

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« _____ » _____ 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Система тензометрических измерений для металлоконструкции перегрузочного оборудования стартового комплекса на примере физической модели

Исполнитель
студент группы 1109-об1



(подпись, дата)

М.А. Иванчин

Руководитель
доцент, канд. техн. наук



(подпись, дата)

В.В. Соловьёв

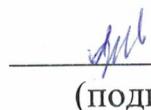
Консультант
доцент, канд. техн. наук



(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
старший преподаватель СИТРК



(подпись, дата)

М.А. Аревкин

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой



В.В. Соловьёв

« _____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Иванчина Максима Андреевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Система тензометрических измерений для металлоконструкции перегрузочного оборудования стартового комплекса на примере физической модели.

(утверждена приказом от 03.04.2025 № 878-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта): 06.06.2025

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: отчеты по практике, ГОСТы, справочная литература.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: общие сведения о тензометрических датчиках, клеи для установки тензорезисторов, схемы включения тензорезисторов в измерительный мост, расчет момента инерции теоретическим и практическим путем, проектирование измерительного устройства, проведения исследования на модуле подъёмного механизма СГУ-АТРГ-ГПИМ, графики зависимости напряжения и деформации от положения стрелы, безопасность экологического производства, экономическая часть.

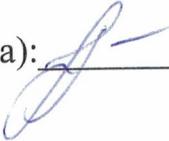
5. Перечень материалов приложения: титульный лист, выбор тензорезистора по техническим характеристикам, тензорезистор BF350-1AA, код для программы Arduino, чертёж модуля подъёмного механизма СГУ-АТРГ-ГПИМ,

сборка измерительной схемы, исследование напряжения при разных положениях стрелы с помощью тензорезисторов, заключение.

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев В.В., доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (дата):  _____

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 64 страницы, 29 рисунков, 12 таблиц, 12 источников, 1 приложение

МЕТОДЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ, МЕТОДЫ СНЯТИЯ ПОКАЗАНИЙ, МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ, ТЕНЗОРЕЗИСТОР, ТАРИРОВКА, МАТЕРИАЛЫ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе представлены результаты исследования деформации на установке модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ с помощью тензорезисторов ВР350-1АА.

Цель работы – Определение деформации в металлоконструкции физической модели крана с использованием тензометрии.

Задачи:

- Провести анализ информации о тензометрических датчиках и осуществить подбор оптимального по характеристикам датчика;
- Провести разработку измерительного устройства на основе выбранного датчика;
- Провести испытания измерительного устройства по определению напряжений в металлоконструкции.

В основной части описаны тензометрические датчики, способы установки, снятия показаний и результаты исследований. В разделе безопасность жизнедеятельности рассмотрены требования к проведению исследования, техника безопасности. В экономической части были рассчитаны затраты на сборку мостовой схемы и заработную плату рабочего.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Анализ существующих тензометрических датчиков	9
1.1 Основные понятия	9
1.2 Типы тензометрических датчиков. Принцип работы	11
1.3 Методы компенсации технических ошибок тензометрических датчиков	14
1.3.1 Влияние температуры	14
1.3.2 Механические измерения	15
1.4 Клеи для установок тензорезисторов	15
1.5 Методы подключения и снятия показаний тензометрических датчиков	17
1.6 Схемы включения тензорезисторов в измерительный мост	21
1.6.1 Мост Уитстона	21
1.7 Деформирование тензорезистора	24
2 Практическая часть	26
2.1 Расчет момента инерции теоретическим путем	26
2.1.1 Измерение деформаций с помощью тензорезисторов	27
2.1.2 Расчет допустимого значения установки	28
2.1.3 Теоретический расчет деформаций с помощью тензорезисторов	29
2.1.4 Расчет напряжения при различных углах подъема стрелы	31
2.2 Описание экспериментальной установки	33
2.2.1 Составление технических требований по определению деформации в объекте исследования	34
2.3 Выбор тензорезистора по техническим характеристикам	35
2.3.1 Тензорезистор BF350-1AA и его характеристики	36
2.3.2 Сравнение тензорезисторов	37

2.3.3 Клей для монтажа выбранного тензорезистора	38
2.4 Проектирование измерительного устройства	39
2.5 Проведение натуральных испытаний измерительного устройства	41
3 Ход исследования	44
3.1 Подготовка к тарировке	44
3.1.1 Тарировка тензорезистора	45
3.2 Методика проведения эксперимента	46
3.3 Подготовка исследуемого объекта и оборудования	47
3.3.1 Объяснение установки тензорезистора в данной точке	48
3.4 Проведение исследования	49
4 Безопасность экологического производства	55
4.1 Меры электробезопасности инженера исследователя на рабочем месте	55
4.2 Расчет устройства защитного отключения	56
5 Экономическая часть	59
5.1 Покупные комплектующие материалы	59
5.2 Транспортно-заготовительные расходы	60
5.3 Основная заработная плата	60
5.4 Страховые взносы	61
Заключение	62
Библиографический список	63
Приложение А	65

ВВЕДЕНИЕ

На стартовых комплексах используется различное сложное оборудование, в том числе и перегрузочного оборудование. Перегрузочное оборудование на стартовом комплексе предназначено для монтажа ракеты-носителя, космического аппарата, разгонного блока и сборочно-защитного блока, а также для их стыковки и испытаний.

Обеспечение безопасности и надежности работы перегрузочного оборудования является одной из важнейших задач в различных отраслях промышленности, в том числе и на стартовых комплексах. В современных условиях данная задача становится особенно актуальной в связи с ростом требований к производительности, грузоподъемности и точности работы кранов.

Одним из ключевых элементов перегрузочного оборудования является модуль подъемного механизма, который подвергается значительным механическим нагрузкам в процессе работы. Напряженно-деформированное состояние (НДС) перегрузочного оборудования напрямую влияет на его работоспособность и ресурс. Контроль НДС позволяет своевременно выявить дефекты и разрушения металлоконструкций, тем самым предотвращая аварийные ситуации, которые могут привести к травмам людей, повреждению оборудования и материальному ущербу.

В связи с этим актуальным становится определение деформации в металлоконструкции с помощью тензометрии, которые позволяют осуществлять непрерывный контроль НДС модуля подъемного механизма в реальном времени.

Метод тензометрии – это способ определения напряжённого состояния какой-либо металлоконструкции при возникновении деформаций с помощью тензодатчиков. Методика измерений позволяет выявить слабые места конструкции, а также исследовать динамику изменения этих параметров во времени. Полученные результаты помогают выбрать наиболее рациональные конструктивные варианты технических решений и определить запас прочности.

Объектом исследования выступает физическая модель подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ, оснащенная тремя тензорезисторами, закрепленными в зонах максимальных напряжений.

Цель работы – определение деформации в металлоконструкции физической модели крана с использованием тензометрии.

Для осуществления поставленной цели потребуются решения следующих задач:

- Провести теоретические расчеты напряжения при разных углах подъёма стрелы модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ;
- Собрать мостовую схему;
- Провести практическое исследование напряжения при разных углах подъёма стрелы модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ;
- Сравнить полученные результаты, построить графики зависимости напряжения от угла подъёма;
- Рассчитать экономические затраты на зарплату рабочего.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

1.1 Основные понятия

Тензометрический датчик – это устройство, используемое для измерения силы или напряжения в объекте, на который он устанавливается. В соответствии с п.2.1.2 ГОСТ 8.631-2013 представляет собой весоизмерительный элемент, который реагирует на изменение величины физического воздействия (усилия) и переводит его в электрический сигнал. Фактически это резистор, меняющий параметр омического сопротивления, по отношению к прилагаемой силе. На практике широко используются для измерения массы и нагрузки в весоизмерительных системах. В зависимости от сферы применения используются различные типы тензодатчиков, отличающихся как принципом действия, так и конструктивными особенностями.

Так же к тензометрическому датчику относятся следующие понятия:

Деформация – изменение формы или размера объекта под действием приложенной силы.

Линейная зависимость – соотношение между величинами, которое можно представить в виде прямой линии на графике.

Нелинейная зависимость – отношение между величинами, которое не может быть представлено в виде прямой линии на графике.

Растяжение – действие силы, направленной вдоль объекта и приводящей к увеличению его длины.

Сжатие – действие силы, направленной вдоль объекта и приводящей к уменьшению его длины.

Коэффициент упругости – характеристика материала, определяющая его склонность к деформации под воздействием приложенных сил.

Работа упругих сил – работа, которую совершает упругое тело при деформации под действием внешней силы и возвращении к исходному состоянию при снятии силы.

Измерительным элементом тензодатчика служит тензорезистер, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации.

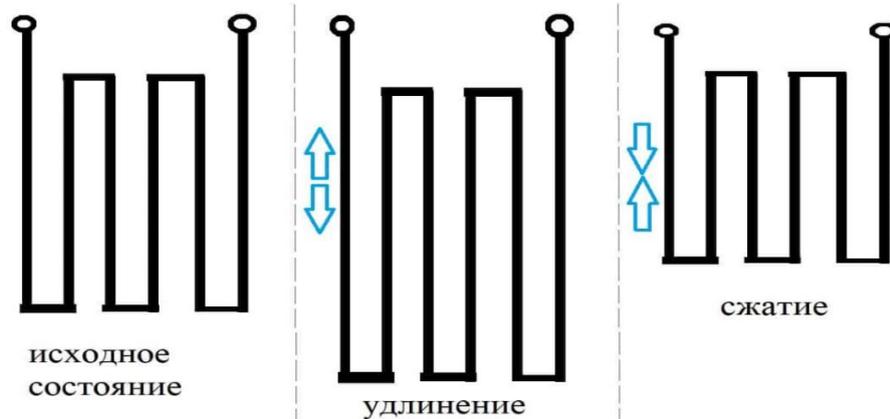


Рисунок 1 – Устройство тензорезистора

При нахождении в состоянии покоя дорожки тензорезистора имеют определенное сечение и длину проводника. Сопротивление всего резистивного элемента тензодатчика будет определяться по формуле:

$$R = \frac{\rho \times l}{S}, \quad (1)$$

где:

ρ – удельное сопротивление материала, как правило, в качестве металла с постоянным удельным сопротивлением используют константан;

l – длина проводника тензодатчика;

S – поперечное сечение проводника тензодатчика.

Таким образом, в случае удлинения тензодатчика длина проводящих дорожек увеличивается, а поперечное сечение уменьшается. Как результат, омическое сопротивление тензорезистора будет повышаться. При сжатии произойдет обратный процесс – длина проводящих элементов уменьшится, а их поперечное сечение увеличится. В результате сжатия сопротивление тензодатчика уменьшится, что и лежит в основе принципа его работы.

1.2 Типы тензометрических датчиков. Принцип работы

Так, в зависимости от формы грузоприемного основания выделяют:

а) Консольные (балочные) – устанавливаются в некоторых типах весов, при взвешивании контейнеров и т.д.

Тензодатчики балочного типа - в качестве упругого элемента имеют балку равного сечения. Способ применения заключается в том, что один край крепится жестко, а на противоположный край прикладывается усилие. Датчики балочного типа отличаются улучшенной линейностью и повторяемостью, обладают свойством нечувствительности к смещению линии действия силы.

Принцип работы: основан на преобразовании механической деформации сдвига или изгиба в пропорциональный электрический сигнал.

Наибольшее распространение получили датчики силы балочного типа, показанного на рисунке 2.



Рисунок 2 – Тензодатчики балочного типа с металлическим сильфоном Т2

б) S-образные тензодатчики

Применяются для измерения поднимаемых грузов.

Тензодатчики S-образные обладают высокой точностью измерения. В S-образном корпусе в герметичной камере размещен упругий элемент с наклеенными тензорезисторами.

Усилие, приложенное к датчику, вызывает упругую деформацию контрольного элемента, расположенного в корпусе.

Датчик позволяет измерить деформацию упругого элемента, на котором закреплены тензорезисторы, и преобразовать полученную величину в значение силы.

При деформации тензорезисторов, включенных по мостовой схеме, изменяется электрическое сопротивление, что вызывает разбаланс мостовой схемы и появление электрического сигнала в диагонали моста. Изменение сигнала пропорционально нагрузке.



Рисунок 3 – Тензодатчик S-образный

в) Мембранные датчики

Используются в системах контроля, высокоточных измерителях.

Тензодатчик мембранного типа работает по принципу преобразования механической деформации твердого тела, полученной в следствии механического напряжения, в электрический сигнал.

Используется в производстве различных типов весов: бункерных, автомобильных, вагонных, а также в некоторых иных весодозирующих системах, в которых обычные датчики не способны монтироваться из-за своего чрезмерно габаритного размера.



Рисунок 4 – Тензодатчик мембранного типа

г) Колонные датчики – монтируются в оборудовании с большой массой.

Тензодатчики колонного типа являются устройствами, которые измеряют силу или вес, действующие на них в вертикальном направлении. Принцип работы таких тензодатчиков основан на использовании деформации колонки, которая происходит под действием силы.



Рисунок 5 – Тензодатчики колонного типа

д) Тензодатчики типа «Single point»

Датчик представляет собой балку, которая одним концом неподвижно фиксируется, а на другой конец прикладывается сила. Особенность датчика заключается в его специальном внутреннем устройстве, что позволяет датчику не реагировать на изгибающий момент. По конструкции и виду установки напоминают балочные датчики, но различаются тем, что обычно применяются по одному и закрепляются в центре взвешиваемого груза.

Принцип действия: основан на преобразовании деформации изгиба в пропорциональный электрический сигнал.

Тензодатчики, изображенные на рисунке 6 могут работать в отапливаемых и не отапливаемых помещениях.



Рисунок 6 – Тензодатчики типа «Single point» T24A

Принцип работы:

Принцип работы тензометрических датчиков основан на эффекте пьезоэлектричества, который заключается в возникновении электрического заряда в некоторых материалах при механическом напряжении. Таким образом, когда тензорезистор подвергается механическому напряжению или деформации, он генерирует электрический сигнал, который может быть измерен и использован для определения величины напряжения или деформации.

Одним из ключевых параметров тензометрических датчиков является их чувствительность, которая определяет, насколько точно датчик может измерять механическое напряжение или деформацию. Чувствительность тензометрического датчика зависит от свойств материала тензорезистора, его геометрии и конструкции датчика. Более высокая чувствительность позволяет более точно измерять малые изменения напряжения или деформации.

1.3 Методы компенсации технических ошибок тензометрических датчиков

Тензометрические датчики широко используются для измерения различных величин, таких как давление, сила, деформация и ускорение. Но, как и любой инструмент, они подвержены погрешностям, которые могут влиять на точность измерения.

1.3.1 Влияние температуры.

Для компенсации температурного влияния применяется метод использования датчиков температуры, которые могут измерять изменения температуры в окружающей среде и корректировать результаты измерения тензометрических датчиков в соответствии с этими изменениями.

Кроме того, применяют специальные конструкционные решения, такие как использование материалов с низким коэффициентом температурного расширения или тепловая изоляция, чтобы уменьшить влияние температуры на работу тензометрических датчиков.

1.3.2 Механические измерения.

Влияние механических измерений также может проявиться в виде деформации, износа или разрушения датчика при работе в экстремальных условиях, что может привести к искажению результатов измерений. Поэтому важно выбирать датчики, устойчивые к воздействию механических нагрузок.

Кроме того, механические измерения могут влиять на измеряемую величину, если датчик не корректно установлен или закреплен, что приведет к искажению результатов измерений. Поэтому необходимо уделять внимание правильной установке и креплению датчиков для исключения подобных ошибок.

1.4 Клеи для установки тензорезисторов

Заводы – изготовители тензорезисторов по заказу потребителя вместе с партией датчиков поставляют клей для их установки с подробной инструкцией по нанесению клея и его сушке. Метрологические характеристики датчиков определяются на заводах с использованием эталонных метрологических установок.

Для решения конкретных задач тензометрирования выпускаются датчики с различной комбинацией составляющих системы «тип решетки – тип подложки – тип клея».

Срок хранения клея обычно значительно меньше срока хранения тензорезисторов. Замена клея на другой тип требует проведения самых серьезных метрологических исследований. Многие клеи общего назначения могут не обла-

дать достаточной стабильностью, гарантирующей точное измерение деформаций.

В таблице 1 приведены различные типы клеев, которые поставляют изготовители тензодатчиков.

Таблица 1 – Клеи для установки тензорезисторов

Тип клея	Рабочий диапазон температур, °С	Максимальная температура полимеризации, °С	Рабочий диапазон деформирования, %	Давление, кПа	Примечание
Циакрин, (Z-70 фирмы НВМ)	-32...+65	Комнатная	До 6	Нажатие пальца	Требуется герметизация
Полиимид	-269...+315	260	2	275	Однокомпонентный
Эпоксидный клей (EP-310 фирмы НВМ)	-269...+260	-	3...10	100...500	Двух-трех компонентный
Керамическое связующее (фосфаталюминия с кремнием)	-269...+650	315	-	-	-

Основные характеристики:

Циакрин. Клеи на основе цианоакрилата не требуют ни нагревания, ни отвердителя для инициирования полимеризации. Отвердевание (полимеризация) цианоакрилатных клеящих веществ начинается от каталитического воздействия адсорбированной в воздухе воды с относительной влажностью между 40 и 70 %.

Для начала полимеризации необходимо незначительное давление на датчик. Минутного нажатия большим пальцем и двухминутной паузы перед удалением фторопластовой прокладки оказывается достаточным для последующей полимеризации во время подключения сигнальных проводов. Окончательное отвердевание наступает спустя приблизительно 24 часа.

Поскольку прочность клея снижается с течением времени в результате поглощения влаги, необходимо защищать датчик от влаги при его длительной эксплуатации.

Полиимид. Представляет собой однокомпонентный полимер, который может применяться в чрезвычайно широком диапазоне температур от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+399\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полиимид отверждается под давлением 275 кПа при температуре $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот клей эффективен при измерении деформаций в условиях повышенных температур и обеспечивает при комнатной температуре измерение деформаций, превышающих 2% .

Эпоксидный клей. Он состоит из смолы и отвердителя, который вступает в реакцию со смолой, обеспечивая полимеризацию. При наклейке датчиков нашли применение эпоксидные клеи с очень низкой вязкостью, что позволяет наносить их очень тонким слоем. По этой причине эпоксидные клеи экономичны в использовании.

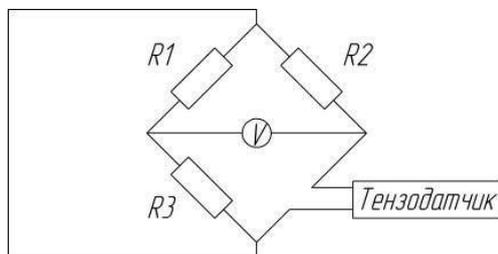
Керамические связующие, используемые для монтажа тензодатчиков, обычно состоят из смеси фосфата алюминия и кремния. Применение связующего, как правило, осуществляется в два этапа. На первом этапе наносится на деталь и высушивается тонкая пленка, являющаяся изолятором. На датчик со съемной несущей подложкой затем наносится второе покрытие. Керамика отверждается без повышения давления при температуре около $315\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рабочий диапазон температур керамических связующих простирается от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.5 Методы подключения и снятие показаний тензометрических датчиков

При выборе тензодатчика необходимо учитывать следующие основные факторы: место установки, базовые размеры крепления в месте установки, номинальную нагрузку, характер измеряемых усилий (чистое растяжение или сжатие, растяжение с изгибом и т.д.).

Тензодатчики крепятся на испытуемый элемент, и при его деформировании происходит и деформирование проводника тензодатчика, что, в свою очередь, изменяет его сопротивление. Для установки тензодатчиков используют различные виды клея: циакрин, эпоксидный клей, полиимид, керамические связующие.

В связи с тем, что упругие деформации многих материалов очень малы, а изменение сопротивления прямо пропорционально деформациям, современные омметры не могут улавливать столь малые изменения. Для измерения этих показаний используется мостовая схема подключения тензодатчика (рисунок 7).



Рисунке 7 – Мостовая схема с тензодатчиком

Сопротивление резистора R_2 устанавливается равным сопротивлению тензодатчика в спокойном состоянии. Сопротивления резисторов R_1 и R_3 так же подбираются равными друг другу. Таким образом, если к тензодатчику не приложено никакой силы, мост будет симметрично сбалансирован и вольтметр покажет напряжение 0 В. Как только на тензодатчик будет оказано воздействие, его сопротивление соответственно увеличится или уменьшится, произойдет разбалансировка моста и вольтметр покажет некоторое напряжение. Данная система называется 1/4 моста.

Существуют также системы 1/2 моста и 4/4 моста, повышающие качество измерений.

Принцип работы таких систем представлен на рисунке 8.

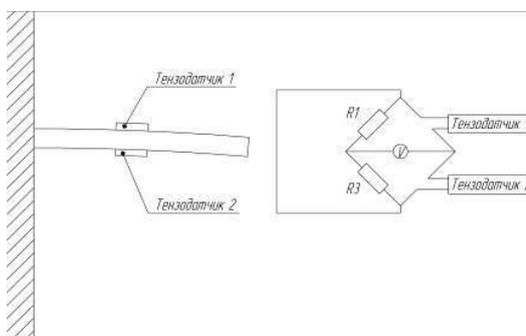


Рисунок 8 – Вариант схемы расположения тензодатчиков системы 1/2 моста для измерения деформации изгиба

Для измерения деформации изгиба, компенсируя деформацию растяжения, тензодатчик 2 подключается к соседней стороне моста. При этом напряжение на вольтметре определяется по формуле:

$$U = \frac{1}{4} \times k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times E, \quad (2)$$

где:

k – коэффициент тензочувствительности;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – деформации тензорезисторов;

E – модуль Юнга.

Тензодатчик 1 измеряет деформацию растяжения, а тензодатчик 2 измеряет деформацию сжатия. В связи с тем, что деформации тензодатчика 2 учтены с отрицательным знаком, результат в скобке будет положительным, тем самым, выход моста удваивается и обеспечивается измерение только деформаций изгиба. Для измерения деформации растяжения (рис. 9) данная схема подключения будет давать на выходе ноль. Поэтому тензодатчики подключаются к одной стороне моста, а напряжения на вольтметре будет равно:

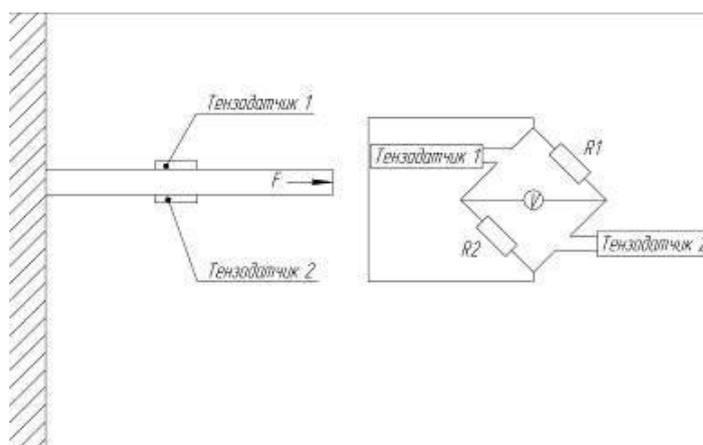


Рисунок 9 – Вариант схемы расположения тензодатчиков системы 1/2 моста для измерения деформации растяжения

Методы снятия показаний:

Снятие показаний тензометрических датчиков с мостовой схемы производится с помощью специального измерительного прибора, который может быть как цифровым, так и аналоговым. Чтобы снять показания, необходимо выполнить следующие шаги:

- Подключить измерительный прибор к мостовой схеме, используя соответствующие кабели и разъемы;
- Установить мостовую схему в рабочее положение и активировать датчики;
- Проверить правильность подключения прибора к мостовой схеме и убедиться, что все соединения надежно зафиксированы;
- Запустить измерительный прибор и начать снятие показаний с тензометрических датчиков;
- Фиксировать полученные значения и анализировать их для получения необходимой информации о деформациях или нагрузках, которые оказываются на измеряемый объект.

После окончания процесса снятия показаний необходимо правильно обработать полученные данные и оценить их точность и достоверность для получения корректной информации об измеряемом объекте.

В системе 4/4 моста четыре тензорезистора подключены по одному с каждой из четырех сторон моста (рисунок 10). Данная система для измерения деформации используется редко, но она часто применяется для датчиков тензорезистивного типа.

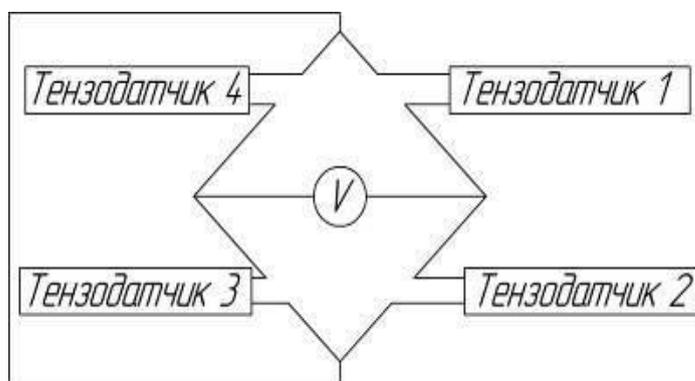


Рисунок 10 – Схема расположения тензодатчиков системы 4/4 моста

1.6 Схемы включения тензорезисторов в измерительный мост

1.6.1 Мост Уитстона

Измерение деформации с помощью тензорезистивных преобразователей – одно из самых сложных в технике электрических измерений. Сложность определяется малым диапазоном изменения сопротивления тензорезистора под воздействием деформации. Изменения сопротивления тензодатчика чрезвычайно малы и составляют для 100-Ом датчика около 0,0002 Ом на деформацию 1 мкм/м.

Таким образом, деформация 1000 мкм/м (соответствующая приращению напряжения в стали примерно 200 МПа) изменяет сопротивление 100 Ом датчика на 0,2 Ом. Для преобразования столь малых изменений сопротивления в выходные сигналы напряжения, которые могут регистрироваться, в измерительных приборах широко используется в основном мостовая схема.

Измерительный мост принято изображать в виде ромба, стороны которого называют плечами, а точки соединения плеч – вершинами или узлами моста. Мост Уитстона с питанием от источника постоянного напряжения состоит из трех функциональных частей (рисунок 11).

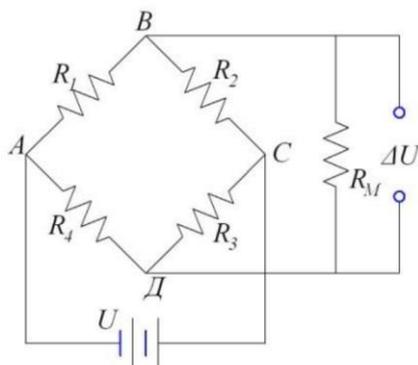


Рисунок 11 – Мост Уитстона

Это источник напряжения U , четыре резистора (R_1, R_2, R_3, R_4), образующие мост, и регистрирующая схема, включающая резистор нагрузки R_M . В приведенных ниже уравнениях полагается $R_M = \infty$, так, что ток, протекающий через мост, не отвлекается в нагрузку. Такая ситуация наблюдается, когда сигнал с

мостовой схемы поступает на вход электронного усилителя или аналогоцифрового преобразователя (АЦП).

Выходное напряжение моста Уитстона (разность напряжений точек В и Д) определяется соотношением:

$$\Delta U = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_4)} \times U, \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что $\Delta U = 0$, если выполняется условие

$$R_1 R_3 = R_2 R_4, \quad (4)$$

При соблюдении равенства (3) мост называется сбалансированным. Это означает, что малое напряжение разбаланса, вызванное изменением сопротивления, измеряется относительно нулевого или почти нулевого уровня. Этот малый сигнал легко может быть усилен до высокого уровня для последующей регистрации.

Выходное напряжение ΔU возникает при изменении сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 на величины $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$. Такие изменения сопротивления возникают, например, вследствие деформации или изменения температуры тензорезисторов.

В соответствии с уравнением (2) изменение выходного напряжения ΔU , вызванное указанными малыми изменениями сопротивлений, составляет:

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1 - \eta) U, \quad (5)$$

где член, характеризующий погрешность (нелинейность моста), описывается соотношением:

$$\eta = \frac{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}\right)}{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}\right)}, \quad (6)$$

В дальнейшем будем рассматривать частный, но наиболее часто встречающийся на практике случай, когда в измерительный мост включаются датчики из одной партии, т.е. имеющие одинаковое номинальное сопротивление $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ и одинаковый коэффициент тензочувствительности $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$.

Выразим изменения относительных сопротивлений тензодатчиков через действующие на них деформации: где, $i = 1, 2, 3, 4$.

После подстановки (6) в выражения (3) и (5) получим:

$$\Delta U = k\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4(1-\eta)U, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \frac{2}{k})}, \quad (8)$$

Поскольку изменения сопротивления тензорезисторов малы, то и нелинейность функционирования измерительного моста незначительна. Так, при одном активном датчике нелинейность моста не превышает 1 %, если деформация не превышает 10 000 мкм/м.

Из выражений (5), (6), (7) и (8) следуют важные для практических приложений свойства измерительного моста:

Деформации, действующие на тензорезисторы противоположных плеч, суммируются в пределах измерительного моста.

Деформации, действующие на тензорезисторы смежных плеч моста, вычитаются в пределах измерительного моста.

Погрешность моста (нелинейность) пропорциональна алгебраической сумме всех деформаций, воспринимаемых тензорезисторами.

1.7 Деформирование тензорезистора

Бывают небольшие отклонения от линейности при циклическом деформировании, причем кривая разгрузки располагается ниже кривой нагружения, образуя петлю гистерезиса.

Коэффициент тензочувствительности, или чувствительность тензорезистора, определяется как отношение относительного приращения сопротивления наклеенного тензорезистора к относительной деформации образца, измеренной в направлении оси тензорезистора:

$$k = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\varepsilon}, \quad (9)$$

Нелинейность – под нелинейностью понимается максимальное отклонение реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии.

Смещение нуля – отрицательный выходной сигнал датчика после снятия нагрузки.

Гистерезис представляет собой разность значений выходного сигнала тензорезистора при одних и тех же уровнях входного сигнала, полученных при нагружении и разгрузке объекта.

Наибольший гистерезис наблюдается в первом цикле нагружения. В последующих циклах петля гистерезиса сужается, стабилизируется.

Рабочий диапазон температур – диапазон температур, при котором гарантируется работоспособность датчика.

Температурная характеристика теплового расширения α , или термочувствительность наклеенного тензорезистора – коэффициент, равный относительному изменению сопротивления наклеенного тензорезистора при изменении температуры на 1 °С.

Наработка до усталостного разрушения – число циклов нагружения наклеенного тензорезистора знакопеременной деформацией определенного уровня, при котором наблюдается развитие усталостных разрушений датчика.

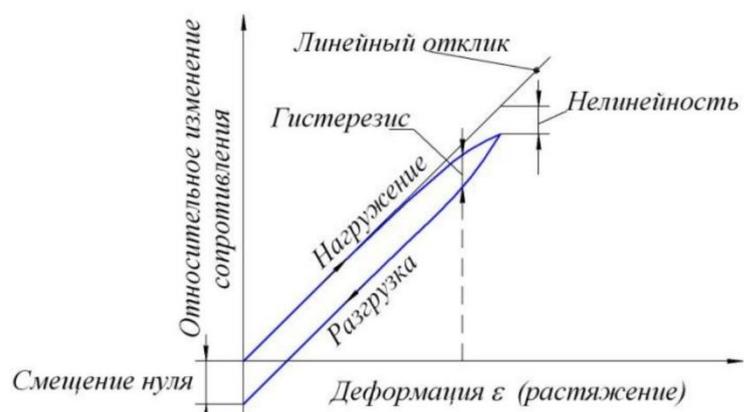


Рисунок 12 – Характеристика циклического деформирования тензорезистора

2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Расчет момента инерции теоретическим путем

Для расчета момента инерции балки квадратного сечения с толщиной стенки, необходимо учитывать геометрические параметры сечения. Рассмотрим квадратную трубу с внешней стороной a и толщиной стенки t .

Формула момента инерции для квадратного сечения:

Момент инерции I относительно центральной оси для квадратного сечения с толщиной стенки рассчитывается как разность моментов инерции внешнего и внутреннего квадратов:

$$I = \frac{a^4}{12} - \frac{(a - 2t)^4}{12}, \quad (10)$$

где:

a – внешняя сторона квадратного сечения;

t – толщина стенки.

Пояснение:

Момент инерции внешнего квадрата: I .

Итоговый момент инерции равен разности этих двух величин.

Расчет:

Пусть $a = 100$ мм, $t = 5$ мм.

а) Момент инерции внешнего квадрата:

$$I_{\text{внеш}} = \frac{100^4}{12} = \frac{100000000}{12} = 8333333.33.$$

б) Момент инерции внутреннего квадрата:

$$I_{\text{внут}} = \frac{(100 - 2 \times 5)^4}{12} = \frac{90^4}{12} = 5467500 \text{ мм}^4.$$

в) Итоговый момент инерции:

$$I = 8333333.33 - 5467500 = 2865833.33 \text{ мм}^4 .$$

2.1.1 Измерение деформаций с помощью тензорезисторов

Тензометрические датчики измеряют относительную деформацию ϵ в материале. Деформация связана с напряжением σ по закону Гука:

$$\sigma = E \times \epsilon , \quad (11)$$

где:

E – модуль упругости материала (для стали $E=210$ ГПа);

ϵ – относительная деформация, измеренная тензодатчиком.

Напряжение σ также связано с изгибающим моментом M и моментом инерции I :

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} , \quad (12)$$

где: y – расстояние от нейтральной оси до точки измерения (половина высоты сечения для крайних точек).

Измерение деформаций в трех точках.

Предположим, что тензодатчики установлены в трех точках балки:

Точка 1: Верхняя часть сечения (сжатие).

Точка 2: Нейтральная ось (деформация близка к нулю).

Точка 3: Нижняя часть сечения (растяжение).

Расчет измерения деформаций:

$$y = 50 \text{ мм},$$

$$M = 100 \text{ Н}\cdot\text{м} \text{ (изгибающий момент)},$$

$$E = 210 \times 10^9 \text{ Па}.$$

а) Напряжение в точке 1 и 3:

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} = \frac{100 \times 0,5}{2,83 \times 10^6} = 176 \text{ МПа} .$$

б) Деформация в точке 1 и 3:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{176 \times 10^6}{210 \times 10^9} = 0,00085 .$$

в) В точке 2 (нейтральная ось) деформация близка к нулю, т.к. напряжения здесь минимально.

Вывод:

Точка 1(верхняя часть сечения): Наблюдается сжатие, т.к. верхние волокна балки испытывают сжимающие напряжения.

Точка 2(нейтральная ось: Деформация минимальная, т.к. нейтральная ось не испытывает значительных напряжений при изгибе.

Точка 3(нижняя часть сечения): Наблюдается растяжение, т.к. нижние волокна балки испытывают растягивающие напряжения.

2.1.2 Расчет допустимого значения установки

а) Момент инерции квадратного сечения

Момент инерции I для полного квадратного сечения рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{a^4}{12} - \frac{(a - 2t)^4}{12}, \quad (13)$$

где:

a – внешняя сторона квадратного сечения;

t – толщина стенки;

$a - 2t$ – внутренняя сторона квадратного сечения.

Расчет:

$$a = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м},$$

$$t = 5 \text{ мм} = 0,005 \text{ м}.$$

Тогда:

$$I = \frac{0,1^4 - (0,1 - 2 \times 0,005)^4}{12} = \frac{0,0001 - 0,000081}{12} = \frac{0,000019}{12} = 2,83 \times 10^{-6} \text{ м}^4 .$$

2.1.3 Теоретический расчет с помощью деформации тензорезисторов
Тензометрические датчики измеряют относительную деформацию.

$$\sigma = E \times \varepsilon , \quad (14)$$

где:

E – модуль упругости материала (для стали $E = 2 \times 10^{11}$ Па);

ε – относительная деформация, измеренная тензодатчиком.

Напряжение в балке:

Напряжение в балке при изгибе определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} , \quad (15)$$

где M – изгибающий момент (Н·м);

I – момент инерции сечения;

y – расстояние от нейтральной оси до точки измерения (м).

Расчет напряжения в трех точках:

Датчики установлены на расстояниях y_1, y_2, y_3 от нейтральной оси. Для квадратного сечения нейтральная ось проходит через центр.

Датчики установлены на расстояниях:

$y = 0,5$ м (ближе к краю),

$y = 0,25$ м (середина),

$y = 0,125$ м (нейтральная ось),

$M = 1000$ Н·м.

Напряжение в точке 1 ($y_1 = 0,5$ м):

$$\sigma = \frac{100 \times 0,5}{2,83 \times 10^{-6}} = 1,76 \times 10^8 \text{ Па} = 176 \text{ МПа} .$$

Напряжение в точке 2 ($y = 0,25$ м):

$$\sigma = \frac{100 \times 0,25}{2,83 \times 10^{-6}} = 8,82 \times 10^7 \text{ Па} = 88 \text{ МПа} .$$

Напряжение в точке 3 ($y = 0,125$ м):

$$\sigma = \frac{100 \times 0,125}{2,83 \times 10^{-6}} = 4,41 \times 10^7 \text{ Па} = 44 \text{ МПа} .$$

Деформация в точке 1:

$$\varepsilon_1 = \frac{176 \times 10^6}{2 \times 10^{11}} = 0,00088 .$$

Деформация в точке 2:

$$\varepsilon_2 = \frac{88 \times 10^6}{2 \times 10^{11}} = 0,00044 .$$

Деформация в точке 3:

$$\varepsilon_3 = \frac{44 \times 10^6}{2 \times 10^{11}} = 0,00022 .$$

Полученные значения:

$$y_1 = 0,5 \text{ м};$$

$$y = 0,25 \text{ м};$$

$$y = 0,125 \text{ м} .$$

Момент инерции сечения $I = 2,83 \times 10^{-6} \text{ м}^4$,

Напряжения:

$$\sigma_1 = 176 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 88 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = 44 \text{ МПа} .$$

Деформация:

$$\varepsilon_1 = 0,00088;$$

$$\varepsilon_2 = 0,00044;$$

$$\varepsilon_3 = 0,00022 .$$

2.1.4 Расчет напряжения при различных углах подъема стрелы

Схема модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ показан на рисунке 13.

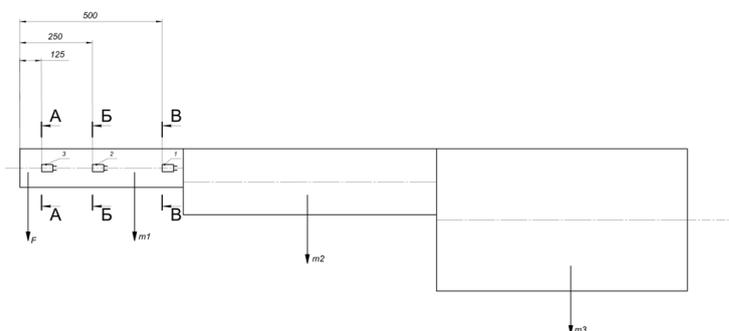


Рисунок 13 – Схема модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ

Расчет:

$$d = L \times \cos(\alpha), \quad (16)$$

где L – длина стрелы;

α – угол подъёма (в градусах или радианах)

Перевод угла в радианы:

$$a_{град} = a \times \frac{\pi}{180}, \quad (17)$$

Расчет горизонтальной проекции d :

$$d = L \times \cos(a_{град}), \quad (18)$$

Изгибающий момент:

$$M = M_0 \times \frac{d}{L}, \quad (19)$$

Расчет напряжения:

$$\sigma = \frac{M \times y}{I}, \quad (20)$$

Полученные значения приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Напряжения при разных углах подъёма стрелы

Угол, градусов	угол, радианы	Горизонтальная проекция, $d=L \cdot \cos(\alpha_{\text{рад}})$	Изгибающий момент $M=M_0 \cdot d/L$	Напряжение $\sigma=(M \cdot y)/I$, Па	Напряжение, МПа
0	0	3	100	174216027,9	174,22
1	0,0175	2,9995	100	174186411,1	174,19
2	0,0349	2,9982	99,9	174111498,3	174,11
3	0,0524	2,9959	99,9	173977351,9	173,98
4	0,0698	2,9927	99,8	173792682,9	173,79
5	0,0873	2,9886	99,6	173554007,0	173,55
6	0,1047	2,9836	99,5	173263066,2	173,26
7	0,1222	2,9776	99,3	172914634,1	172,91
8	0,1396	2,9708	99	172520905,9	172,52
9	0,1571	2,9631	98,8	172073170,7	172,07
10	0,1745	2,9544	98,5	171567944,3	171,57

Таблица 3 – Напряжения при разных углах подъёма стрелы

Угол, градусов	угол, радианы	горизонтальная проекция, $d=L \cdot \cos(\alpha_{\text{рад}})$	изгибающий момент $M=M_0 \cdot d/L$	напряжение $\sigma=(M \cdot y)/I$, Па	напряжение, МПа	напряжение $\sigma=(M \cdot y)/I$, Па	напряжение, МПа
10	0,1745	2,9544	98,5	94998713,83	95	39470941,88	39,47
20	0,3491	2,819	94	90644372,99	90,64	37663326,65	37,66
30	0,5236	2,5981	86,6	83538906,75	83,54	34709418,84	34,71
40	0,6981	2,2982	76,6	73896463,02	73,9	30705410,82	30,71
50	0,8727	1,9283	64,3	62002572,35	62	25763527,05	25,76
60	1,0472	1,5	50	48231511,25	48,23	20040080,16	20,04
70	1,2217	1,0261	34,2	32994212,22	32,99	13707414,83	13,71
80	1,3963	0,5208	17,4	16747909,97	16,75	6957915,832	6,96
90	1,5708	0	0	0	0	0	0

2.2 Описание экспериментальной установки

Модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ показан на рисунке 14.

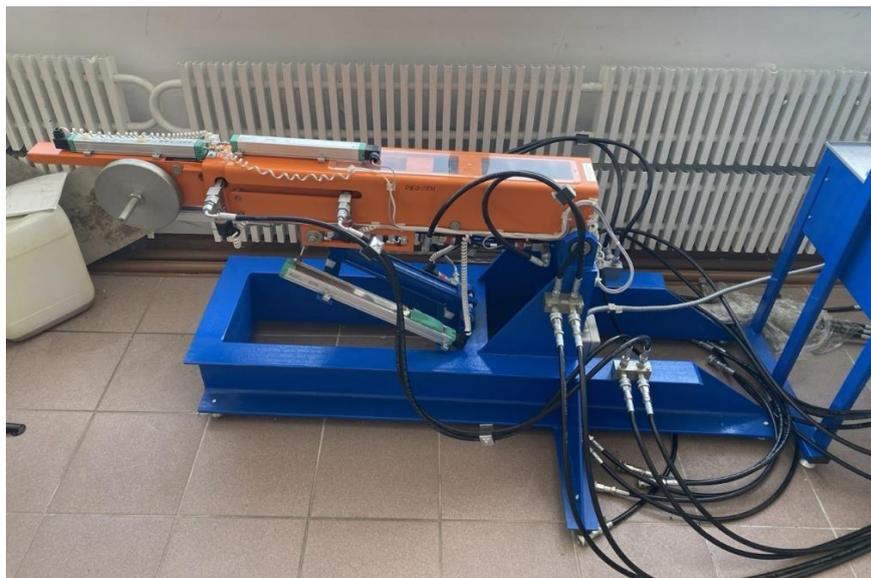


Рисунок 14 – Модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ

В комплект поставки входит:

- модуль гидроаппаратуры комплекса «Гидравлический привод подъемно-транспортных машин» СГУ-ГП-ПТМ-КР-016-15ЛР-01;
- комплект съемных рукавов высокого давления с муфтами быстроразъемных соединений; модуль подъемного механизма СГУ-ГП-ПТМ-КР-016;
- рабочая жидкость объемом не менее 40 л;
- ноутбук с программным обеспечением;
- описание лабораторных работ для учебно-исследовательского комплекса «Гидравлический привод подъемно-транспортных машин» СГУ-ГП-ПТМ-КР-016-15ЛР-01;
- руководство по эксплуатации учебно-исследовательского комплекса «Гидравлический привод подъемно-транспортных машин» СГУ-ГП-ПТМ-КР-016-15ЛР-01.

Основные технические характеристики:

- давление эксплуатации: номинальное, МПа 6, максимальное, не более, МПа 7,2;
- напряжение питания 380;

- род тока – трехфазный;
- потребляемая мощность не более, кВт- 3;
- габаритные размеры базисного модуля, не более, мм:
- длина 1010;
- глубина 500;
- высота 1700.

Габаритные размеры модуля подъемного механизма, не более, мм:

- длина 1800;
- глубина 1000;
- высота 900;
- масса (без рабочей жидкости), не более, кг- 200;
- рабочая емкость бака, л- 40.

2.2.1 Составление технических требований по определению деформации в объекте исследования

Технические требования для модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ:

Объект исследования (установка кранового типа) должен быть очищен от грязи, ржавчины, краски и других посторонних включений в местах установки тензорезисторов.

Поверхность металла в местах установки тензорезисторов должна быть обезжирена и обезжирена.

Тензорезисторы должны быть приклеены к металлу в соответствии с инструкцией производителя.

Мостовая схема должна быть подключена к тензорезисторам в соответствии с электрической схемой.

Система сбора данных должна быть настроена и проверена в соответствии с руководством пользователя.

Проведение испытаний:

а) Испытания должны проводиться при рабочих нагрузках на установку кранового типа;

б) В ходе испытаний должны быть зарегистрированы деформации металлоконструкций в следующих режимах работы:

- Подъем стрелы;
- Фиксированное положение стрелы;
- Опускание стрелы.

2.3 Выбор тензорезистора по техническим характеристикам

Выбор тензорезисторов по техническим требованиям

Для данного исследования был выбран тензорезистор BF350-1AA

Таблица 4 – Тензорезистор BF350-1AA

Модель	Размер решетки	Размер подложки
BF350-1AA	1.0x3.75	4.8x4.7

где В- фольговый;

F- фенол-эпоксидная смола;

350- Сопротивление, Ом;

1- База, мм;

AA- четверть мост

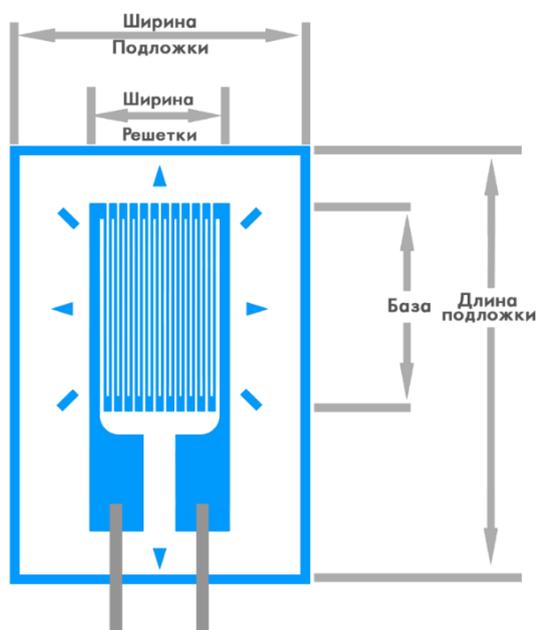


Рисунок 15 – Вид тензорезистора

2.3.1 Тензорезистор BF350-1AA и его характеристики:

Высокая чувствительность:

Тензорезистор BF350-1AA обладает высокой чувствительностью ($2.00 \pm 0.10 \%$), что позволяет ему точно измерять небольшие деформации.

Широкий диапазон рабочих температур:

Тензорезистор BF350-1AA может работать в широком диапазоне температур (-40°C $+120^{\circ}\text{C}$), что делает его пригодным для использования в самых разных условиях.

Высокая надежность:

Тензорезистор BF350-1AA изготовлен из высококачественных материалов и обладает высокой надежностью.

Небольшой размер и вес:

Тензорезистор BF350-1AA имеет небольшой размер (10 мм x 5 мм x 3 мм) и вес (2 г), что упрощает его установку и использование.

Доступная цена:

Тензорезистор BF350-1AA имеет доступную цену, это делает его лучшим вариантом для широкого спектра применений.

Принцип работы:

Тензорезистор BF350-1AA работает на принципе изменения сопротивления при деформации. Когда материал на котором установлен тензодатчик, деформируется, сопротивление тензодатчика изменяется. Это изменение сопротивления можно использовать для измерения деформации материала.

Метод монтажа:

Тензорезистор BF350-1AA может быть установлен на различные материалы с помощью разных методов монтажа. Распространенные способы монтажа:

- Клеевой монтаж: Тензорезистор BF350-1AA может крепиться к материалу с помощью специального клея;
- Сварной монтаж: Тензорезистор BF350-1AA может быть приварен к материалу;

– Механический монтаж: Тензорезистор VF350-1AA может быть механически прикреплен к материалу с помощью зажимов или шурупов.

Схемы подключения:

Тензорезистор VF350-1AA может быть подключен к различным системам сбора данных с использованием различных схем подключения. Некоторые распространенные схемы подключения включают:

а) Мостовая схема: наиболее распространенной схемой подключения тензометрических датчиков является мост Уитстона.

б) Полумостовая схема: схема полумостового соединения представляет собой упрощенную версию моста Уитстона.

в) Универсальность:

– Тензорезистор VF350-1AA может быть использован в различных приложениях, включая:

- Измерение деформации в строительных конструкциях;
- Измерение деформации в машинах и механизмах;
- Измерение давления-Измерение веса.

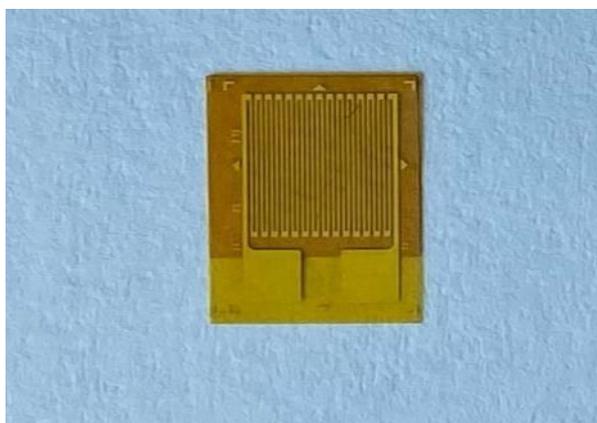


Рисунок 16 – Тензорезистор VF350-1AA

2.3.2 Сравнение тензорезисторов

Сравнение тензорезистора VF350-1AA с другими тензорезисторами:

Тензорезистор VF350-1AA обладает рядом преимуществ, которые делают его лучшим выбором для многих применений по сравнению с другими тензорезисторами.

Таблица 5 – Сравнение с тензорезисторами серии KS

Характеристика	BF350-1AA	KS-01	KS-02	KS-03
Чувствительность	2.00 ± 0.10%	2.00 ± 0.15%	2.00 ± 0.20%	2.00 ± 0.30%
Диапазон рабочих температур	-40°C до +120°C	-55°C до +180°C	-55°C до +180°C	-55°C до +180°C
Максимальная допускаемая деформация	0.20%	0.15%	0.10%	0.05%
Сопротивление изоляции	≥1000 МОм	≥500 МОм	≥500 МОм	≥500 МОм
Материал корпуса	Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь	Нержавеющая сталь
Длина кабеля	1 м	0.5 м	1 м	2 м
Размеры	10 мм x 5 мм x 3 мм	5 мм x 3 мм x 2 мм	7 мм x 4 мм x 3 мм	10 мм x 5 мм x 4 мм
Вес	2 г	1 г	1.5 г	3 г
Цена	Доступная	Средняя	Средняя	Высокая

Как видно из таблицы, тензорезистор BF350-1AA имеет:

- Более высокую чувствительность по сравнению с KS-02 и KS-03;
- Более широкий диапазон рабочих температур по сравнению с KS-01;
- Более высокую максимальную допускаемую деформацию по сравнению с KS-02 и KS-03;
- Более высокое сопротивление изоляции по сравнению с KS-01, KS-02 и KS-03;
- Небольшой размер и вес;
- Доступную цену.

2.3.3 Клей для монтажа выбранного тензорезистора

По техническим характеристикам тензорезистора BF350-1AA был выбран наиболее подходящий клей для монтажа. Данный тип клея приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Клей для монтажа выбранного тензорезистора

Тип клея	Название	Характеристики	Преимущества	Недостатки
Эпоксидный	Hysol 930	Высокая прочность, устойчивость к высоким температурам, влажности.	Высокая прочность	Длительное время отверждения (24 часа)



Рисунок 17 – Эпоксидный клей

2.4 Проектирование измерительного устройства

Для сборки мостовой схемы для измерения деформации в объекте исследования необходимы следующие компоненты:

Таблица 7 – Компоненты для сборки мостовой схемы

№ п/п	Наименование	Количество
1	Тензорезистор BF350-1AA, шт	1
2	Беспаячная макетная плата (breadboard) 400 точек, для Arduino STM32 NodeMCU Raspberry, шт	1
3	Arduino Nano V 3.0 mini USB ATMEGA328P CH340, шт.	1
4	Резистор MF (C2-23) 0,25 Вт, 100 Ом, 1%, шт	2
5	Резистор CF (C1-4) 0,25 Вт, 430 Ом, 5%, шт	3
6	Перемычка для макетной платы, шт	14
7	Кабель соединительный PTL 904, шт	1
8	Изолированный зажим типа крокодил CL4258, 4мм	2
9	BC517 транзистор BJT NPN TO-92, 400 Ом, 30 Вт, шт	1
10	Аналогово-цифровой преобразователь MCP3421 I2C 18 бит, шт	1
11	Провода для пайки, м	0,3
12	Припой для пайки с канифоли 25 гр. 0,8 мм, гр	0,5

Инструменты:

- Пинцет;
- Кусачки;
- Паяльник.

Этапы сборки:

а) Подготовка макетной платы:

- Вставить Arduino Nano в макетную плату, соблюдая полярность;

- Вставить аналогово-цифровой преобразователь MCP3421 в макетную плату, соблюдая полярность;
 - Вставить транзистор BC517 в макетную плату, соблюдая полярность;
 - Вставить резисторы MF (100 Ом) и CF (430 Ом) в макетную плату.
- б) Сборка мостовой схемы:
- Соединить один вывод тензорезистора с одним выводом резистора MF (100 Ом);
 - Соединить другой вывод тензорезистора с другим выводом резистора MF (100 Ом);
 - Соединить один вывод резистора CF (430 Ом) с третьим выводом тензорезистора;
 - Соединить другой вывод резистора CF (430 Ом) с четвертым выводом тензорезистора;
 - Соединить один вывод резистора CF (430 Ом) с питанием Arduino Nano (+5 В);
 - Соединить другой вывод резистора CF (430 Ом) с землей Arduino Nano (GND);
 - Соединить выход мостовой схемы (точка соединения двух резисторов MF) с аналоговым входом A0 Arduino Nano.
- в) Подключение кабеля и зажимов:
- Подсоедините кабель к Arduino Nano;
 - Подсоедините зажимы к кабелю.

На рисунке 18 представлена собранная измерительная схема.

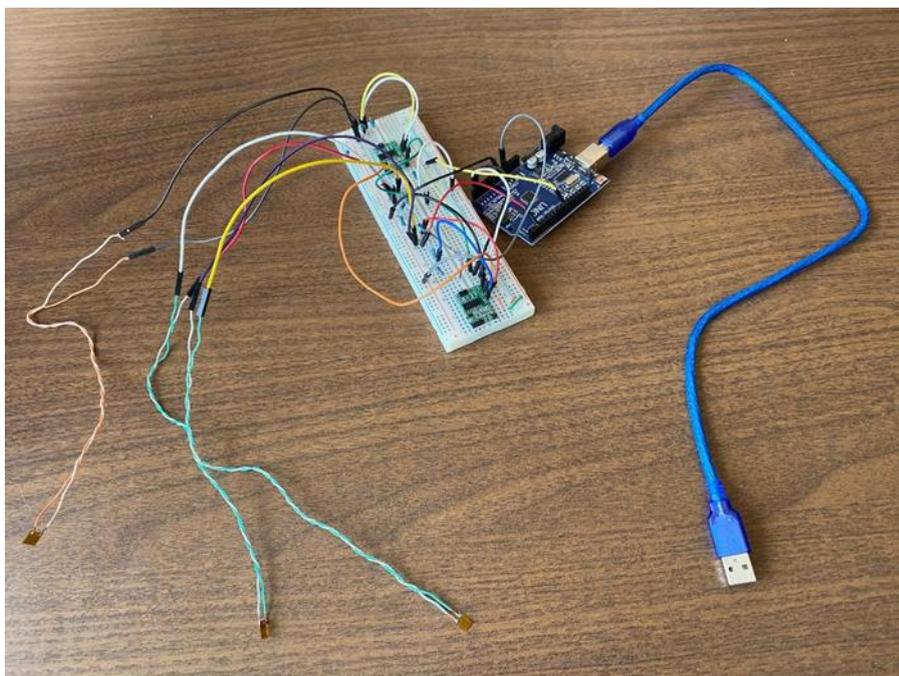


Рисунок 18 – Собранная измерительная схема

2.5 Проведение натуральных испытаний измерительного устройства

После того как была произведена сборка измерительной схемы, необходимо провести натурные испытания.

Описание результатов натуральных испытаний измерительного устройства

На рисунке 21 представлен график результатов натуральных испытаний измерительного устройства.

а) Стабильность:

– График демонстрирует стабильность работы измерительного устройства;

– Отсутствие резких скачков и плавное изменение кривой свидетельствует о том, что устройство не подвержено влиянию внешних факторов и обеспечивает точные измерения в течение длительного времени.

б) Дискретизация:

– На графике видны ступени дискретизации, что обусловлено принципом работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП);

– АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, разбивая его на дискретные значения;

– Шаг дискретизации, то есть расстояние между ступенями, определяет разрешающую способность АЦП.

в) Уровень шума:

– Уровень шума не превышает пары единиц, что говорит о низком уровне помех в измерительной схеме;

– Низкий уровень шума позволяет получить точные и достоверные результаты измерения.

На основании представленного графика можно сделать вывод, что измерительное устройство обладает высокой стабильностью, низким уровнем шума и обеспечивает точные измерения.

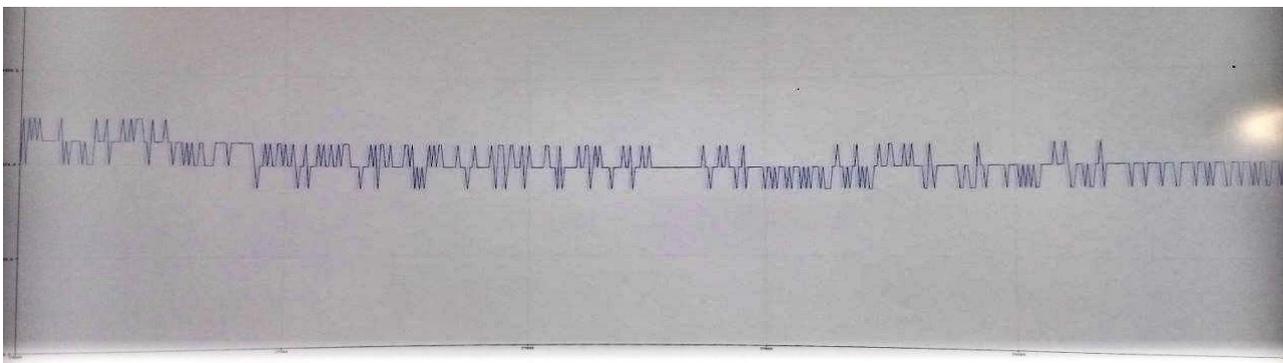


Рисунок 19 – График покоя

Проверка на чувствительность:

а) Чувствительность:

– Чувствительность измерительного устройства соответствует заявленным характеристикам;

– На графике отчетливо видны пики, соответствующие сжатию тестовой подковы.

б) Разрешающая способность:

– Разрешающая способность измерительного устройства невысокая;

– Устройство не способно различать малые изменения измеряемой величины;

– На графике ступеньки дискретизации достаточно крупные, что подтверждает низкую разрешающую способность.

в) Уровень сигнала:

– Среднесильное сжатие тестовой подковы дает пик примерно в 100 единиц;

– Амплитуда выходного сигнала измерительного устройства пропорциональна силе сжатия.

Измерительное устройство обладает достаточной чувствительностью, но низкой разрешающей способностью. Устройство способно измерять силу сжатия тестовой подковы, но не может различать малые изменения этой величины. Проверка чувствительности приведена на рисунке 20.

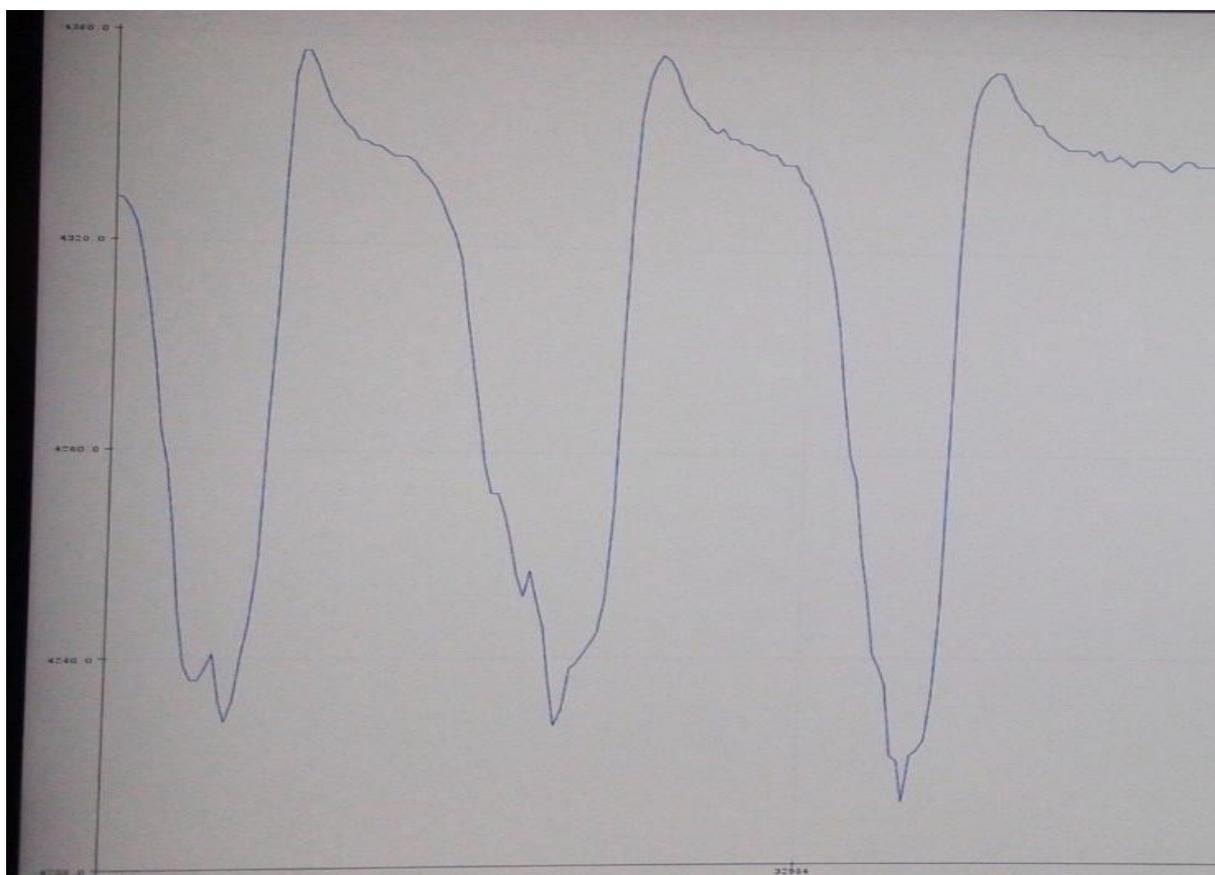


Рисунок 20 – График чувствительности

3 ХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Подготовка к тарировке

Процесс тарирования тензорезистора включает ряд этапов, направленных на определение соотношения между приложенной к датчику нагрузкой и его выходным сигналом.

Этапы тарирования:

а) Подготовка:

Выбор оборудования: тензорезистор, источник питания, измерительный прибор, устройство приложения нагрузки. Подготовка тензорезистора: очистка и крепление датчика.

б) Настройка оборудования: подключение тензорезистора: подключить тензорезистор к источнику питания и измерительному прибору.

Настройка устройства приложения нагрузки: установить диапазон и шаг нагрузки в соответствии с диапазоном измерения тензорезистора.

в) Калибровка: начальная точка: зафиксировать исходное положение нагружающего элемента и записать выходное напряжение тензорезистора.

Нанесение нагрузки: поэтапно прикладывать запланированную нагрузку к тензорезистору, записывать соответствующие значения выходного напряжения на каждом шаге.

Повторение: повторить процесс калибровки в нескольких циклах для повышения точности и уменьшения ошибок.

г) Обработка данных: создание таблицы: свести записанные значения нагрузки и выходного напряжения в таблицу.

Расчет чувствительности: для каждого шага нагрузки рассчитать чувствительность тензорезистора как отношение приращения выходного напряжения к приращению нагрузки.

Анализ результатов: проанализировать полученные данные на наличие линейности зависимости выходного напряжения от нагрузки.

д) Визуализация результатов:

Построение графика: построить график зависимости выходного напряжения от нагрузки на основе полученных данных.

е) Сохранение результатов:

Документирование: зафиксировать условия калибровки, полученные данные и результаты обработки в виде отчета.

Сохранение калибровочной кривой: сохранить калибровочную

3.1.1 Тарировка тензорезистора

Тарировка тензорезистора – это процесс определения зависимости его сопротивления от величины деформации.

Цель тарировки:

Получение калибровочной зависимости: Эта зависимость позволяет преобразовывать значения сопротивления тензорезистора в величины деформации или механические напряжения.

Обеспечение точности измерений:

Правильная тарировка гарантирует, что показания тензорезистора будут соответствовать действительным значениям деформации.

График тарировки тензорезистора в зависимости напряжения от прикладываемой нагрузки показан на рисунке 21.

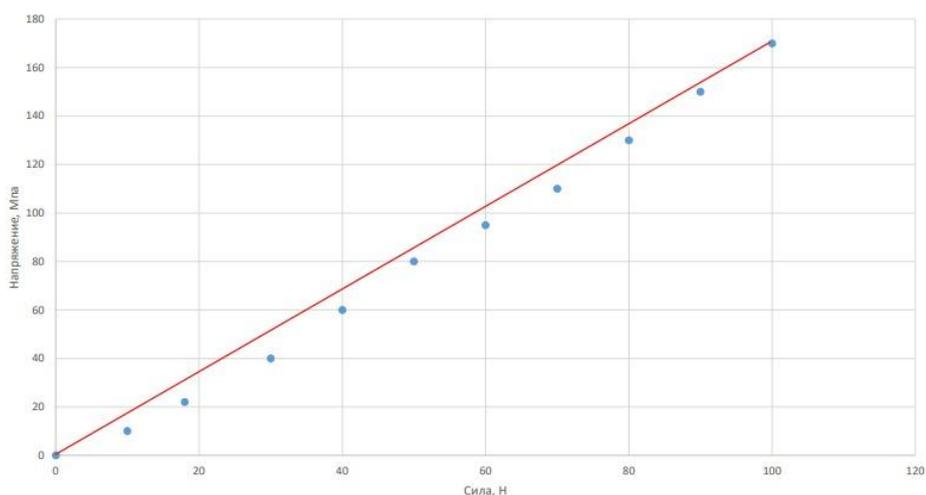


Рисунок 21 – График тарировки тензорезистора в зависимости напряжения от прикладываемой нагрузки

Описание графика:

а) Общая информация:

На данном графике изображена зависимость напряжения (МПа) от приложенной силы (Н) для тензорезистора VF350-1AA, установленного на модуле подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ. График отражает изменения напряжения в тензорезисторе в ходе различных режимов работы установки: выдвигание, подъем, фиксированное положение, опускание.

б) Ось X:

Ось X представляет силу (Н). На оси X показаны значения от 0 до 120 Н.

в) Ось Y:

Ось Y представляет напряжение (МПа) на тензорезисторе. На оси Y указаны значения напряжения от 0 МПа до 180 В.

Вывод:

При увеличении нагрузки увеличивается напряжение.

3.2 Методика проведения эксперимента

Подготовка оборудования:

- Модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ;
- Тензорезисторы VF350-1AA;
- Мостовая схема;
- Регистрирующее устройство (ноутбук с программой Arduino, АЦП)

Сборка мостовой схемы.

Проверка работоспособности собранной схемы. Монтаж тензорезистора:

– Тензорезистор VF350-1AA приклеиваем к модулю подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ с помощью клея;

– Подключение тензорезистора к мостовой схеме. Проведение эксперимента:

а) Включить регистрирующее устройство;

б) Запустить модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ в рабочее состояние;

в) Зарегистрировать зависимости выходного сигнала тензодатчика от времени или от положения подъемного механизма.

Обработка результатов:

- Проанализировать полученные графики;
- Определить зависимость нагрузки на тензорезистор от времени или от положения подъемного механизма.

Примечание:

- При проведении эксперимента необходимо соблюдать меры безопасности;
- Перед проведением эксперимента необходимо ознакомиться с инструкцией по эксплуатации модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ и тензодатчика BF230-1AA;
- Точность результатов эксперимента зависит от точности калибровки тензодатчика и регистрирующего устройства.

3.3 Подготовка исследуемого объекта и оборудования

Подготовка модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ к работе:

Для начала исследования необходимо подготовить модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ к работе.

Осмотр модуля:

- Осмотреть модуль на наличие видимых повреждений, таких как трещины, сколы, деформации;
- Убедиться, что все болты и гайки затянуты;
- Проверить состояние шлангов и кабелей.

Подключить модуль к источнику питания, соответствующему техническим характеристикам.

Проверка работоспособности:

- Включить модуль;
- Проверить направление движения платформы модуля;
- Проверить плавность хода платформы модуля;
- Проверить работу аварийной остановки.

Установка тензорезистора на модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ.

После того как была произведена проверка тензорезисторов на работоспособность, их необходимо установить на модуль подъемного механизма СГУ- АТРГ-ГПМ. Установка приведена на рисунке 23. После того как все пункты выполнены, можно приступать к исследованию.



Рисунок 22 – Установка тензорезисторов на модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ

3.3.1 Объяснение установки тензорезистора в данной точке

Модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ кранового типа. Тензорезистор BF350-1AA установлен на точке опоры, где две секции стрелы соединяются.

Пояснение:

Модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ кранового типа. Тензорезисторы BF350-1AA установлены на точке опоры, где две секции стрелы соединяются.

Пояснение:

Тензорезисторы в данной установке расположены так, чтобы точно фиксировать механические деформации, возникающие при изменении угла.

Тензорезисторы используются для измерения напряжения/деформации в конструкции, которая подвергается переменным нагрузкам при подъёме.

Тензорезисторы закреплены в местах, где материал испытывает максимальные изгибающие или растягивающие напряжения при изменении угла.

Информативность данных:

Точное измерение: Установка тензорезисторов в точке максимальной нагрузки обеспечивает наиболее точные измерения напряжений в стреле.

Анализ работы установки: Полученные данные позволяют детально анализировать работу установки в различных режимах, выявляя потенциальные проблемы и оптимизируя работу.

Прогнозирование отказов: Благодаря точной информации о напряжениях в стреле становится возможным прогнозировать отказы и своевременно принимать меры по их предотвращению. Так же нужно отметить, что при выборе места установки тензорезисторов также учитываются другие факторы, такие как доступность, простота монтажа и защита от внешних воздействий.

Установка тензорезисторов в точке опоры стрелы является обоснованным решением, позволяющим получить максимально информативные данные о напряжениях в металлоконструкциях и обеспечить безопасную и надежную работу кранового оборудования.

3.4 Проведение исследования:

В данном исследовании модуль подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ был оснащен тензорезисторами BF350-1AA для измерения деформации модуля при различных операциях: подъем, фиксированное положение, опускание стрелы. Тензорезистор был подключен к мостовой схеме, которая преобразует его деформацию в электрический сигнал. Выходной сигнал мостовой схемы был зарегистрирован с помощью компьютера с программой Arduino.

Положение стрелы при 0 градусов показано на рисунке 23.



Рисунок 23 – Положение стрелы при 0 градусов

Положение стрелы при 45 градусов показано на рисунке 24.



Рисунок 24 – Положение стрелы при 45 градусов

Положение стрелы при 90 градусов показано на рисунке 25.



Рисунок 25 – Положение стрелы при 90 градусов

Полученные значения от 10 до 90 градусов с шагом 10 градусов приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Напряжения при разных углах подъёма стрелы

Угол, градусы	Напряжение σ , МПа датчик 3	Напряжение σ , МПа датчик 2	Напряжение σ , МПа датчик 1
0	169	81	38
10	169	80	35
20	169	79	30
30	158	74	28
40	135	70	23
50	112	62	18
60	80	45	12
70	63	31	8
80	22	9	2
90	0	0	0

Из таблицы 8 был получен график, представленный на рисунке 26.

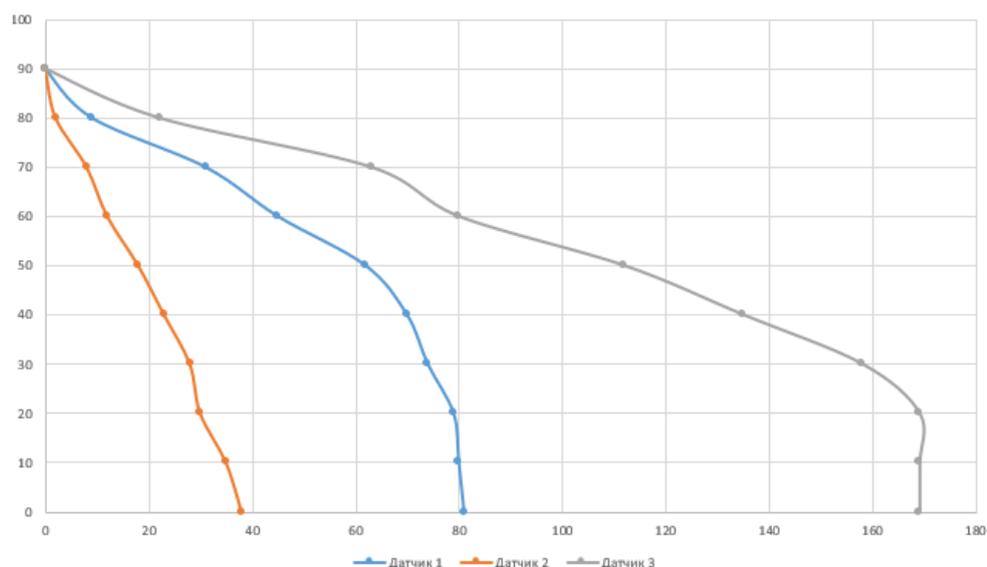


Рисунок 26 – график зависимости напряжения от угла подъёма стрелы

Сравнение полученных результатов при проведении исследования с теоретическим расчетом напряжения.

В ходе проведения исследования с использованием тензорезисторов были получены следующие данные:

$$\sigma_1 = 169 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 80 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = 35 \text{ МПа}.$$

Следующий этап, сравниваем полученные результаты с теоретическим расчетом:

$$\sigma_1 = 176 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = 88 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = 44 \text{ МПа}.$$

Данные напряжения, снятые с помощью тензорезисторов на модуле подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ, получились приблизительно точные к тем, что было рассчитано в теоретической части. Из этого можно сделать вывод, что:

а) Теоретический расчёт не рассчитывает динамические колебания при подъёме.

б) Практические измерения точнее отражают реальное поведение системы.

Перевод полученного напряжения в деформацию представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Перевод напряжения в деформацию

Напряжение σ , МПа	Деформация ϵ , мм
169	0.0805
158	0.0752
135	0.0643
112	0.0533
81	0.0386
80	0.0381
79	0.0376
74	0.0352
70	0.0333
63	0.0300
62	0.0295
45	0.0214
38	0.0181
35	0.0167
31	0.0148
30	0.0143
28	0.0133
23	0.0110
22	0.0105
18	0.0086
12	0.0057
9	0.0043
8	0.0038
2	0.0010
0	0.0000

Из таблицы 9 выбираем среднее значение деформаций.

Таблица 10 – Среднее значение деформаций

Угол, градусов	E, мм
0	0,0805
10	0,0643
20	0,0533
30	0,0376
40	0,03
50	0,0214
60	0,0167
70	0,011
80	0,0043
90	0

Таблица 11 – Значения угла от деформации

Угол, градусов	Напряжение σ , МПа	E, мм
0	169	0,0805
10	112	0,0643
20	80	0,0533
30	79	0,0376
40	63	0,03
50	45	0,0214
60	35	0,0167
70	23	0,011
80	9	0,0043
90	0	0,0000

Исходя из таблицы 11 получаем график зависимости угла от деформации.

График зависимости угла от деформации показан на рисунке 27.

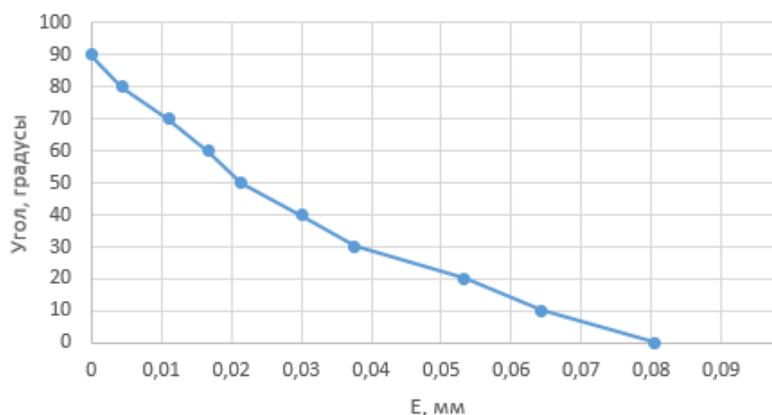


Рисунок 27 – График зависимости угла от деформации

График зависимости напряжения от приложенной силы показан на рисунке 28.

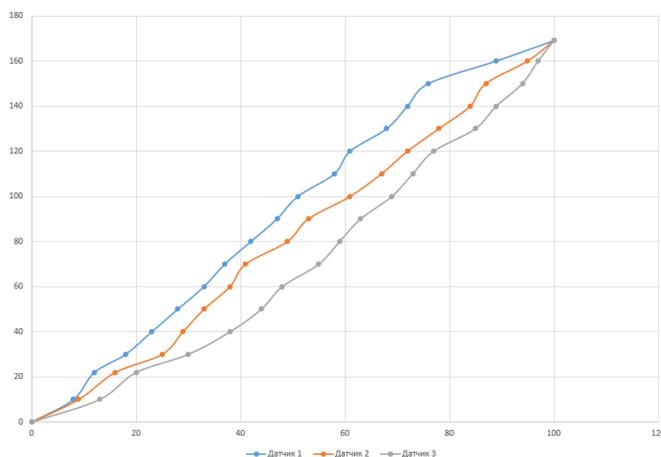


Рисунок 28 – График зависимости напряжения от приложенной силы

4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Система тензометрических измерений представляет собой пункт приема, сбора и обработки данных, полученных с помощью тензорезисторов. Такие системы позволяют измерять деформации одновременно во многих точках объекта.

При проведении исследования на модуле подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ с помощью тензорезисторов могут происходить следующие опасные факторы, которые могут привести к опасности на производстве: разрушение конструкции, отрыв и перегрев тензорезисторов, короткое замыкание, температурные влияния, механические помехи, поражение механическим током, травмы при работе с механизмом, химические воздействия, коррозия от промышленных газов и механические повреждения (вибрация, перетирание проводов).

Считаю, необходимым уделить особое внимание электробезопасности, а именно короткому замыканию. Потому что высок риск возникновения несчастного случая.

4.1 Меры электробезопасности инженера исследователя на рабочем месте

Для исследования на рабочем месте, инженер обязан соблюдать меры безопасности. Согласно ГОСТу 12.1.019–2009 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования» необходимо: проверить заземление всех металлических частей оборудования, использовать УЗО с током срабатывания ≤ 30 мА, изучить маркировку опасных зон.

При работе с измерительными приборами согласно ГОСТу 12.7.007. 0–75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» инженер обязан: использовать устройства защиты от перегрузок по току, изолировать провод с сопротивлением ≥ 1 МОм.

Для защиты персонала согласно ГОСТу СИЗ (ГОСТ 12.4.011–89) инженеру должны быть предоставлены следующие средства защиты: диэлектрические перчатки (класс защиты до 1000 В), обувь с изолирующей подошвой (ГОСТ 12.4.187–97), защитные очки (ГОСТ Р 12.4.230.1–2007).

Перед тем как допустить инженера исследователя к работе необходимо: пройти обучение по электробезопасности (группа II–III, ГОСТ 12.0.004–2015), пройти медицинский осмотр (ГОСТ 12.0.230–2007).

Во избежание аварийных ситуаций инженер обязан: отключить питание (ГОСТ 12.1.038–82), использовать диэлектрический коврик (ГОСТ 12.4.059–89), применить СИЗ для извлечения пострадавшего, при возгорании использовать огнетушитель класса С (для электроустановок, ГОСТ Р 51057–2001).

Для обеспечения документирования необходимо иметь журнал проверок, который включает в себя: ежедневный контроль изоляции (ГОСТ Р 50571.16–2007), протоколы испытаний оборудования (ГОСТ Р 8.879–2014).

4.2 Расчет устройства защитного отключения

Данный расчет нужен для того, чтобы осуществить защиту персонала от поражения электрическим током при работе с высоким напряжением (380), предотвращений возгораний из-за утечки тока в цепях питания тензометрической системы, обеспечения точности измерения.

Расчет выполнен согласно методическому пособию «Проектирование систем защиты электроустановок до 1000 В» (раздел 4.3 «Тензометрические системы»), где указаны: алгоритмы выбора УЗО для мостовых схем, нормы утечки для оборудования с подвижными узлами. Расчет был произведен по ГОСТ Р 50571.16–2007(п.6.3.3) — допустимая утечка 0,5% мА на 1 А нагрузки.

– Исходные данные:

$$I_{нагр} = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi}, \quad (21)$$

где:

U – напряжение питания 380 В;

P – мощность механизма 5,5 кВт,

$\sqrt{3} = 1,73$ – коэффициент для 3-фазных сетей;

$\cos\varphi = 0,8$ – характерно для электродвигателей.

$$I_{нагр} = \frac{5500}{1,73 \times 5,5 \times 0,8} = 10,5 \text{ А}.$$

– Тензоцентрическая система:

- Напряжение 10 В;
- Ток моста Уитстона 25 мА;
- Сопротивление изоляции ≥ 1 МОм (ГОСТ 33475–2015).

– Расчет утечки тока для 380 В

По ГОСТу Р 50571.16—2007:

- Допустимая утечка на 1 А нагрузки 0,5 мА;
- Для 10,5:

$$I_{утечки} = 10,5 \times 0,5 = 5,25 \text{ мА},$$

Где:

$I_{утечки}$ – естественный ток утечки

Правило выбора УЗО (ГОСТ Р 50571.7.704—2019). Установка УЗО должна превышать естественную утечку в 3—6 раз:

$$I_{\Delta n} \geq 6 \times I_{утечки}, \tag{22}$$

где:

$I_{\Delta n}$ – Установка УЗО.

Для:

$$6 \times 5,25 = 31,5 \text{ мА}.$$

– Правила выбора

Номинал УЗО должен быть больше рабочего тока:

- Ближайшее стандартное значение после 10,5 А это 16 А.

Ток утечки:

- 30 мА – безопасный порог для человека (ПУЭ 7.1.79).

Условие выполнено, так как $30 \text{ мА} > 5,25 \text{ мА}$.

–Проверка:

- Допустимая утечка 0.5 мА на 1 А нагрузки будет равна:

$$16 \text{ А} \times 0,0005 \text{ А} = 0,008 \text{ А} = 8 \text{ мА};$$

- УЗО $30 \text{ мА} > 3 \times 8 \text{ мА} = 24 \text{ мА}$ (соответствует ГОСТ Р 50571.7.704).

Если изоляция повреждается, и утечка достигает 25 мА, УЗО отключает цепь за 0,1 сек.

Использование рассчитанного УЗО для модуля подъемного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ позволит обеспечить электробезопасность инженеру исследователю на рабочем месте.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе будет проведена экономическая составляющая выпускной квалификационной работы, а именно расчет себестоимости мостовой схемы подключения тензорезисторов.

Производственная себестоимость продукции включает стоимость материалов, зарплату сотрудников, которые участвуют в производственном цикле, оплату перевозок и хранения на складе и другие расходы (амортизацию оборудования, налоговые отчисления, затраты на рекламу).

При расчете производственной себестоимости мостовой схемы подключения тензорезисторов учтены только основные статьи затрат. В расчет не принимались коммунальные расходы, налоговые отчисления, амортизация оборудования, налог на прибыль.

В общем виде, расчет производственной себестоимости производится по следующей формуле:

$$C = M + T + L_0 + L_{CH}, \quad (23)$$

где M – затраты на материалы;

T – транспортные расходы;

L_0 – основная заработная плата;

L_{CH} – отчисления на социальные нужды.

5.1 Покупные комплектующие материалы

Таблица 12 – Покупные комплектующие материалы

Наименование	Количество	Цена за единицу, у.е.	Стоимость, у.е.
Тензорезистор BF350- 1АА, шт.	3	300,00	900,00
Беспаячная макетная плата (breadboard) 400 точек, для Arduino STM32 NodeMCU Raspberry, шт.	1	200,00	200,00
Arduino Nano V 3.0 mini USB ATMEGA328P CH340, шт.	1	352,00	352,00
Резистор MF (С2-23) 0,25 Вт, 100 Ом, 1%, шт.	2	15,00	30,00
Резистор CF (С1-4) 0,25 Вт, 430Ом, 5 %, шт.	3	20,00	60,00
Перемычка для макетной платы, шт.	14	3,00	42,00
Кабель соединительный PTL 904, шт.	1	301,00	301,00

Наименование	Количество	Цена за единицу, у.е.	Стоимость, у.е.
Изолированный зажим типа крокодил CL4258, 4мм	2	20,00	40,00
BC517 транзистор VJT NPN TO-92, 400Ом, 30Вт, шт.	1	40,00	40,00
Аналогово-цифровой преобразователь МСР3421 I2C 18 бит, шт.	1	540,00	540,00
Провода для пайки, м	0,3	70,00	21,00
Припой для пайки с канифоли 25 гр. 0,8 мм, гр.	0,5	25,00	12,50
Итого:			2530,50

Таким образом, затраты на материалы составили $M=2530,50$ у.е.

5.2 Транспортно-заготовительные расходы

Затраты на доставку материалов до г. Благовещенска транспортной компанией составили $T = 500,00$ у.е.

5.3 Основная заработная плата

Для расчета затрат на заработную плату использованы официальные статистические данные Амурстата за февраль 2025 года, согласно которым среднемесячная заработная плата в научной и технической сфере составила 123056,90 у.е.

Трудоемкость производства мостовой схемы подключения тензорезисторов составляет 8 часов, которые понадобятся сотруднику, чтобы собрать схему и подготовить её к испытаниям.

Отталкиваясь от этого, произведем расчет заработной платы:

$$L_0 = \left(\frac{L}{164,9}\right)t_{изд}, \quad (23)$$

где 164,9 час. – среднемесячная норма рабочего времени в 2025 году;

L – среднемесячная заработная плата;

$t_{изд}$ – трудоемкость изготовления схемы.

Отсюда следует, что заработная плата сотрудника составляет:

$$L_0 = \left(\frac{123056,90}{164,9}\right)8 = 5970,01 \text{ у.е.}$$

5.4 Страховые взносы

В соответствии с законодательством Российской Федерации каждый работодатель ежемесячно платит в бюджет страховые взносы с заработной платы сотрудников. Если они работают по трудовому договору, то это взносы: на обязательное пенсионное страхование; на обязательное медицинское страхование; на социальное страхование от болезней и травм или по материнству; на страхование от несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

В 2025 году тариф взносов на обязательное пенсионное страхование составил – 22 % от заработной платы, на обязательное медицинское страхование – 5,1 %, в ФСС (взносы на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством) – 2,9 %, взносы для защиты при наступлении несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний – 0,2 %. В сумме страховые взносы с заработной платы составляют – 30,2 %.

Тогда страховые взносы с заработной платы сотрудника составляют:

$$L_{CH} = L_0 \times 30,2\% , \tag{24}$$

$$L_{CH} = 5970,01 \times 30,2\% = 1802,94 \text{ у.е.}$$

Рассчитав все величины, входящие в формулу 24, определим себестоимость производства мостовой схемы подключения тензорезисторов:

$$C = 1938,50 + 500,00 + 5970,01 + 1802,94 = 10211,45 \text{ у.е.}$$

В данной главе был произведен экономический расчет себестоимости изготовления мостовой схемы подключения тензорезисторов. Сумма получена с учетом оплаты материальных, транспортных и трудовых затрат, и составила 10211,45 у.е.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы для измерения был выбран тензорезистор BF350-1AA со следующими параметрами, напряжение 5 В, сопротивление 350 Ом, Максимальная допускаемая деформация 0,20%, материал корпуса нержавеющая сталь.

Получены графики зависимости напряжения и деформации от угла наклона стрелы модуля подъёмного механизма СГУ-АТРГ-ГПМ. Полученные значения приблизительно такие же, как и при теоретическом расчёте. Расхождение с теорией получилось небольшим. Разница составила 4-20 %, что объясняется реальными условиями эксплуатации. Что позволяет использовать данный метод для определения напряжения в деформированном состоянии.

В программе Arduino был написан код для обработки и визуализации данных с тензорезистора при разных углах подъёма стрелы.

Выполнен раздел безопасность экологического производства. Был произведен выбор актуальной проблемы, связанной с электробезопасностью, а именно короткое замыкание. Уделено особое внимание мерам электробезопасности инженера исследователя на рабочем месте, согласно ГОСТу, а также был произведен расчет УЗО для определения допустимого напряжения в случае аварийной ситуации.

Экономический расчет затрат на изготовление показал низкую стоимость, которая составила 1 938,50 у.е. Для расчета затрат на заработную плату были использованы официальные статистические данные Амурстата за февраль 2025 года, согласно которым среднемесячная начисленная заработная плата в научной и технической сфере составила 123056,90 у.е.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Володин, Н.М. Пат. РФ №2481669, Российская Федерация, МПК H01L 29/84. Приклеиваемый полупроводниковый тензорезистор / Н.М. Володин, В.В. Каминский, Ю.Н. Мишин, Ю.В. Захаров // Заявка №2011132371/28 от 02.08.2011, опублик. 10.02.2013, бюл. №4

2 ГОСТ 20420-75. Тензорезисторы. Термины и определения: введ. 01.01.1992. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам. Издательство стандартов, 1982.

3 ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия: введ. 01.01.1992. – Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР. Издательство стандартов, 1991.

4 Кобаяси, А. Экспериментальная механика: монография в 2 кн: Кн. 1 / А. Кобаяси // пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 552 с.

5 Промышленный импорт. Датчики силы Kistler [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – Режим доступа: <http://dmliefer.ru/ru/content/kistler> (дата обращения 10.05.2025)

6 Российский рынок промышленных датчиков [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://kipinfo.ru/info/stati/?id=181> (дата обращения 10.05.2025)

7 Серьезнов, А. Н. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте [Текст] / А. Н. Серьезнов, А. К. Шашурин. – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 200 с.

8 Тематический каталог статей. Применение миниатюрных датчиков силы [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <http://www.rusarticles.com/oborudovanie-statya/primenenie-miniaturnykh-datchikov-sily-1545216.html> (дата обращения 10.05.2025)

9 Тензорезистор, А. А. Тензорезисторы и тензодатчики [Электронный ресурс] / А. А. Тензорезистор. – Режим доступа <https://sensor-sms.ru/full-catalogue-2/product/aa> (дата обращения 10.05.2025)

10 Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Амурской области [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа <https://28.rosstat.gov.ru/> (дата обращения 10.05.2025)

11 Учебно-исследовательский комплекс «Гидравлический привод подъемно-транспортных машин» СГУ-ГП-ПТМ-КР-016-15Р-01 [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: https://newstyle-y.ru/high-school/gidro/tipovye-komplekty-uchebnogo-oborudovaniya-po-gidroprivodam/item_10130/ (дата обращения 10.05.2025)

12 Шушкевич, В. А. Основы электротензометрии / В. А. Шушкевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 352 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы «Измерение напряжения с использованием тензорезисторов при разных углах подъёма»

```
#include <HX711.h> // Библиотека для тензодатчиков

// Пины для трех HX711
#define HX711_DT1 2
#define HX711_SCK1 3
#define HX711_DT2 4
#define HX711_SCK2 5
#define HX711_DT3 6
#define HX711_SCK3 7

// Пин потенциометра (угол 0–90°)
const int POTENTIOMETER_PIN = A0;

// Объекты для тензодатчиков
HX711 scale1, scale2, scale3;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Инициализация датчиков
  scale1.begin(HX711_DT1, HX711_SCK1);
  scale2.begin(HX711_DT2, HX711_SCK2);
  scale3.begin(HX711_DT3, HX711_SCK3);

  // Калибровочные коэффициенты (замените на свои!)
  scale1.set_scale(2280.f); // Для датчика 1
```

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
scale2.set_scale(2300.f); // Для датчика 2
scale3.set_scale(2250.f); // Для датчика 3
scale1.tare(); // Обнуление
scale2.tare();
scale3.tare();
// Заголовок для Serial-порта
Serial.println("Угол(град)\tТензо1(мВ)\tТензо2(мВ)\tТензо3(мВ)");
}
void loop() {
// Чтение угла (0–90°)
int angle = map(analogRead(POTENTIOMETER_PIN), 0, 1023, 0, 90);
// Получение данных с тензодатчиков
float voltage1 = scale1.get_units(1) * 0.1; // Пример: 1 ед. = 0.1 МПа
float voltage2 = scale2.get_units(1) * 0.1;
float voltage3 = scale3.get_units(1) * 0.1;
// Вывод в Serial-порт
Serial.print(angle);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(Значение Первого датчика);
Serial.print("\t\t");
Serial.print(Значение Второго датчика);
Serial.print("\t\t");
Serial.println(Значение Третьего датчика);
delay(300); // Интервал между измерениями
}
```