|  |  |
| --- | --- |
| Gerb-BMSTU_01 | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

Информатика и системы управления

ФАКУЛЬТЕТ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Информационные системы и телекоммуникации

КАФЕДРА \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

**К КУРСОВОЙ РАБОТЕ**

**НА ТЕМУ:**

Модуль измерения линейного перемещения на основе потенциометрического датчика **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_***

*группы ИУ3-64Б*

***\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_***

***\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_***

***\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_***

*группы ИУ3-64Б*

*группы ИУ3-64Б*

*группы ИУ3-64Б*

С. В. Быков

ИУ3-62Б

Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

(Группа) (Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

С. С. Баскаков

Руководитель курсовой работы **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

*Н.С. Бульчук*

*Н.С. Бульчук*

*Н.С. Бульчук*

Москва, 2021 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана**

**(национальный исследовательский университет)»**

**(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой \_\_\_ИУ3\_\_\_\_

(Индекс)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_В.В. Девятков\_

(И.О.Фамилия)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение курсовой работы**

по дисциплине \_\_\_\_\_\_Схемотехника электронных устройств\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Студент группы \_\_\_ИУ3-62Б\_\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Быков Сергей Викторович\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Фамилия, имя, отчество)

Тема курсовой работы Модуль измерения линейного перемещения на основе потенциометрического датчика

Направленность КР (учебная, исследовательская, практическая, производственная, др.)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_учебная\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_кафедра\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

График выполнения работы: 25% к 4 нед., 50% к 7 нед., 75% к 10 нед., 100% к 14 нед.

***Задание*** Выполнить анализ известных решений по теме курсовой работы и выбрать наилучший метод реализации устройства измерения линейных перемещений с помощью потенциометрического датчика для достижения следующих характеристик: диапазон измерения от 0 до 20 мм, точность измерения не хуже 0,1 мм, разрешение не хуже 0,01 мм, выходной интерфейс I2C. В качестве первичного преобразователя использовать потенциометрический датчик линейного перемещения. Разработать структурную и функциональную схему устройства и привести их описание. Разработать схему электрическую принципиальную устройства и выполнить расчет ее основных каскадов, описать функционирование устройства по принципиальной схеме. Выполнить моделирование устройства и определить его основные характеристики. Осуществить выбор элементной базы и оформить перечень элементов.

***Оформление курсовой работы:***

Расчетно-пояснительная записка на 30 листах формата А4.

2.2 Перечень графического материала (плакаты, схемы, чертежи и т.п.):

1) схема функциональная на листе формата А3 (ГОСТ 2.702-2011);

2) схема электрическая принципиальная на листе формата А3 (ГОСТ 2.702-2011);

3) перечень элементов на листах формата А4 (ГОСТ 2.702-2011).

Дата выдачи задания « \_\_\_ » \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Руководитель курсовой работы**  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_С.С. Баскаков\_\_\_\_\_

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

**Студент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_**С.В. Быков**\_\_\_\_\_\_\_**

(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Примечание: Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

Оглавление

[Введение 4](#_Toc82713031)

[1 Исследовательский раздел 5](#_Toc82713032)

[**1.1** **Анализ требований** 5](#_Toc82713033)

[**1.2** **Описание предметной области** 5](#_Toc82713034)

[1.2.1 Потенциометрический датчик 5](#_Toc82713035)

[1.2.2 АЦП 8](#_Toc82713036)

[1.2.3 Линейный стабилизатор напряжения 9](#_Toc82713037)

[1.2.4 I2C интерфейс 10](#_Toc82713038)

[1.2.5 Погрешность косвенных измерений 11](#_Toc82713039)

[**1.3** **Выбор и обоснование технического решения** 12](#_Toc82713040)

[**1.4** **Вывод** 12](#_Toc82713041)

[2 Конструкторский раздел 12](#_Toc82713042)

[**2.1** **Выбор компонентов** 12](#_Toc82713043)

[2.1.1 Выбор датчика 12](#_Toc82713044)

[2.1.2 Выбор АЦП 13](#_Toc82713045)

[2.1.3 Выбор линейного стабилизатора напряжения 15](#_Toc82713046)

[2.1.4 Выбор операционного усилителя 15](#_Toc82713047)

[**2.2** **Схема функциональная** 16](#_Toc82713048)

[**2.3** **Расчёт** 16](#_Toc82713052)

[2.3.1 Расчет сопротивления провода 16](#_Toc82713056)

[2.3.2 Расчет RC-фильтра низких частот 17](#_Toc82713057)

[**2.4** **Схема принципиальная** 18](#_Toc82713058)

[2.4.1 Шунтирующие конденсаторы 18](#_Toc82713059)

[2.4.2 Подтягивающие резисторы 19](#_Toc82713060)

[2.4.3 Моделирование устройства 19](#_Toc82713061)

[**2.5** **Расчёт погрешностей** 21](#_Toc82713062)

[2.5.1 Расчет погрешности проводов 21](#_Toc82713063)

[2.5.2 Расчет погрешности косвенных измерений 22](#_Toc82713064)

[Заключение 24](#_Toc82713065)

[Список литературы 25](#_Toc82713066)

# **Введение**

Потенциометрические датчики - предназначены для преобразования линейных или угловых перемещений в электрический сигнал. Представляет собой переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение, его входной величиной является линейное перемещение токосъемного контакта, а выходной величиной – напряжение, снимаемое с этого контакта, изменяющееся по величине при изменении его положения. [[1]](#_Список_литературы_1)

АЦП (Аналого-цифровой преобразователь) - устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). Обратное преобразование осуществляется при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП, DAC). [[2]](#_Список_литературы_1)

Как правило, АЦП - электронное устройство, преобразующее напряжение, ток, сопротивление, емкость и т.д. в двоичный цифровой код. АЦП имеет множество характеристик, из которых основными можно назвать частоту преобразования и разрядность.

Стабилизатор напряжения (англ. Voltage regulator) - электромеханическое или электрическое (электронное) устройство, имеющее вход и выход по напряжению, предназначенное для поддержания выходного напряжения в узких пределах, при существенном изменении входного напряжения и выходного тока нагрузки. [[3]](#_Список_литературы_1)

I2C интерфейс (англ. Inter-Integrated Circuit) - последовательная асимметричная шина для связи между интегральными схемами внутри электронных приборов. Использует две двунаправленные линии связи (SDA и SCL), применяется для соединения низкоскоростных периферийных компонентов с процессорами и микроконтроллерами.[[4]](#_Список_литературы_1)

В данной курсовой ​работе проводится анализ известных решений по проектированию и реализации устройства измерения линейных перемещений с помощью потенциометрического датчика для достижения следующих характеристик:

* диапазон измерения от 0 до 20 мм
* точность измерения не хуже 0,1 мм
* разрешение не хуже 0,01 мм
* выходной интерфейс I2C

# **Исследовательский раздел**

## **Анализ требований**

Основным требованием технического задания является разработка модуля измерения линейного перемещения на основе потенциометрического датчика, который будет отвечать заданным требованиям.

В результате проектирования требуется:

* описать принцип действия всех элементов и устройства в целом;
* разработать и описать структурную схему устройства;
* разработать и описать функциональную схему устройства;
* разработать принципиальную схему и перечень элементов;
* выполнить анализ полученных результатов.

## **Описание предметной области**

### Потенциометрический датчик

Потенциометрические датчики, принцип действия которых заключается в измерении перемещения, соединяются своими подвижными контактами переменного резистора с объектами. После подачи питания на датчик с него снимается сигнал положения движка потенциометра, как с делителя напряжения.

Резистивные датчики перемещения в зависимости от схемы включения преобразователя Rд и нагрузки измерительной цепи Rн подразделяются на потенциометрические и реостатные преобразователи.

Потенциометрический датчик включается по схеме делителя напряжения (рисунок 1 а). Реостатный преобразователь включается последовательно с нагрузкой измерительной цепи (рисунок 1 б).

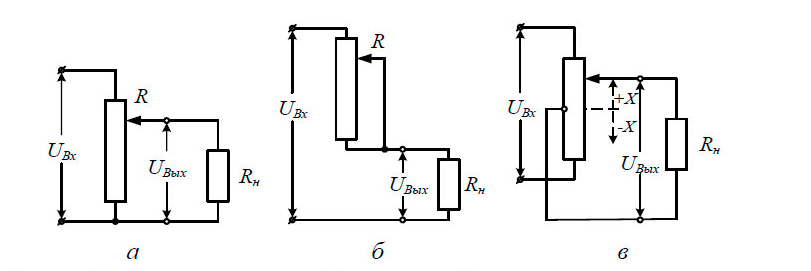


Рисунок 1 – Потенциометрическое (*а*) и реостатное (*б*) включения резистивного датчика перемещения; потенциометр со средним выводом (*в*)

Потенциометрическое включение резистивного преобразователя является наиболее предпочтительным при соотношении Rн>>Rд, реостатное включение требует соразмерности Rн и Rд, а также постоянства значения Rн.

Реверсивные потенциометрические датчики (рисунок 1 в), называемые также потенциометрами со средней точкой, применяются в тех случаях, когда контролируемая величина должна изменяться не только по абсолютному значению, но и по направлению (знаку). Выходная величина таких датчиков (ток или напряжение) может быть положительной или отрицательной – в зависимости от знака изменения контролируемой величины.

Сигнал может сниматься напрямую или с помощью электронной схемы после его обработки и нормализации. Важно, чтобы он соответствовал определенным стандартам.

Устройства состоят из трех основных элементов:

1. Каркас. Изготовлен из теплопроводного изоляционного материала или металла с диэлектрическим покрытием, не меняющий геометрические размеры при нагревании. Форма может быть в виде кольца, изогнутой пластины, стержня.
2. Изолированная обмотка. Выполняется с точной укладкой провода, от шага которой зависит разрешающая способность прибора.
3. Подвижная щетка. В местах ее соприкосновения с обмоткой витки очищены от изоляции. Подвижный контакт в устройствах может перемещаться поступательно или вращательно. В последнем случае устройства могут быть одно- или многооборотного исполнения.

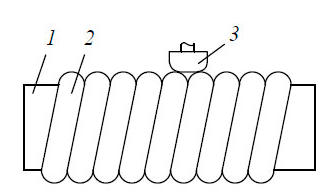


Рисунок 2 – Устройство потенциометрического датчика.

Каркас выполнен обычно плоским или в виде цилиндра. Материалом каркаса может быть изолятор (текстолит, гетинакс, пластмасса, керамика) или металл, покрытый слоем изоляции. Металлические каркасы благодаря лучшей теплопроводности позволяют получить большую мощность электрического сигнала на выходе датчика. В качестве материала для такого каркаса может быть нанесен слой оксидированного алюминия толщиной около 10 мкм.

Металл обмотки обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, стойкостью к коррозии, небольшим влиянием температуры, прочностью на истирание и разрыв. Этим требованиям соответствует манганин, константан, никельхромовые сплавы. Намотка также может быть ламельной или пленочной.

Большой ресурс имеют токопроводящие пластмассы, имеющие также лучшую линейность характеристики. Датчики на их основе применяются там, где требуется высокая надежность.

Контакт щетки изготавливается с добавкой благородных металлов, чтобы они были мягче материала обмотки.

Линейные потенциометры характеризуются линейной зависимостью RX = f(X), которая изображает прямой линией.

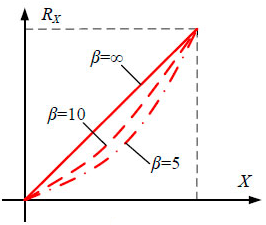


Рисунок 3 – Зависимость RX = f(X) потенциометрического датчика.

Зависимость выходного напряжения Uвых от напряжения U, питающего потенциометр, определяется соотношением величин сопротивлений нагрузки и потенциометра. Выходное напряжение датчика в режиме холостого хода определяется по следующей формуле:

Uвых = IRX = Uвх,

где R – полное сопротивление датчика, RX – сопротивление введенной части потенциометра.

Коэффициент нагрузки β = , если Rн >> R тогда β = ≈ ∞ поэтому током нагрузки можно пренебречь, и зависимость Uвых =f(X) будет также линейной, если β уменьшить то линейность нарушится, самая большая погрешность достигает при нахождении движка в среднем положении.

Если движок потенциометра перемещать по всей его длине в процессе работы, то расчет такого потенциометра нужно вести на максимальную погрешность, которая определяется выражением:

δmax = .

Кроме активного сопротивления у датчиков есть еще динамические нагрузки:

* Передаточная функция.
* Индуктивная составляющая.
* Собственные шумы при переходе подвижного контакта от витка к витку и от вибрации щетки.

Сопротивление между контактом движка и одним из выводов называется выходным. Измеряется его величина, сила тока или напряжение.[[1]](#_Список_литературы)

### АЦП

Для того, чтобы получить с датчика цифровой сигнал, нужно снять сигнал с датчика, а затем оцифровать его. Оцифровка сигнала возможна аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Разрядность АЦП характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе.

Когда необходимо разрешение 12, 14 или 16 разрядов и не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами являются невысокая цена и низкое энергопотребление, то обычно применяют АЦП последовательного приближения. Этот тип АЦП чаще всего используется в разнообразных измерительных приборах и в системах сбора данных.

Аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения (англ. SAR, Successive Approximation Register) измеряет величину входного сигнала, осуществляя ряд последовательных «взвешиваний», то есть сравнений величины входного напряжения с рядом величин.

 В основе АЦП данного типа лежит специальный регистр последовательного приближения. В начале цикла преобразования все выходы этого регистра устанавливаются в логический 0, за исключением первого (старшего) разряда. Это формирует на выходе внутреннего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнал, значение которого равно половине входного диапазона АЦП. А выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе ЦАП и измеряемым входным напряжением.

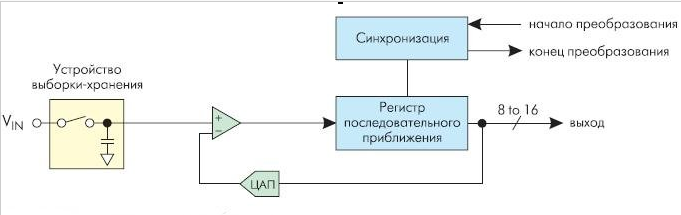


Рисунок 4 – Структурная схема АЦП последовательного приближения

Таким образом, АЦП последовательного приближения состоит из следующих узлов:

* Компаратор. Он сравнивает входную величину и текущее значение «весового» напряжения (на рисунке 4 обозначен треугольником).
* Цифро-аналоговый преобразователь (англ. Digital to Analog Converter, DAC). Он генерирует «весовое» значение напряжения на основе поступающего на вход цифрового кода.
* Регистр последовательного приближения (англ. Successive Approximation Register, SAR). Он осуществляет алгоритм последовательного приближения, генерируя текущее значение кода, подающегося на вход ЦАП. По его названию названа вся данная архитектура АЦП.
* Схема выборки-хранения (англ. Sample/Hold, S/H). Для работы данного АЦП принципиально важно, чтобы входное напряжение сохраняло неизменную величину в течение всего цикла преобразования. Однако «реальные» сигналы имеют свойство изменяться во времени. Схема выборки-хранения «запоминает» текущее значение аналогового сигнала, и сохраняет его неизменным на протяжении всего цикла работы устройства. [[2]](#_Список_литературы)

### Линейный стабилизатор напряжения

Линейный стабилизатор напряжения представляет собой делитель напряжения, на вход которого подаётся входное (нестабильное) напряжение, а выходное (стабилизированное) напряжение снимается с нижнего плеча делителя. Стабилизация осуществляется путём изменения сопротивления одного из плеч делителя: сопротивление постоянно поддерживается таким, чтобы напряжение на выходе стабилизатора находилось в установленных пределах.

Преимущество линейного стабилизатора — простота, отсутствие помех и небольшое количество используемых электронных компонентов.

В зависимости от включения элемента с изменяемым сопротивлением линейные стабилизаторы классифицируются на два типа:

* Последовательный: регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой.
* Параллельный: регулирующий элемент включен параллельно нагрузке.

В зависимости от способа стабилизации:

* Параметрический: в таком стабилизаторе используется участок ВАХ прибора, где дифференциальное сопротивление прибора мало в широком диапазоне изменения токов, протекающих через прибор.
* Компенсационный: имеет обратную связь. В нём напряжение на выходе стабилизатора сравнивается с эталонным, из разницы между ними формируется управляющий сигнал для регулирующего элемента.[[3]](#_Список_литературы)

### I2C интерфейс

Интерфейс I2C является широко распространенным и популярным стандартом передачи данных между устройствами. Данный интерфейс поддерживают множество различных датчиков и микросхем, наиболее известные это микросхемы EEPROM памяти серии 24cXX. Для передачи данных используются всего две линии, которые представляют собой шину данных, причем на одну шину можно подключать несколько различных устройств

Интерфейс представляет собой две линии: одна (англ. SDA, англ. Serial Data) используется для передачи данных, другая (англ. SCL, англ. Serial Clock) – для тактовых сигналов. Стандартные напряжения +5 В или +3,3 В, однако допускаются и другие. Через резисторы R1, R2 обе линии подключены к источнику питания VCC. Выходы устройств выполнены по схеме с открытым коллектором (стоком), что позволяет реализовать функцию «монтажное И» для выходных сигналов. Низкий уровень сигнала логического О на выходе любого из устройств устанавливает низкий уровень на всей линии. Высокий уровень на линии устанавливается, когда выводы всех устройств находятся в третьем (высокоимпедансном) состоянии.

Устройство, подключенное к шине, может иметь статус ведущего (master) или ведомого (slave). Статус микроконтроллера устанавливается программно.

Такты на линии SCL генерирует ведущий. Линией SDA могут управлять как ведущий, так и ведомый в зависимости от направления передачи. Единицей обмена информации является пакет, обрамленный уникальными условиями на шине, именуемыми стартовым и стоповым условиями. Ведущий в начале каждого пакета передает один байт, где указывает адрес ведомого и направление передачи последующих данных. Данные передаются 8-битными словами. После каждого слова передается один бит подтверждения приема приемной стороной.

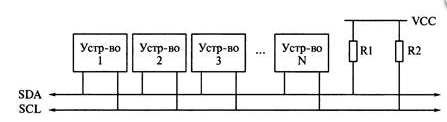


Рисунок 5 – Принцип работы I2C

Классическая адресация включает 7-битное адресное пространство с 16 зарезервированными адресами. Это означает, что разработчикам доступно до 112 свободных адресов для подключения периферии на одну шину.

Основной режим работы — 100 кбит/с; 10 кбит/с в режиме работы с пониженной скоростью. Также немаловажно, что стандарт допускает приостановку тактирования для работы с медленными устройствами. [[4]](#_Список_литературы)

### Погрешность косвенных измерений

Погрешности характеризуют точность измерений (показывают, насколько близок результат измерений к истинному значению). Их необходимо указывать, чтобы правильно использовать результаты измерений. Данные измерений записывают в виде:

, либо: при ….

Эти записи означают, что истинное значение X измеряемой физической величины лежит в интервале x − ∆x ≤ X ≤ x + ∆x. Чем меньше погрешность, тем выше точность измерений, выше доверие к таким измерениям.

Измерения бывают прямые и косвенные. Прямыми называют измерения, при которых значение физического параметра находят непосредственно из опыта, с помощью тех или иных приборов, регистрирующих этот параметр. Однако не всегда и не все физические параметры можно измерить непосредственно с помощью приборов. Косвенными называют измерения, когда исследуемый физический параметр вычисляется по известной формуле, связывающей этот параметр с данными прямых измерений других параметров.

Допустим интересующий нас физический параметр L можно вычислить по формуле

,

где X, Y, Z – истинные значения физических параметров, которые не зависят друг от друга и измеряются непосредственно.

В результате прямых измерений можно установить:

,   
,

.

Тогда наилучшей оценкой параметра L является

.

Оценку погрешности можно рассчитать по формуле

,

где обозначает частную производную функции по переменной [[9]](#_Список_литературы_1).

## **Выбор и обоснование технического решения**

На основании проанализированных выше составляющих элементов устройства спроектирована следующая электрическая структурная схема, определяющая основные функциональные части устройства, их назначения и взаимосвязи.

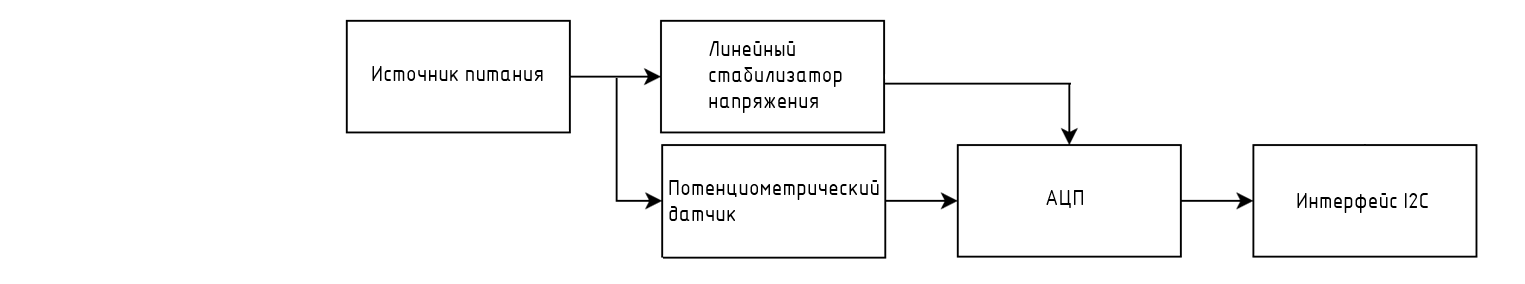


Рисунок 6 – Структурная схема

Внешний источник питания подключен к линейному стабилизатору напряжения и к потенциометрическому датчику. Линейный стабилизатор напряжения подключён к разъему питания АЦП. Линейный потенциометр подключен к аналоговому выходу АЦП. АЦП подключен к выходному интерфейсу I2C.

## **Вывод**

Проведено исследование принципов работы компонентов. Разработана и описана структурная схема.

# **Конструкторский раздел**

## **Выбор компонентов**

### Выбор датчика

Для начала нужно выбрать датчик. Исходя из заданных требований, хорошо подходит линейный потенциометр LF 025 5K.[[5]](#_Список_литературы) Результат измерений датчика является абсолютным, поскольку используется потенциометрический принцип измерений, выходной сигнал всегда пропорционален положению штока. Как заявляет производитель характеристики здесь следующие:

|  |  |
| --- | --- |
| Диапазон измерения | 25мм |
| Напряжение питания | 0 – +42В (DC) |
| Номинальное сопротивление | 5кОм |
| Повторяемость | 0,01мм |
| Температурный диапазон работы | -30 – +100°C |
| Выход | Делитель напряжения |
| Уровень защиты | IP40 |

Таблица 1 – Основные характеристики потенциометрического датчика

Данный датчик не имеет характеристики «точность», так как является промышленным. Вместо «точности» можно использовать характеристику «повторяемость». Повторяемость - это максимальная разность выходных сигналов при многократном измерении одной и той же номинальной нагрузки в одинаковых условиях нагружения и окружеющей среды. Данная характеристика подходит под наши требования.

### Выбор АЦП

Разрядность АЦП была подобрана из условия, что разрешение датчика имеет значение 0,01 мм, что означает в свою очередь уровни квантования при диапазоне измерения 25 мм необходимо 2500.

Так же, стоит учитывать реально достижимое разрешение описывается эффективной разрядностью (англ. effective number of bits — ENOB), которая меньше, чем реальная разрядность АЦП

Таким образом, АЦП можно подбирать, начиная с 12 бит и больше.

Нам потребуется АЦП с одним каналом (одноканальный), так как в задании указано линейное перемещение, и такой АЦП, который будет иметь интерфейс I2C.

Исходя из вышеперечисленных параметров, был выбран АЦП MCP3221 [[6]](#_Список_литературы)

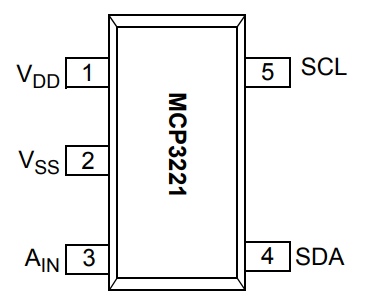


Рисунок 7 – Входы/выходы АЦП

Устройство MCP3221 представляет собой одноканальный аналого-цифровой преобразователь c 12-ти битным разрешением. Этот преобразователь основан на последовательном приближении. MCP3221 вывод VDD по отношению к VSS обеспечивает питание устройства, а также опорное напряжение для процесса преобразования. MCP3221 работает на однополярном напряжении питания, которое работает в широком диапазоне от 2,7 В до 5,5 В.

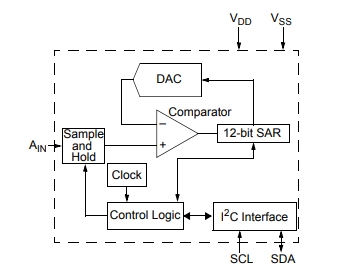


Рисунок 8 – Функциональная схема

Эффективная разрядность выбранного АЦП подходит к параметрам.

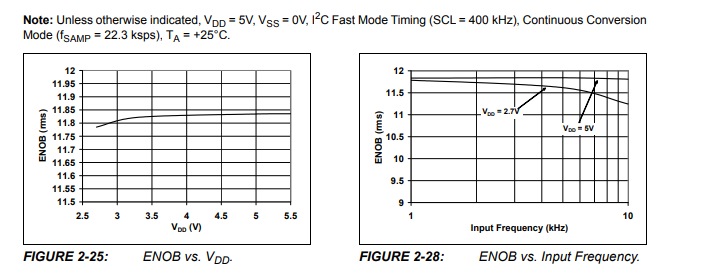


Рисунок 9 – Зависимость напряжения питания от эффективной разрядности

Таким образом, данный АЦП подходит под наши требования.

|  |  |
| --- | --- |
| Диапазон входных значений Ain | VSS-0,3 – VDD+0,3В |
| Напряжение питания VDD | +2,7 – +5,5В |
| Разрядность АЦП | 12 бит |
| Линейность АЦП | Линейный |
| Интерфейс для передачи цифрового сигнала | I2C |
| Количество каналов АЦП | 1 |
| Опорное напряжение | Напряжение питания |
| Температурный диапазон работы | -40 – +125°C |

Таблица 2 – Основные характеристики АЦП

### Выбор линейного стабилизатора напряжения

Для нашего решения хорошо подойдёт LDO линейный стабилизатор напряжения L4940V5. [[7]](#_Список_литературы)

12-битный АЦП (в нашем случае), и это значит, что любое напряжение на аналоговом входе в диапазоне от 0 до 5 вольт будет преобразовано в число с точностью 1/4096 вольта.

L4940V5 даёт на выходе 5,0В, отличающиеся высокой точностью, стабильностью. Обеспечивает стабильное выходное напряжение в широком диапазоне напряжений питания.

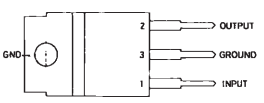


Рисунок 10 – Входы/выходы AD1585B

ИОН имеет следующие характеристики:

|  |  |
| --- | --- |
| Диапазон входных значений Vin | 7В – 17В |
| Выходное значение Vout | +5В |
| Диапазон рабочих температур | - 40 – +150°С |
| Точность | 4% |

Таблица 3 – Основные характеристики линейного стабилизатора напряжения

### Выбор операционного усилителя

Используем буферный повторитель на операционном усилителе для согласования входных/выходных сопротивлений и минимизации искажений сигнала на входе АЦП. Был выбран операционный усилитель OPA244UA [[17]](#_Список_литературы_1), обладающий следующими параметрами:

|  |  |
| --- | --- |
| Диапазон напряжения питания Vs | +2,2 – +36В |
| Диапазон входных значений Vin | Vs min -0,3В – Vs max +0,3В |
| Диапазон рабочих температур | - 40 … +85°С |

Таблица 4 – Основные характеристики ОУ

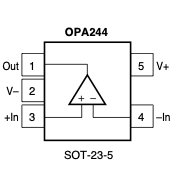


Рисунок 11 – Входы/выходы OPA224UA

## **Схема функциональная**

В соответствии с подобранными компонентами и с учетом электрической структурной схемы разработана электрическая функциональная схема устройства.

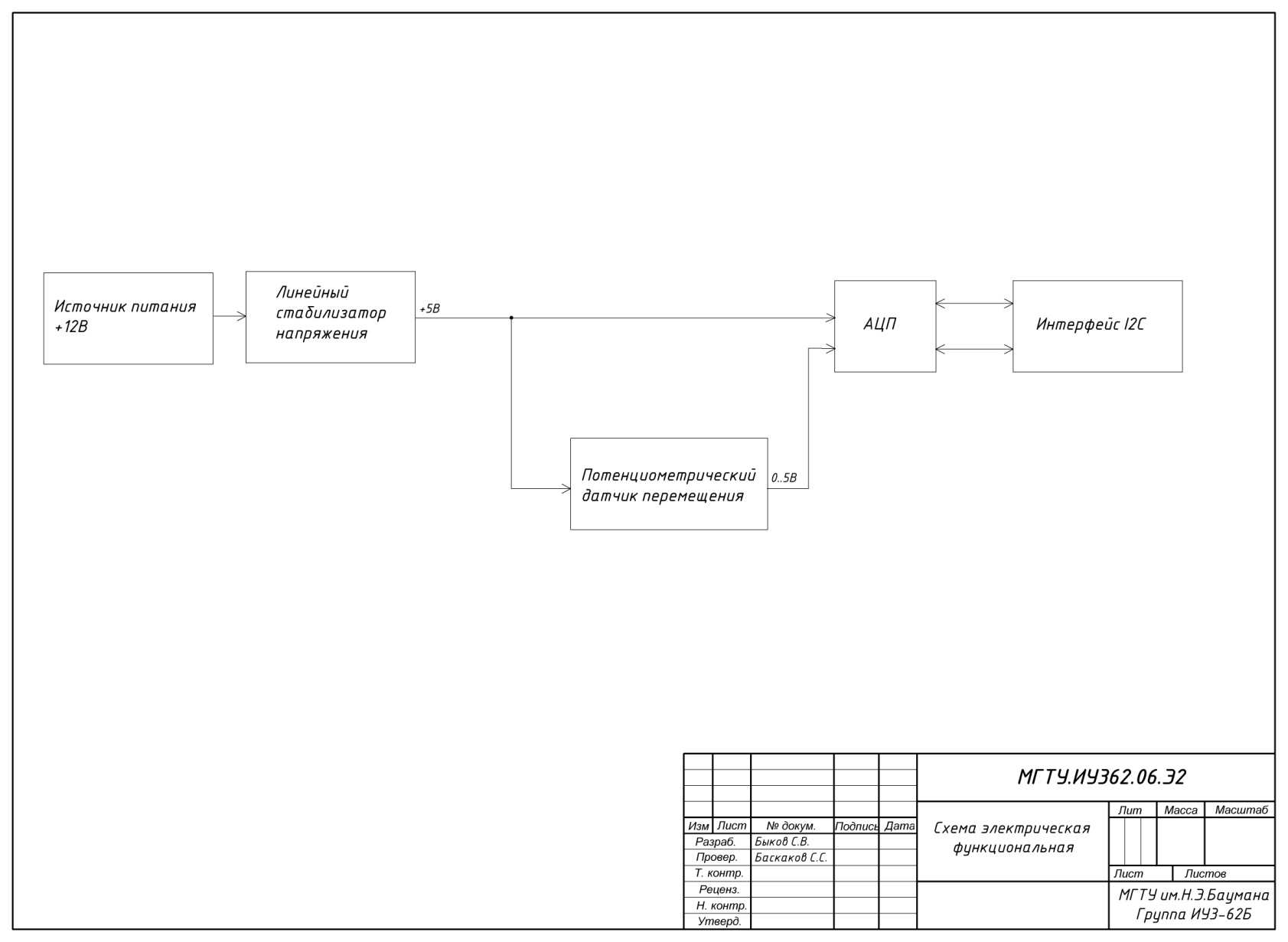


Рисунок 12 – Электрическая функциональная схема

Полное описание функционирования схемы будет приведено после принципиальной схемы.



## **Расчёт**

При проектировании принципиальной схемы возникли трудности, о которых рассказано ниже:



### Расчет сопротивления провода

R провода зависит от:

* Удельного сопротивления (ρ);
* Площади сечения (S);
* Длины (L);
* Температуры (α).

α – табличное значение.

Для меди α = 0,004 [].

Удельное сопротивление ρ рассчитаем по следующей формуле:

*,* где

– удельное сопротивление меди при 20 °C (табличное значение);

T – температура проводника (максимальная);

– константа.

Тогда:

.

Длина проводника L равна 2 м, площадь сечения S 0,14 . Формула сопротивления провода длиной L и площадью сечения S:

,

.

### Расчет RC-фильтра низких частот

Необходимо обеспечить фильтрацию частот от внешнего источника питания для устранения влияния паразитной частоты на код АЦП. Стандартная частота, которая используется во внешней сети равна 50 Гц.

Формула для расчета частоты среза RC-фильтра:

, где

,

,

.

Возьмем частоту среза с запасом и примем ее равной 20 Гц, а емкость конденсатор равной 1 мкФ[[14]](#_Список_литературы_1). Так как в проектируемой схеме используется низкие частоты, то влияние сопротивления конденсатора на входное сопротивление ничтожно мало и им можно пренебречь.

Используя значения частоты среза f и значение конденсатора C, мы можем найти значение резистора фильтра низких частот R:

.

Подставим значения и получим

.

Примем номинал резистора R равным 8,2 кОм – стандартное значение номинала[[11]](#_Список_литературы_1).

## **Схема принципиальная**

После всех расчётов была разработана электрическая принципиальная схема.

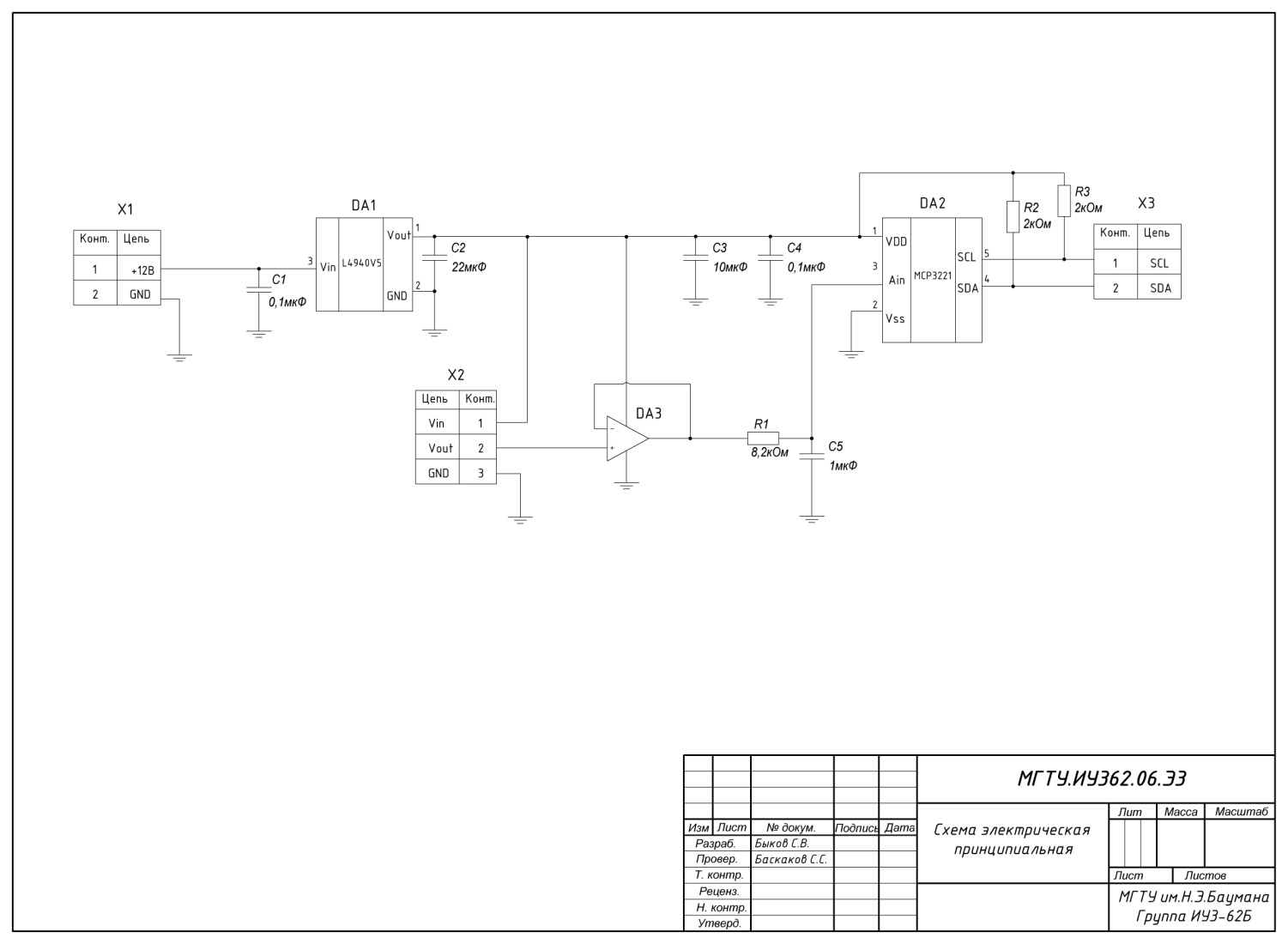
****

Рисунок 13 – Схема электрическая принципиальная

С источника питания (X1) непосредственно на линейный стабилизатор напряжения (DA1) поступает напряжение +12В, которое понижается до +5В и тем самым питает АЦП (DA2) и операционный усилитель (DA3), а также датчик (X2). С датчика (X2) выходит аналоговый сигнал (0…5В), который походит через буферный повторитель и поступает на вход АЦП. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой и отдаёт на интерфейс I2C (X3).

### Шунтирующие конденсаторы

Для обеспечения правильной работы микросхем, а также сглаживания пульсаций и устранения различных шумов, которые могут исходить от других микросхем, на входах питания микросхем ставят шунтирующие конденсаторы. На вход по питанию в практике принято ставить два параллельных конденсатора номиналом 10 мкФ[[15]](#_Список_литературы_1) и 0.1 мкФ[[12]](#_Список_литературы_1) соответственно. Два конденсатора ставится с целью того, что реальные конденсаторы могут по-разному работать на разных частотах.

Также конденсаторы необходимы на выходе и входе стабилизатора напряжения. Их значения рекомендованы в технической спецификации [[7]](#_Список_литературы_1). Номинал входного конденсатора равен 0,1 мкФ[[12]](#_Список_литературы_1). Номинал выходного конденсатора равен 22 мкФ[[13]](#_Список_литературы_1).

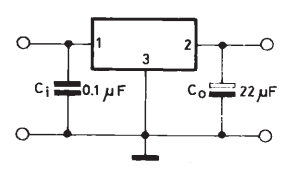


Рисунок 14 – Схема подключения шунтирующих конденсаторов к источнику опорного напряжения.

### Подтягивающие резисторы

Для линий интерфейса I2C необходимы подтягивающие резисторы – для подтяжки линии к питанию (установка единицы). Номинал резисторов влияет на скорость передачи данных. Чем больше номинал резисторов, тем меньше скорость передачи данных. Их значения рекомендованы в технической спецификации. Номиналы подтягивающих резисторов равны 2кОм[[10]](#_Список_литературы_1).

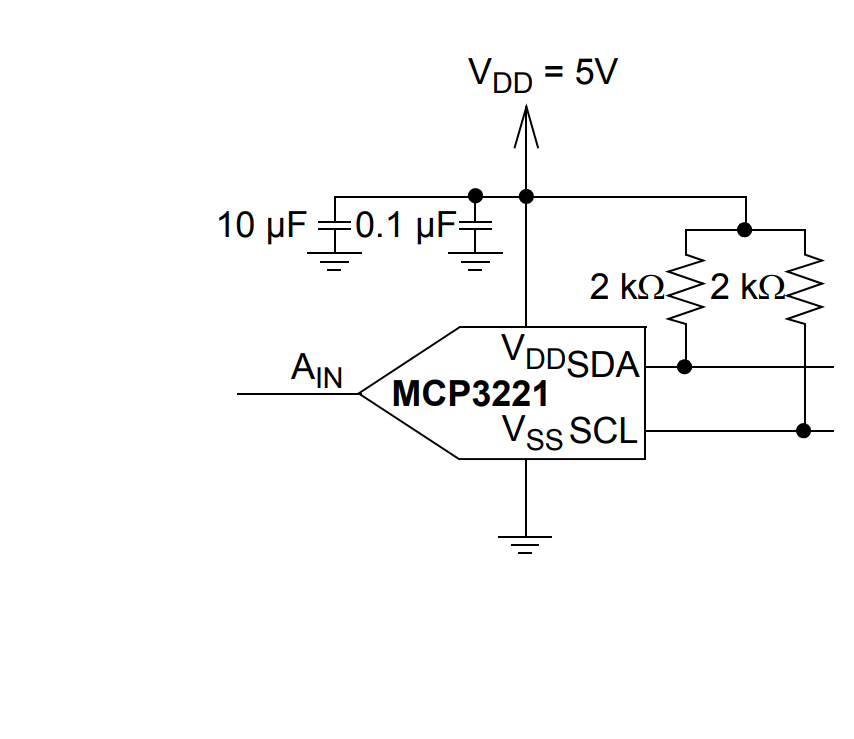


Рисунок 15 – Схема подключения шунтирующих конденсаторов и подтягивающих резисторов к АЦП.

### Моделирование устройства

Произведем моделирование схемы в Multisim. В качестве потенциометрического датчика перемещения возьмем делитель напряжения.

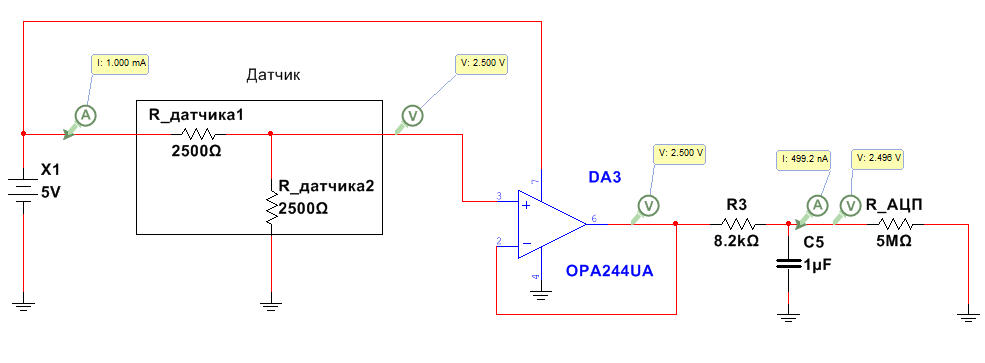


Рисунок 16 – Результат симуляции при среднем положении штока.

Рассчитаем схему и сравним с результатами симуляции.

Для датчика выходное напряжение будет рассчитываться по формуле:

Uвых\_датчика = ,

Uвых\_датчика =

Напряжение на входе АЦП должно быть рассчитано с учетом ФНЧ.

IАЦП = = = 499нА

Тогда напряжение на входе АЦП найдем по формуле:

Uвх\_АЦП = Uвых\_датчика – UR3, где

UR3 = IАЦП\*R3 = 499нА\*8200Ом = 0,004В

Uвх\_АЦП =2,5В – 0,004В = 2,496В

Схема работает корректно. Результаты симуляции сошлись с расчетами.

Произведем аналогичные расчеты, но изменим положение штока.

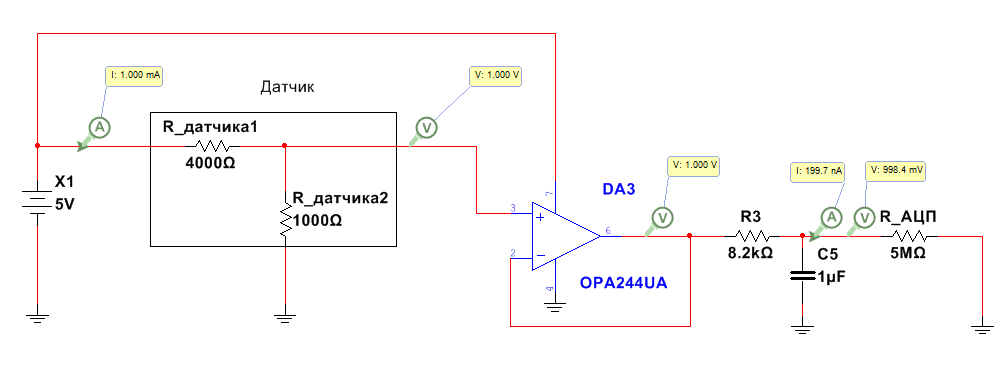


Рисунок 17 – Результат симуляции.

Для датчика выходное напряжение будет рассчитываться по формуле:

Uвых\_датчика = ,

Uвых\_датчика =

Напряжение на входе АЦП должно быть рассчитано с учетом ФНЧ.

IАЦП = = = 199нА

Тогда напряжение на входе АЦП найдем по формуле:

Uвх\_АЦП = Uвых\_датчика – UR3, где

UR3 = IАЦП\*R3 = 199нА\*8200Ом = 1,6мВ

Uвх\_АЦП =1В – 1,6мВ = 998,4мВ

Схема работает корректно. Результаты симуляции сошлись с расчетами.

Произведем аналогичные расчеты, но изменим положение штока.

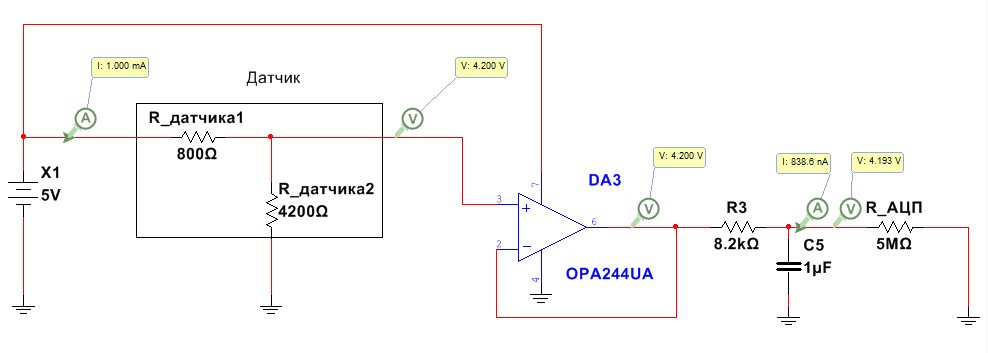


Рисунок 18 – Результат симуляции.

Для датчика выходное напряжение будет рассчитываться по формуле:

Uвых\_датчика = ,

Uвых\_датчика =

Напряжение на входе АЦП должно быть рассчитано с учетом ФНЧ.

IАЦП = = = 838нА

Тогда напряжение на входе АЦП найдем по формуле:

Uвх\_АЦП = Uвых\_датчика – UR3, где

UR3 = IАЦП\*R3 = 838нА\*8200Ом = 0,0068В

Uвх\_АЦП =4,2В – 0,0068В = 4,1932В

Схема работает корректно. Результаты симуляции сошлись с расчетами.

Небольшая погрешность объясняется не идеальностью компонентов схемы. Данная погрешность не влияет на правильность работы схемы, так как изменения незначительны.

## **Расчёт погрешностей**

Все данные взяты из технической документации к элементам. [[5],[6],[7]](#_Список_литературы_1)

### Расчет погрешности проводов

Рассмотрим эквивалентную схему потенциометрического датчика:

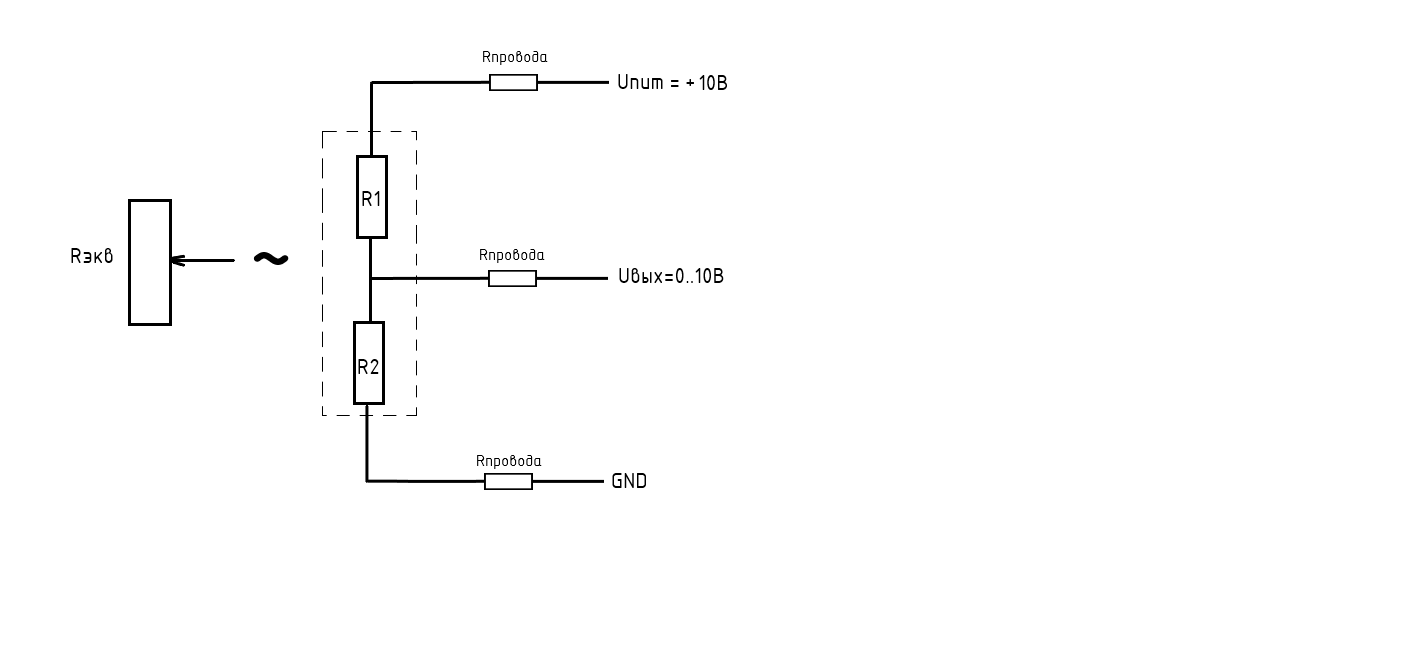


Рисунок 19 – Эквивалентная схема

Номинальное сопротивление потенциометрического датчика – Rэкв = 5 кОм, а сопротивление проводов Rпровода = 0,32 Ом.

Рассчитаем ток, текущий через датчик:

I = = = 0,000999872А

Теперь можно узнать погрешность, вносимую проводом:

Uпров = 0, 000999872А\*0,32Ом = 0,00032В

### Расчет погрешности косвенных измерений

Погрешность косвенных измерений — погрешность вычисляемой (не измеряемой непосредственно) величины. Если ƒ (….), где— непосредственно измеряемые независимые величины, имеющие погрешность ∆ то:

Погрешность стабилизатора напряжения: [[7]](#_Список_литературы_1).

Интегральная нелинейность АЦП: ±2LSB [[6]](#_Список_литературы_1)

Дифференциальная нелинейность АЦП: ±1LSB [[6]](#_Список_литературы_1)

Погрешность АЦП будет складываться из интегральной, дифференциальной нелинейности и ошибки квантования, которая составляет LSB/2 = 0,5. Так как распределены они случайным образом, общая ошибка в разрядах составит:

Составим формулу, в которой будет описана зависимость перемещения (от 0 до 25 мм) от опорного напряжения, напряжения питания, сопротивления проводов и кода АЦП.

, где

– напряжение на датчике, – напряжение питания, измеряемая величина, коэффициент преобразования, – погрешность проводов.

Коэффициент преобразования – это отношение выходной величины к входной. В данном случае, при перемещении штока датчика на 1мм, напряжение выхода будет изменяться на 200мВ.

,

Функция выходного кода АЦП

,

где n-разрядность АЦП

Подставим

,

Так как напряжение питания равно опорному напряжению, то их можно сократить

Выразим s

+

Рассчитаем частные производные

Итоговая формула будет иметь вид

=

= = 0.013976906095

Из продемонстрированных расчетов видно, что требуемая по заданию точность в 0.1 мм не нарушена.

# **Заключение**

В результате работы были спроектированы и проанализированы структурная, функциональная и принципиальная схема устройства, удовлетворяющие техническому заданию.

Подробно были изучены и подобраны компоненты схемы.

Рассчитаны погрешности.

Результатом данной курсовой работы является настоящая расчетно-пояснительная записка, а также приложения к ней. Также стоит отметить, что данное задание позволило на практике применить задания, полученные на курсах по схемотехнике электронных устройств и электронике, прочитанных ранее.

# 

# **Список литературы**

1. Потенциометрические датчики

<https://правомосквы.рф/vse-stati/potentsiometricheskij-datchik.html> – Дата обращения: 02.03.2021.

<https://mirmarine.net/elektromekhanik/sudovaya-avtomatika/974-datchiki-peremeshcheniya-i-polozheniya#Potentiometric-sensor> – Дата обращения: 02.03.2021.

1. Аналого-цифровой преобразователь

<https://ru.bmstu.wiki/АЦП_(Аналого-цифровой_преобразователь)> – Дата обращения: 02.03.2021.

<https://habr.com/ru/post/125029/> – Дата обращения: 02.03.2021.

1. Стабилизатор напряжения

<https://ru.wikipedia.org/wiki/Стабилизатор_напряжения> – Дата обращения: 04.03.2021.

1. Интерфейс I2C

<https://ru.bmstu.wiki/I²C_(Inter-Integrated_Circuit_Bus)> – Дата обращения: 04.03.2021.

<http://nauchebe.net/2011/03/obmen-dannymi-po-interfejsu-i2c-twi-na-mk-avr/> – Дата обращения: 04.03.2021.

<https://radiolaba.ru/microcotrollers/i2c-interfeys.html> – Дата обращения: 04.03.2021.

1. Датчик LF 025 5K

<https://www.sensor-systems.ru/userfiles/files/LF%20RU.pdf> – Дата обращения: 10.04.2021.

1. АЦП MCP3221

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001732E.pdf> – Дата обращения: 12.04.2021.

1. Линейный стабилизатор напряжения

<https://static.chipdip.ru/lib/238/DOC000238011.pdf> – Дата обращения: 12.04.2021.

1. Расчёт погрешности АЦП

<http://www.labfor.ru/articles/dip/5> – Дата обращения: 25.04.2021.

1. Погрешность косвенных измерений

<https://phys.vsu.ru/~meremianin/pdfs/Pogreshnosti.pdf> – Дата обращения: 25.04.2021.

1. Резистор 2кОм ERJ-UP3F2001V

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/Panasonic/ERJ-UP3F2001V?qs=GedFDFLaBXGCDmErJyclfQ%3D%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Резистор 8.2кОм ERJ-UP3F8201V

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/Panasonic/ERJ-UP3F8201V?qs=GedFDFLaBXE%2F9ze66GTDYA%3D%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Конденсатор 0.1мкФ C1608X5R1H104K080AA

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/TDK/C1608X5R1H104K080AA?qs=NRhsANhppD%2Fot2mSfg3j9A%3D%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Конденсатор 22мкФ C1608X5R1A226M080AC

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/TDK/C1608X5R1A226M080AC?qs=dfay7wIA1uED3Fb1o4f9Dg%3D%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Конденсатор 1мкФ C1608X5R1E105K080AC

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/TDK/C1608X5R1E105K080AC?qs=NRhsANhppD9KvcnEkFA5Bw%3D%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Конденсатор 10мкФ C1608X5R1A106K080AC

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/TDK/C1608X5R1A106K080AC?qs=sGAEpiMZZMsh%252B1woXyUXj0VscQlT5uEBt62LfE5a1mE%3D> – Дата обращения: 12.05.2021.

1. Источник питания БПС30В

<https://static.chipdip.ru/lib/774/DOC005774622.pdf> – Дата обращения: 23.05.2021.

1. Операционный усилитель OPA244UA

<https://ru.mouser.com/ProductDetail/Texas-Instruments/OPA244UA?qs=JS6RUWRH9DWkluUFyYdOdQ%3D%3D> – Дата обращения: 05.06.2021.