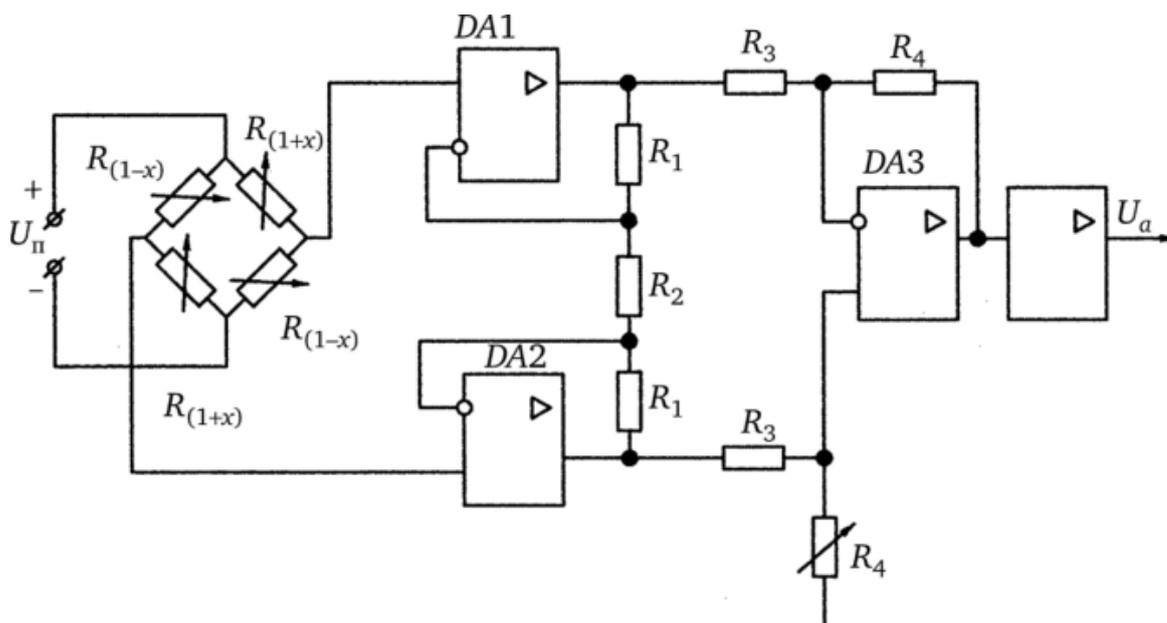


Рис. 3. Измерительная цепь тензодатчиков

Коэффициент передачи схемы равен произведению коэффициентов передачи измерительного и дифференциального усилителей и рассчитывается по формуле:

$$K_y = K_{\text{бу}} \times K_{\text{ду}} = \frac{2R_1 + R_2}{R_2} \times \frac{R_4}{R_3}$$

При напряжении питания $U_{\Pi} = 5 \text{ В}$, коэффициенте передачи 1000 и величине деформации $\Delta\chi = 0,1\%$ выходной сигнал будет равен:

$$U_{\text{вых}} = \Delta\chi \cdot U_{\Pi} K_y = 0,001 \cdot 5 \cdot 1000 = 5 \text{ В} \cdot$$

Тензодатчики — устройства с низким входным сопротивлением 120...350 Ом. Это означает, что напряжения в проводах, соединяющих источник питания с мостом, могут приводить к существенному изменению питающего напряжения. Поскольку выходное напряжение моста зависит от напряжения питания, то его изменение будет приводить к небольшой погрешности выходного результата. Для уменьшения этой погрешности выходной ток измерительного моста с тензодатчиками уравнивается током от внешнего источника питания. Пример такой цепи показан на рисунке 4.

Питание измерительного моста с тензодатчиками R_1, R_2, R_3, R_4 осуществляется от источника тока (ИТ). Напряжение внешнего источника питания U_0 подается в обратную связь операционного усилителя DA1, который охвачен параллельной отрицательной обратной связью. Выходной ток DA1

уравновешивает мост за счёт подачи тока $I_{\text{ВЫХ}}$ в узел «а» измерительной диагонали моста. Усилитель DA2 поддерживает потенциал узла «b» близким к нулю. Такая схема обеспечивает возможность подключить измерительный мост к источнику питания не подключенному к нулю. В этом случае выходное напряжение преобразователя будет равным:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ}} \cdot R_5,$$

где

$$I_{\text{ВЫХ}} = 2I_0 G \varepsilon_L (1 + G \varepsilon_L)$$

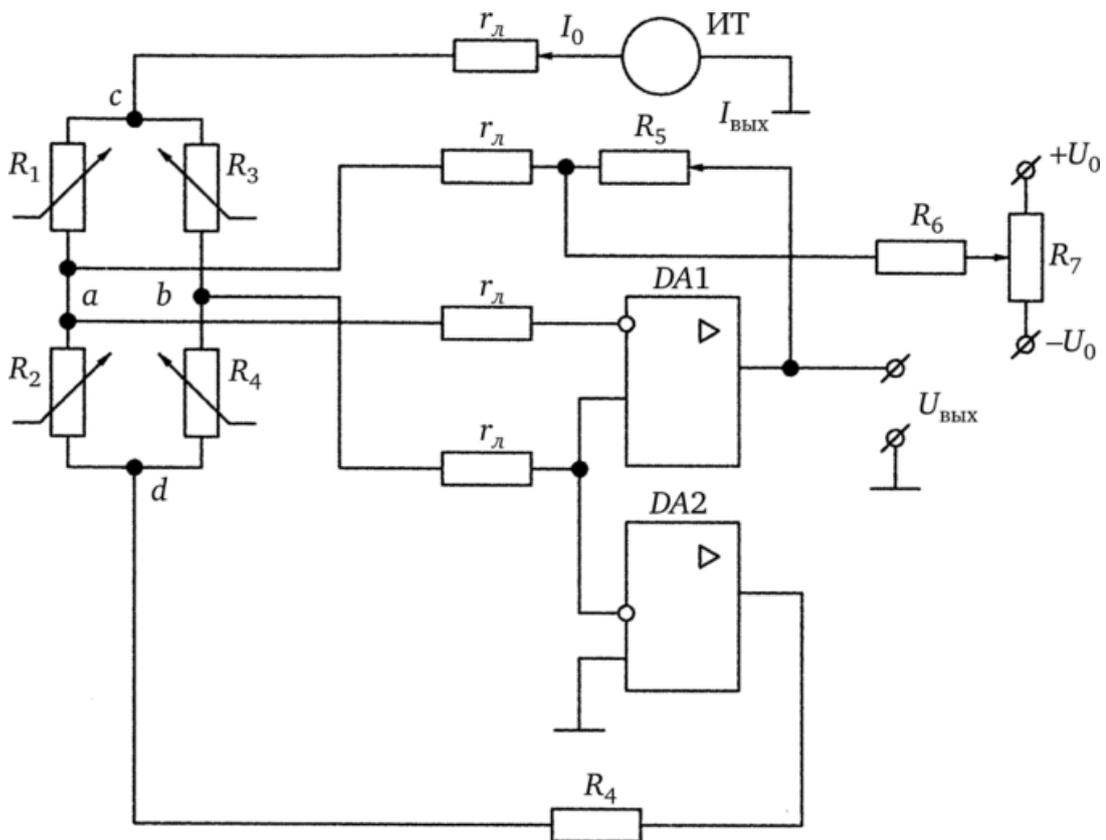


Рис. 4. Схема квазиуравновешенного моста с тензорезисторами

Переменный резистор R_7 , предназначен для установки начального уровня выходного напряжения измерительного моста. Такое схемное решение существенно уменьшает влияние соединительных линий моста с датчиком на результат измерения. Небольшое влияние оказывает сопротивление цепи, в которой протекает выходной ток операционного усилителя. С учетом того, что $r_{\text{л}} \ll R_5$ это влияние очень мало.

Самокомпенсация температуры

Тензорезисторы имеют температурную зависимость сопротивления, которая описывается формулой:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_f \varepsilon + a \Delta T$$

где: $\frac{\Delta R}{R}$ — относительное изменение температуры, a — температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} ; ΔT — изменение температуры, К.

Изменения температуры во время испытания практически неизбежны. Несоответствие коэффициентов теплового расширения между калибровочной проволокой, подложкой и образцом вызывает так называемую кажущуюся деформацию, которая вносит ошибки в измерения деформации.

Несмотря на то, что влияние температуры можно учесть либо путем оценки как части данных, либо с помощью фиктивного манометра в мостовой схеме Уитстона, более желательно иметь манометр, который может сам о себе позаботиться, особенно когда температурный градиент и/или отклонения велики, или мостовая схема недоступна.

Существует два типа датчиков с автоматической температурной компенсацией: датчик с выбранным расплавом и двухэлементный датчик.

Калибр с выбранным расплавом основан на надлежащей обработке сплавов, в частности, путем холодной обработки давлением, так что калибровочная проволока имеет очень низкую термическую деформацию (кажущуюся деформацию) в широком диапазоне температур. Константан и сплав Карма являются двумя наиболее распространенными материалами калибровочной проволоки, обладающими свойством самокомпенсации.

Используемое оборудование:

Специальный стенд с возможностью подключения различных тензодатчиков. Лабораторный стенд с микроконтроллером ARDUINO работает в программной среде Arduino IDE. Работа в этой среде обычно включает в себя следующие шаги:

1. Подключите Arduino-плату к компьютеру через USB-порт.
2. Для создания нового проекта откройте Arduino IDE. Для этого на рабочем столе ПК найдите пиктограмму, показанную на ри.5.

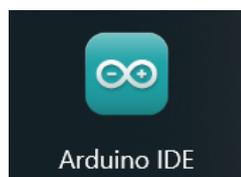


Рис. 5. Пиктограмма программы Arduino IDE

3. Создайте новый файл проекта, выбрав пункт «File» -> «New» в верхнем меню (рис.6).

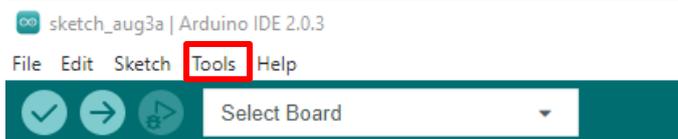


Рис.6. Вкладка «File» программы Arduino IDE

4. Откроется окно с основной структурой вашей программы (рис.7).

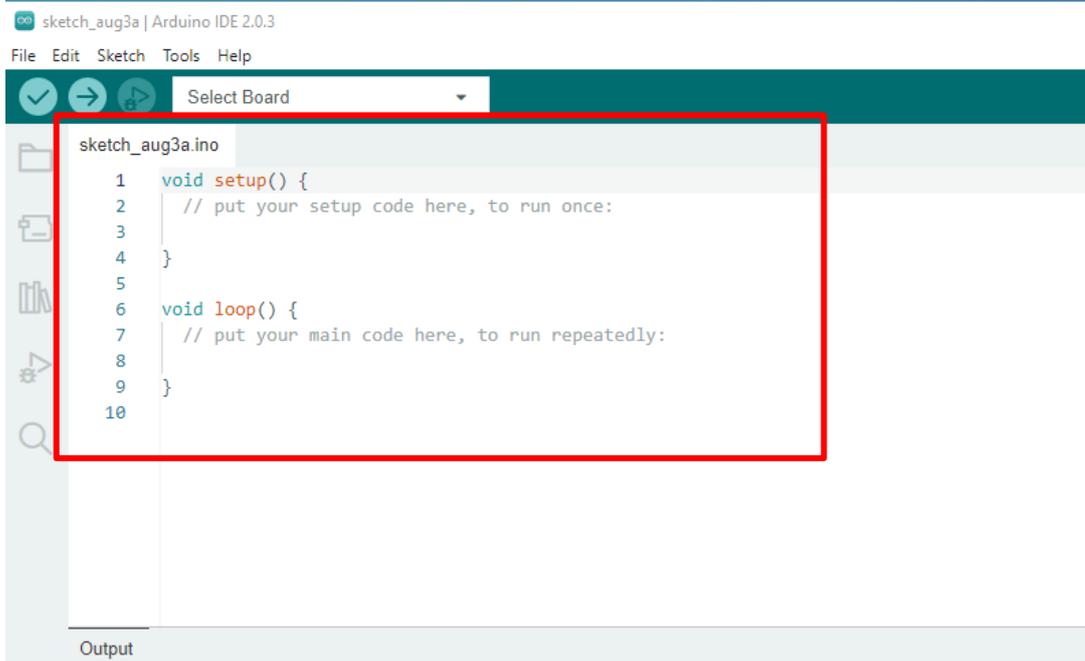


Рис. 7. Окно редактора Arduino IDE

5. Напишите код вашей программы в окне редактора Arduino IDE, используя вышеуказанные функции, команды и конструкции языка C/C++.

Используйте встроенные библиотеки Arduino, чтобы расширить возможности вашей программы. Интересующие библиотеки можно найти в разделе «Library Manager» в Arduino IDE (пункт «Sketch» -> «Include Library» или на панели слева (рис.8)).

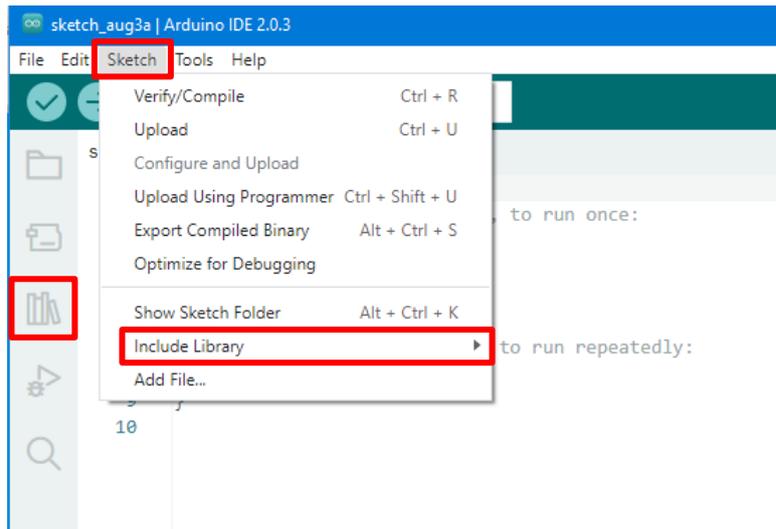


Рис.8. Вкладка «Sketch» для выбора встроенных библиотек Arduino

6. Проверьте синтаксис вашего кода, нажав кнопку «Verify» (галочка) в верхней панели Arduino IDE (рис.9).

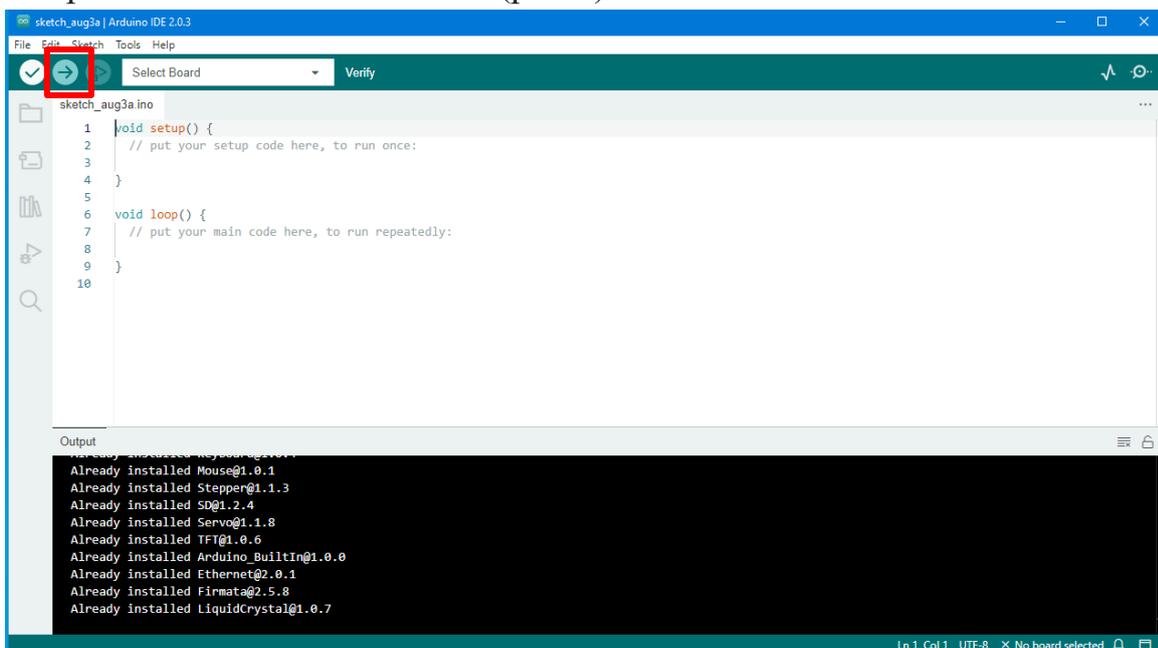


Рис.9. Кнопка «Verify» программы Arduino IDE

Если нет ошибок, ваш код будет успешно скомпилирован в машинный код, готовый для загрузки на Arduino-плату.

7. Убедитесь, что выбрана правильная плата и порт коммуникации в меню «Tools» (рис.10).

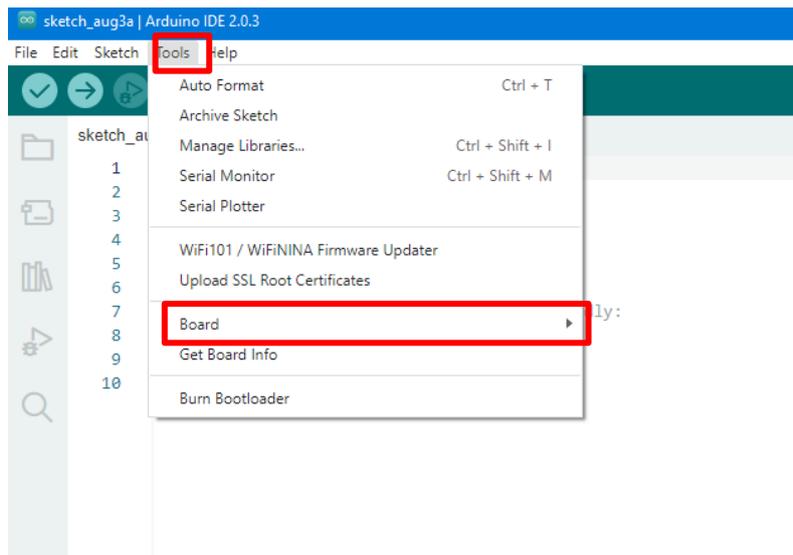


Рис.10. Вкладка «Tools» для выбора платы

8. Нажмите кнопку «Upload» (стрелка вниз) в верхней панели Arduino IDE, чтобы загрузить скомпилированный код на Arduino (рис.11).

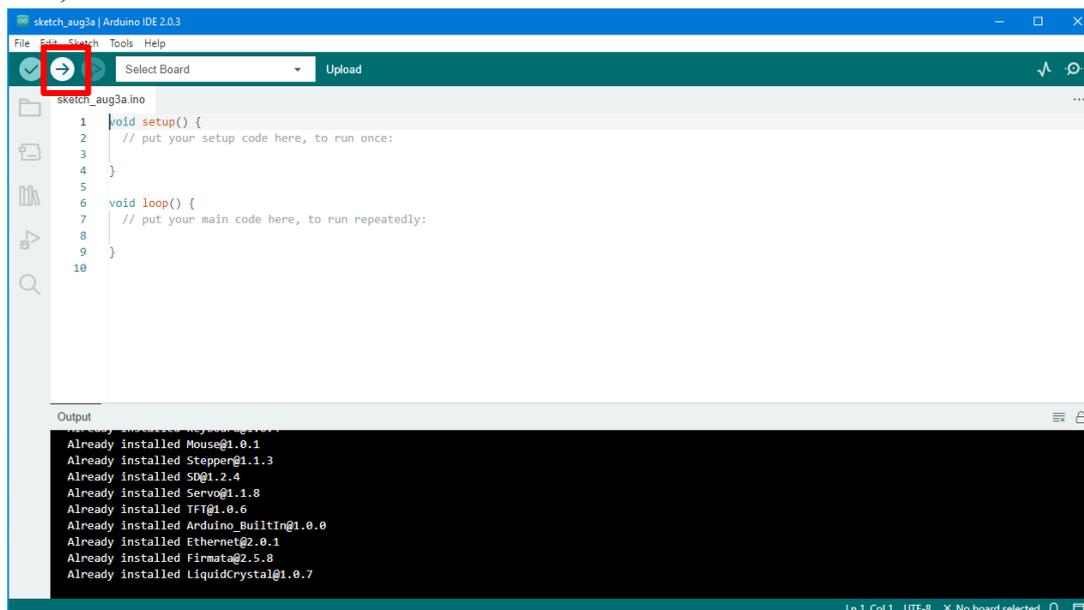


Рис.11. Кнопка «Upload» программы Arduino IDE

Плата будет перезагружена и начнет выполнять Вашу программу.

9. Откройте монитор порта, выбрав пункт «Tools» -> «Serial Monitor» в верхнем меню или плоттер по последовательному соединению, выбрав пункт «Serial Plotter» (рис.12).

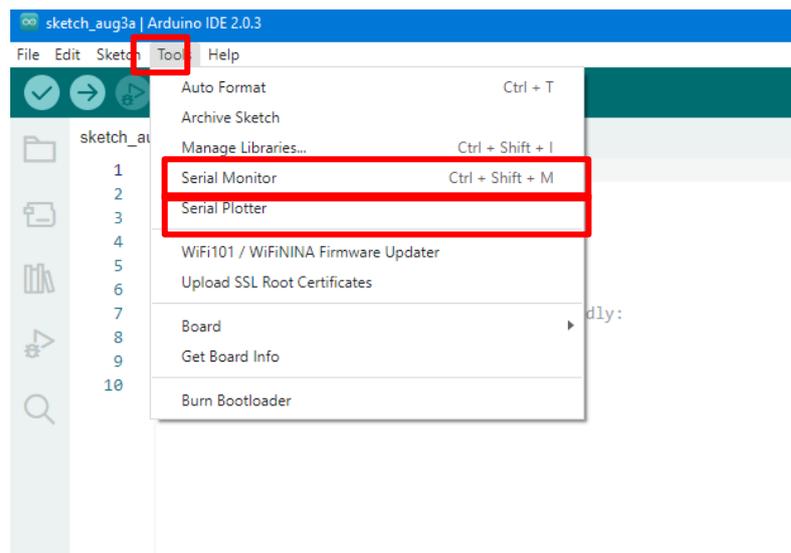


Рис.12. Вкладка «Tools» для выбора просмотра полученных данных

В мониторе порта вы сможете просматривать числовые данные, выводимые вашей программой, а в плоттере по последовательному соединению данные отображаются в графическом виде.

Для правильной работы лабораторного стенда необходимо загрузить программу работы микроконтроллера для измерения напряжения.

Описание лабораторной установки:

Лабораторная установка состоит из модуля тензодатчика (типа "мост" и типа "полу-мост") и микросхемы НХ711, которая позволит создавать устройства для измерения деформации, а затем передавать эти показания (с высокой точностью) на плату Arduino.

Характеристики микросхемы НХ711:

Разрядность АЦП: 24 бит;

Коэффициент усиления:

Вход А: 64 или 128;

Вход В: 32;

Частота измерений: 10/80 Гц;

Напряжение питания: 5В;

Потребляемый ток: до 10 мА;

Размеры: 34мм x 21мм;

Схема подключения одного датчика к микросхеме НХ711 приведена на рис.13.

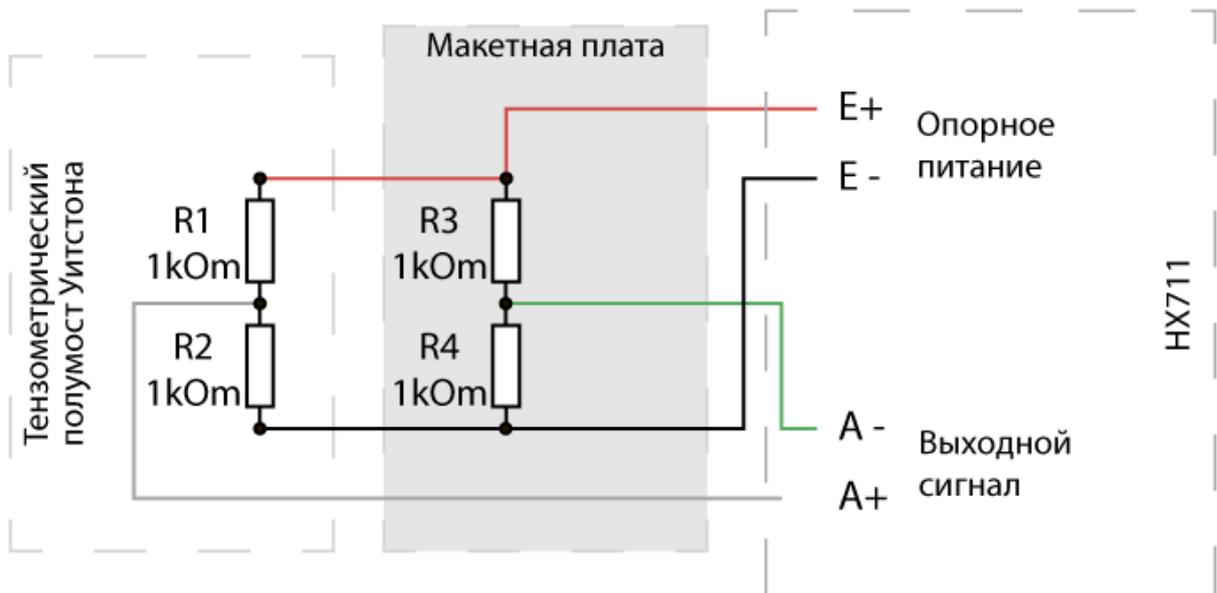


Рис.13. Схема подключения мостового датчика к микросхеме HX711

Схема подключения четырех датчиков к микросхеме HX711 приведена на рис.14.

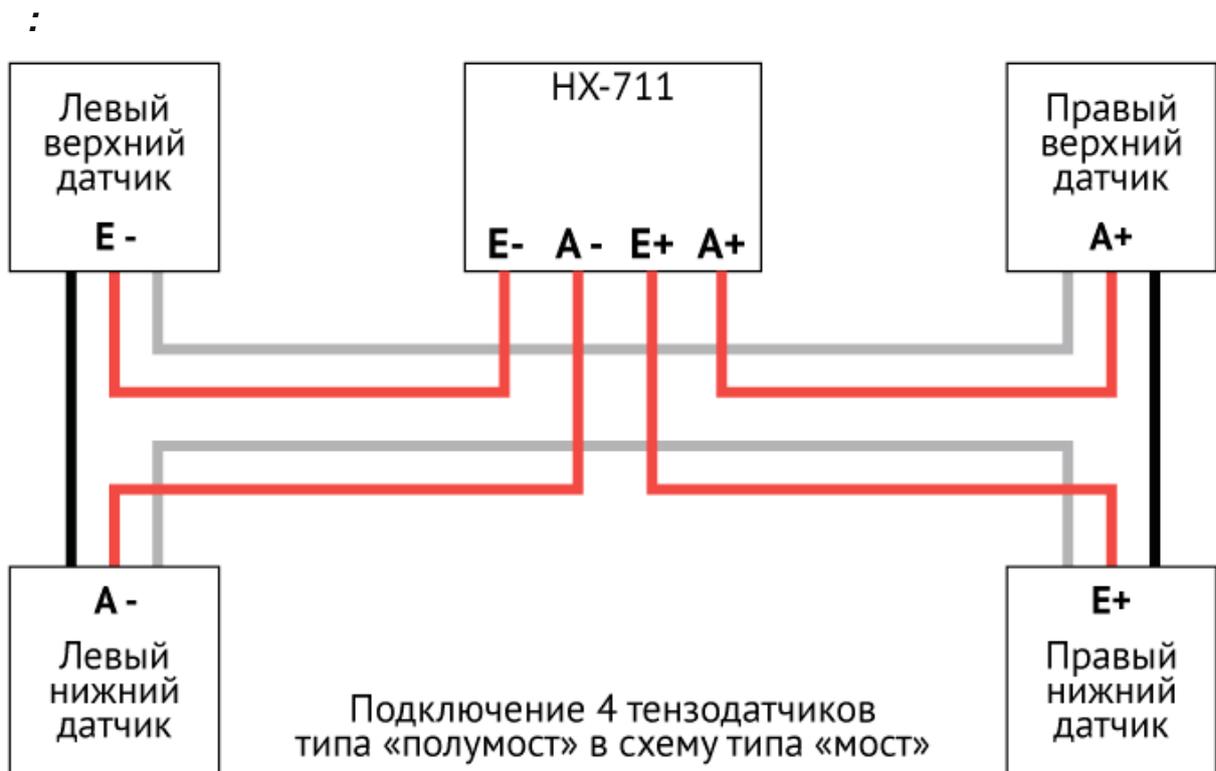


Рис.14. Схема подключения четырех датчиков к микросхеме HX711

Обратите внимание на то, что если полученные значения имеют отрицательный знак, то вам следует поменять местами датчики, подключенные к выводам А+ и А -

Подключение:

На плате есть два разъёма – Р1 и Р2, на которых имеются следующие обозначения:

Разъём Р1: GND - земля; VCC - питание 5В; DT, SCK – информационные выводы;

Разъём Р2: Е– , Е+ - питание тензорного моста; А– , А+ - подключение канала А; В– , В+ - подключение канала В;

Мостовая схема:

У данного тензодатчика 4 выходных провода:

Провода тензодатчика	Выводы микросхемы НХ711
Красный провод	Е+
Чёрный провод	Е-
Зелёный провод	А-
Белый провод	А+

Полумостовая схема:

У данного тензодатчика 3 выходных провода:

Провода тензодатчика	Выводы микросхемы НХ711
Красный провод	Е+
Чёрный провод	Е-
Белый провод	А+

В схему необходимо добавить делитель напряжения и выход подключить к плате НХ711 (рисунок выше!):

Провода тензодатчика	Выводы микросхемы НХ711
Зелёный провод	А-

НХ711

Данная плата подключается к Arduino по 4 проводам:

Выводы микросхемы НХ711	Выводы Arduino

GND	GND
VCC	5V
DT	любой цифровой вывод (указывается в скетче)
SCK	любой цифровой вывод (указывается в скетче)

Подключение HX711 к Arduino можно осуществить одним из 2 способов (рис.13 и рис.14)/ Первый вариант схемы подключения HX711 к плате Arduino приведен на рис.15.

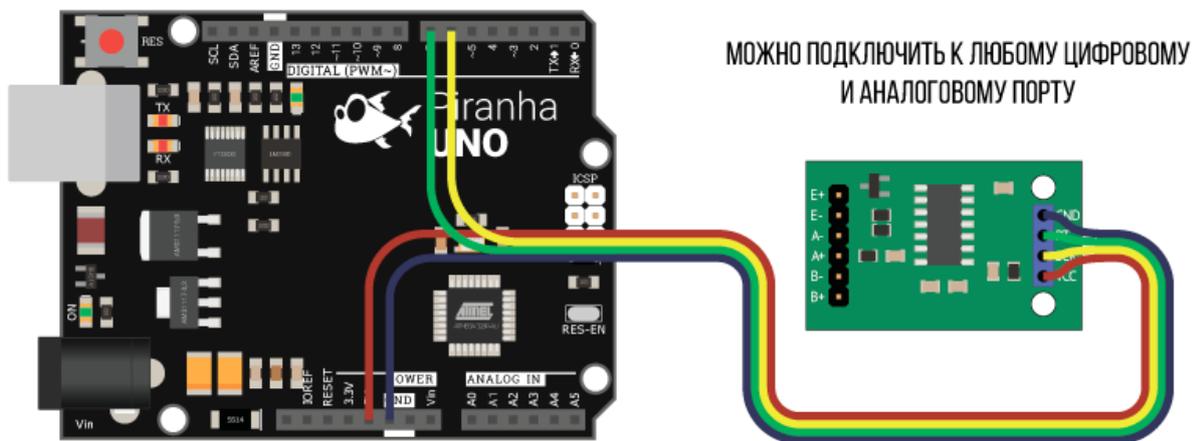


Рис.15. Первый вариант схемы подключения HX711 к плате Arduino

Второй вариант схемы подключения HX711 к плате Arduino приведен на рис.16.

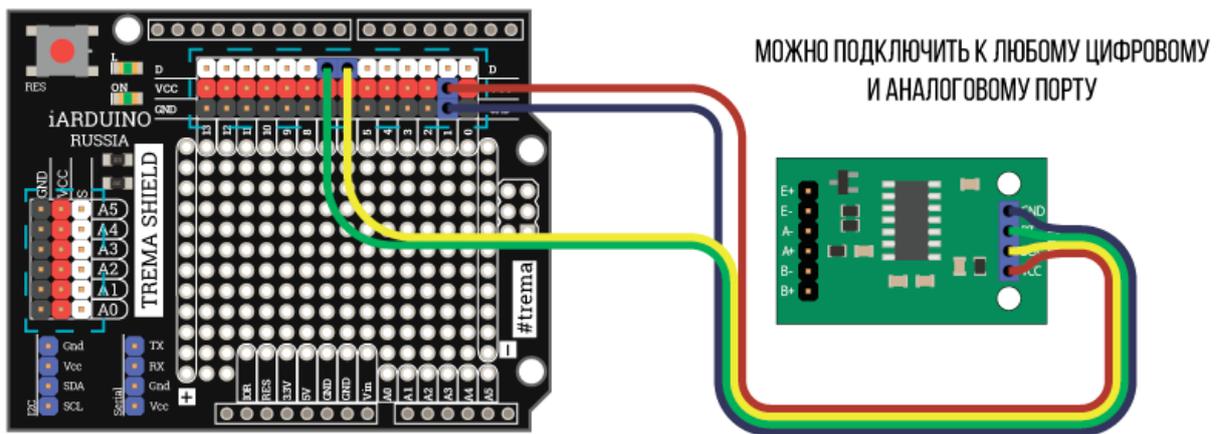


Рис.16 Второй вариант схемы подключения HX711 к плате Arduino

Входное напряжение 5В, подаётся на выводы Vcc (V) и GND (G).

Предварительное задание:

1. Изучить разделы курса и краткие теоретические сведения.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Ознакомиться с рабочим заданием, методическими указаниями к работе.
4. Подготовить бланк отчёта.

Программа работы:

1. Получить у преподавателя допуск к работе.
2. Подключить датчик к микроконтроллеру АРДУИНО.
3. Подать напряжение питания равное 5В (рис.7).
4. Запустить программу в среде отладки.
5. Установить тензодатчик поочередно на 10 шаблонов и закрепить датчик резинкой. Снять показания.
6. Повторит п.5 три раза и найти среднее значение для каждого шаблона.
7. На основе полученных данных построить график зависимости сопротивления от деформации.
8. Оформить отчёт по проделанной работе.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание лабораторной установки.
3. Программа работы.
4. Заполнить Таблицу экспериментальных данных и построить зависимость сопротивления от величины деформации $R(d)$.
5. Сделать выводы.
6. Привести ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются проволочные и фольговые тензорезисторы?
2. Чем отличаются проволочные и полупроводниковые тензорезисторы?
3. Почему изменяется удельное сопротивление при деформации?.

4. Что такое база тензорезистора?
5. Какова роль базы в процессе измерения?
6. Чем обусловлено временное изменение сопротивления эластичного тензорезистора?
7. В каких случаях используют эластичные тензорезисторы?
8. Нарисуйте схемы включения тензорезистора в измерительную цепь.
9. Какие недостатки присущи эластичным тензорезисторам?
10. Как осуществляется температурная компенсация тензорезисторов?

Источники информации:

1. [Словарь по естественным наукам. Глоссарий.ру — «Тензорезистор»](#) (недоступная ссылка) (недоступная ссылка с 14-06-2016 [2591 день])
2. [↑ Тензорезистивный эффект - Физическая энциклопедия](#). Дата обращения: 10 мая 2018. [Архивировано](#) 11 мая 2018 года.
3. [↑ Strain Gage: Sensitivity](#). Дата обращения: 5 ноября 2014. [Архивировано](#) 27 сентября 2011 года.