

АННОТАЦИЯ

Смирнов М.В. Система управления шестикоординатным устройством позиционирования с беспроводным каналом передачи информации. – Челябинск: ЮУрГУ, МС; 2019, 122 с., 38 ил., 11 таблиц, библиогр. список – 24 наим., 13 прил., 8 листов чертежей.

После анализа шестикоординатного позиционирующего устройства было решено разработать систему управления для данного устройства.

Объект автоматизации уже содержал в себе исполнительные элементы и датчики обратной связи. На их основе была разработана система управления шестикоординатным устройством позиционирования с беспроводным каналом передачи информации.

Разработанная система управления позволит управлять объектом с ПК.

В пояснительной записке представлена разработанная кинематическая схема шестикоординатного позиционирующего устройства, функциональная схема системы управления, схемы электрические принципиальные блоков системы управления, чертежи печатной платы и печатного узла, алгоритм работы системы управления, листинги ПО для блоков системы управления, результаты функционального тестирования системы управления.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ.....	8
1.1 Описание шестикоординатного позиционирующего устройства	8
1.2 Цели и задачи автоматизации.....	14
2 РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА.....	15
2.1 Анализ количества степеней свободы	15
2.2 Построение кинематической модели.....	16
2.3 Расчет предельного угла отклонения штанг	19
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ.....	22
3.1 Анализ сигналов емкостной матрицы	22
3.2 Сборка испытательного стенда	26
4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ.....	28
4.1 Разработка структурной схемы	28
4.2 Описание центрального блока управления.....	30
4.2.1 Каскад сброса.....	31
4.2.2 Каскад линейных стабилизаторов.....	32
4.3 Модуль беспроводной передачи информации.....	33
4.4 Описание блока управления электродвигателем.....	35
4.4.1 Каскад согласования логических уровней	36
4.4.2 Выходной транзисторный каскад	37
4.5 Разработка блока приема/передачи информации	39
4.5.1 Общие сведения о блоке приема/передачи.....	39
4.5.2 Микроконтроллер	40
4.5.3 Преобразователь интерфейсов USB-UART	41
4.5.4 Разработка схемы электрической принципиальной.....	42
4.5.5 Разработка печатной платы	43
4.5.6 Разработка печатного узла.....	46
5 ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ.....	47

5.1	Постановка задачи управления	47
5.2	Закон регулирования	48
5.3	Метод управления электродвигателями.....	51
6	РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	56
6.1	Разработка подпрограммы считывания информации с датчиков ОС.....	56
6.2	Разработка программы управления мотор-редуктором.....	58
6.3	Тестирование системы управления шестикоординатного устройства.....	60
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	67
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Схема кинематическая структурная.....	69
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Схема комбинированная структурная.....	71
	ПРИЛОЖЕНИЕ В Центральный блок управления систему управления шестикоординатным устройством позиционирования. Схема электрическая принципиальная.....	73
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г Блок управления электродвигателем системы управления шестикоординатным устройством позиционирования. Схема электрическая принципиальная.....	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д Блок приема/передачи информации системы управления шестикоординатным устройством позиционирования. Схема электрическая принципиальная.....	79
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е Блок приема/передачи информации системы управления шестикоординатным устройством позиционирования. Плата печатная.....	82

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Блок приема/передачи информации системы управления шестикоординатным устройством позиционирования. Узел печатный.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ З Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Алгоритм работы.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ И Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Листинг программы считывания информации с датчика.....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ К Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Листинг программы управления электродвигателем.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Листинг программного кода для МК ATmega8A....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ М Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Листинг программного кода для МК Atmega162...	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Система управления шестикоординатным устройством позиционирования. Листинг программного кода для МК ATtiny20.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Разработка системы управления шестикоординатным устройством позиционирования уже затрагивалась в одной из ВКР прошлых лет [1]. Тогда студенту в ходе выполнения ВКР удалось проанализировать объект автоматизации, разработать электрические принципиальные схемы отдельных блоков системы управления, разработать чертежи печатных плат для блоков, чертежи печатных узлов для блоков, а также предоставить технико-экономическое обоснование для данного устройства.

В данной пояснительной записке представлены дальнейшие этапы разработки и тестирования системы управления шестикоординатным устройством с беспроводным каналом передачи информации.

1 АНАЛИЗ ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1 Описание шестикоординатного позиционирующего устройства

Объект автоматизации представляет собой устройство с параллельной кинематикой.

Объект состоит из двух тел:

- тело «Корпус»;
- тело «Подвижный элемент».

Внешний вид объекта автоматизации изображен на рисунке 1.1.

Устройство предназначена для позиционирования (т.е. придание определенного положения) подвижного элемента относительно неподвижного корпуса.

Тело «Корпус» состоит из рамы и двух неподвижных платформ, верхней и нижней.



Рисунок 1.1 – Внешний вид объекта автоматизации

Тело «Подвижный элемент» представляет собой цилиндр. К торцам цилиндра присоединены круглые металлические пластины, на которых установлены шесть измерительных узлов и шесть электродвигателей (по три узла и электродвигателя на каждой пластине).

Измерительный узел предназначен для определения текущей длины штанги, в данном устройстве измерительный узел исполняет роль датчика обратной связи (ОС).

Электродвигатели в данном устройстве предназначены для изменения длин штанг.

На рисунках 1.2 и 1.3 отображено расположение измерительных узлов и электродвигателей на пластинах.

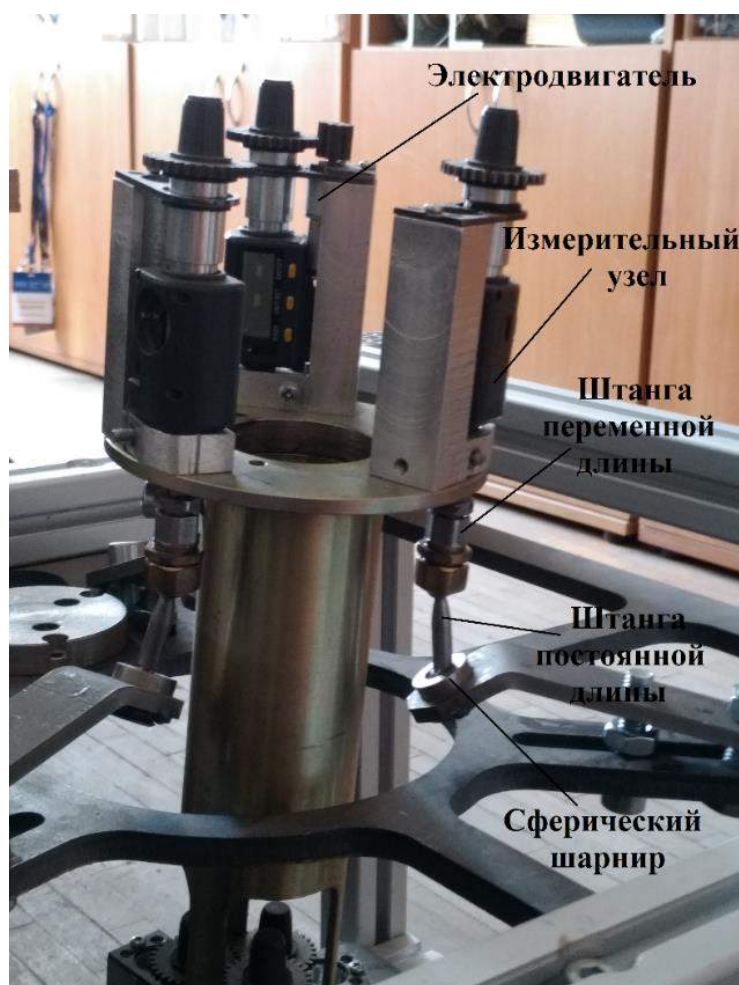


Рисунок 1.2 – Измерительные узлы и электродвигатели на верхней пластине



Рисунок 1.3 – Измерительные узлы и электродвигатели на нижней пластине

Связь подвижного элемента с корпусом осуществляется за счет шести штанг постоянной длины и шести штанг переменной длины.

Штанга переменной длины одним концом жестко соединена с измерительным узлом. Другим концом соединяется со штангой постоянной длины при помощи сферического шарнира.

Изменение длины штанги осуществляется за счет использования винтовой кинематической пары т.е. передачи «Винт-Гайка».

Штанга постоянной длины с одной стороны соединена с неподвижной платформой при помощи сферического шарнира, а с другой, как уже говорилось, со штангой переменной длины.

На неподвижных платформах сферические шарниры, смещены друг относительно друга на 120° , сферические шарниры на верхней и нижней платформах смещены относительно друг друга на 60° .

Измерительный узел представляет собой видоизмененный цифровой микрометр MDC-25MX фирмы Mitutoyo [2]. На рисунке 1.4 представлен внешний вид цифрового микрометра MDC-25MX. В таблице 1.1 приведены основные характеристики цифрового микрометра MDC-25MX.



Рисунок 1.4 – Внешний вид цифрового микрометра

Таблица 1.1 – Характеристики цифрового микрометра

Напряжение питания, В	3
Потребляемый ток при включенном дисплее, мкА	27
Потребляемый ток при выключенном дисплее, мкА	20
Диапазон измерений, мм	0-25
Цена деления, мм	0,001
Точность, мм	0,002
Диапазон рабочей температуры, °С	0-40
Вес, г	250

Видоизменение микрометра состоит в том, что от оригинального микрометра остаются шток (металлический стержень, предназначенный для передачи крутящего момента), емкостная матрица (датчик для определения текущей длины штанги), дисплей (для отображения текущей длины). На рисунке 1.5 изображены составные элементы измерительного узла.



Рисунок 1.5 – Составные элементы измерительного узла

В качестве электродвигателей используются 6 маломощных мотор-редукторов LS-16GA030-50 фирмы LEISON MOTOR [3]. Мотор-редуктор представляет собой коллекторный двигатель, соединённый с многоступенчатым цилиндрически редуктором.

Коллекторные двигатели постоянного тока состоят из неподвижного статора и подвижного ротора (якоря).

В коллекторных двигателях малых габаритов и малой мощности в качестве статора используют постоянные магниты. А в двигателях средней и большой мощности статор представляет из себя обмотку возбуждения.

На рисунке 1.6 изображены составные элементы коллекторного двигателя постоянного тока.



Рисунок 1.6 – Составные элементы коллекторного двигателя

Обмотки ротора состоят из нескольких сегментов и подключаются непосредственно к пластинам коллектора. При помощи щеток (графито-металлические контакты) обеспечивается передача электрического тока к обмоткам ротора.

На рисунке 1.7 представлен внешний вид одного из мотор-редукторов, установленных на устройстве.

В таблице 1.2 приведены основные характеристики мотор-редуктора LS-16GA030-50.



Рисунок 1.7 – Внешний вид мотор-редуктора

Таблица 1.2 – Характеристики мотор-редуктора

Номинальное напряжение, В	6
Потребляемый ток без нагрузки, мА	80
Скорость холостого хода, об/мин	30
Мощность, Вт	0,250
Потребляемый ток при блокировке, мА	620
Диаметр выходного вала, мм	3
Длина × Ширина × Высота, мм	42,1×16×16
Передаточное отношение	1:53
Крутящий момент, мН · м	98
Масса, г	20

Процесс позиционирования подвижного элемента можно рассмотреть на примере изменения длины одной из штанг. При вращении вала электродвигателя, крутящий момент передается на шток измерительного узла посредством цилиндрической зубчатой передачи. Далее крутящий момент передается от штока измерительного узла на штангу переменной длины. Вращаясь, штанга изменяет свою длину, а, следовательно, изменяет положение подвижного элемента.

Проведя анализ объекта, можно сформулировать цели и основные задачи автоматизации.

1.2 Цели и задачи автоматизации

Целью автоматизации объекта является возможность дистанционного управления длинами штанг, вследствие чего изменяется положение подвижного элемента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обеспечение подключения системы управления к ПК для ввода требуемых длин штанг и отслеживания текущих;
- обеспечение подключения к системе управления модулей беспроводной передачи данных, для осуществления удаленного управления длинами штанг;
- обеспечение управления электродвигателями по ПИД-закону

Перед тем как начать разработку системы управления устройством необходимо разработать кинематическую модель, которая бы позволяла определять длины штанг по требуемому положению подвижного элемента.

2 РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА

2.1 Анализ количества степеней свободы

Устройства с параллельной кинематической структурой принято классифицировать по количеству степеней свободы устройства. Для анализа количества степеней свободы используется формула Сомова-Малышева, имеющая вид [4]:

$$W = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5, \quad (1)$$

где W – количество степеней свободы устройства;

n – число подвижных звеньев устройства;

p_i – количество кинематических пар с i степенями свободы.

Для устройства (см. рисунок 1.1) количество звеньев и кинематических пар можно записать следующим образом:

$n = 13$ – общее число штанг плюс подвижный элемент;

$p_1 = 6$ – число винтовых пар;

$p_3 = 12$ – число сферических шарниров;

Из этого следует, что количество степеней свободы для устройства равно:

$$W = 6 \cdot 13 - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 12 = 12.$$

На самом же деле, при расчете количества степеней свободы учитывалось вращение шести штанг постоянной длины вокруг своей оси. Если вращения ликвидировать, то это никак не ограничит движение устройства. Вследствие этого, можно сказать, что вращение штанг не придает дополнительных степеней свободы. А значит из рассчитанного общего количества степеней свободы нужно вычесть шесть степеней.

Данное устройство можно отнести к классу гексапод, вследствие того, что оно обладает 6-ю степенями свободы и имеет в своем составе штанги переменной длины.

2.2 Построение кинематической модели

Построение кинематической модели устройства необходимо для обеспечения корректного позиционирования и правильной работы устройства. Кинематическая модель описывает взаимосвязь между входными (управляемыми) параметрами и выходными.

Конструкция устройства должна обеспечивать перемещение подвижного элемента, по шести координатам: трем линейным x , y , z и трем угловым ψ , ϑ , γ .

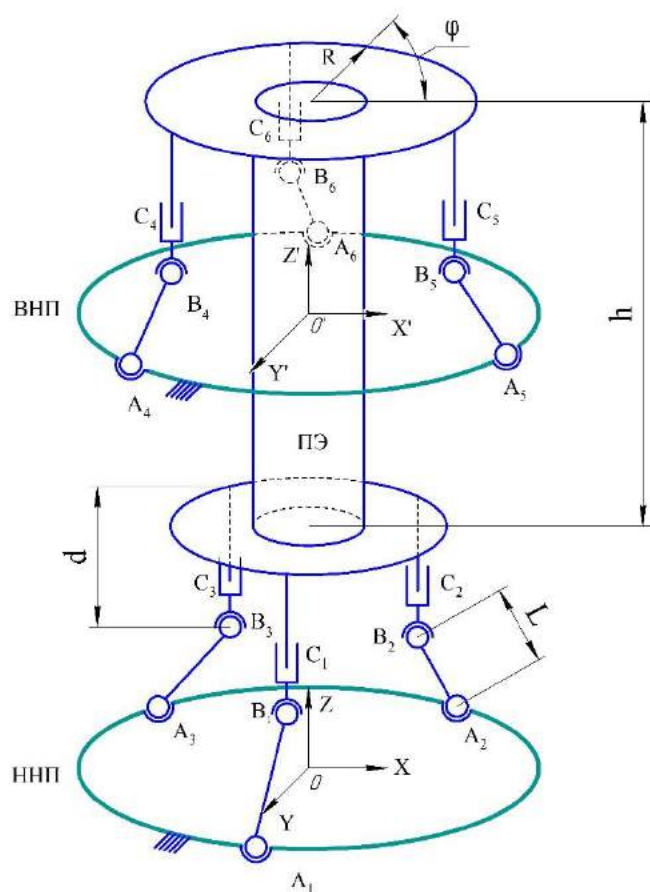
Линейные координаты представляют собой координаты полюса (назовем его O') подвижного элемента в неподвижной системе координат (СК) $O'X'Y'Z'$. Угловые координаты – определяют поворот подвижного элемента вокруг полюса; в качестве таких координат используются углы Крылова. Данные углы описывают поворот подвижной системы координат связанной с подвижным элементом относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. Шесть координат, описанных выше являются выходными координатами для кинематической модели устройства.

Для шестикоординатного позиционирующего устройства была разработана кинематическая схема, она приведена в приложении А.

Пусть для устройства задано начальное положение:

- известны координаты полюса O' в неподвижной системе координат $OXYZ$;
- оси систем координат $OXYZ$ и $O'X'Y'Z'$ параллельны;
- оси Z и Z' систем координат совпадают;
- известны координаты сферических шарниров B_i в подвижной системе координат $O'X'Y'Z'$;
- известны координаты сферических шарниров A_i в неподвижной системе координат $OXYZ$.

На рисунке 2.1 изображена схема устройства в начальном положении.



- $A_1... A_6$ - сферический шарнир
 - $B_1... B_6$ - сферический шарнир
 - $C_1... C_6$ - винтовая пара
 - ПЭ - подвижный элемент
 - ВНП - верхняя неподвижная платформа
 - ННП - нижняя неподвижная платформа
 - L - штанга постоянной длины
 - d - штанга переменной длины
 - R - радиус основания подвижного элемента
- $O'X'Y'Z'$ - подвижная система координат
 $OXYZ$ - неподвижная система координат

Рисунок 2.1 – Схема устройства в начальном положении

Построение кинематической модели сводится к записи уравнений, связывающих длины штанг переменной длины (входные координаты) и координаты полюса O' . Полученные уравнения позволяют определить пространственное положение подвижного элемента относительно неподвижных платформ в неподвижной СК $OXYZ$. Взаимосвязь между неподвижными платформами и подвижным элементом осуществляется через сферические шарниры A и B , а также штанги постоянной длины. Уравнение взаимосвязи между элементами выглядит следующим образом:

$$L_i^2 = (x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2 + (z_{A_i} - z_{B_i})^2, L_i = L = \text{const}, i = 1...6, \quad (2)$$

где $x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$ – координаты i -ого сферического шарнира A ;

$x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i}$ – координаты i -ого сферического шарнира B ;

L – штанга постоянной длины.

Координаты сферических шарниров В гораздо проще определять в подвижной системе координат т.к. в данной системе координат у шарниров В изменяется лишь одна координата z. Координаты шарнира В в подвижной СК $O'X'Y'Z'$ равны:

$$\begin{aligned}x'_{B_i} &= R \cdot \cos \varphi; \\y'_{B_i} &= R \cdot \sin \varphi; \\z'_{B_i} &= \left(\frac{h}{2}\right)^2 + R^2 - d_i.\end{aligned}\quad (3)$$

Пересчет координат сферических шарниров B_i , связанных с подвижной СК, в неподвижную СК $OXYZ$ осуществляется через умножение координат на направляющие косинусы:

$$\begin{aligned}x_{B_i} &= l_1 \cdot x'_{B_i} + l_2 \cdot y'_{B_i} + l_3 \cdot z'_{B_i} + x_{O'}; \\y_{B_i} &= m_1 \cdot x'_{B_i} + m_2 \cdot y'_{B_i} + m_3 \cdot z'_{B_i} + y_{O'}; \\z_{B_i} &= n_1 \cdot x'_{B_i} + n_2 \cdot y'_{B_i} + n_3 \cdot z'_{B_i} + z_{O'};\end{aligned}\quad (4)$$

где $x_{O'}$, $y_{O'}$, $z_{O'}$ – координаты полюса O' .

Направляющие косинусы l_j , m_j , n_j ($j=1...3$) определяются через выходные угловые координаты (углы Крылова):

$$\begin{aligned}l_1 &= \cos \psi \cdot \cos \gamma + \sin \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \gamma; \\m_1 &= -\sin \psi \cdot \cos \gamma + \sin \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \gamma; \\n_1 &= \cos \vartheta \cdot \sin \gamma; \\l_2 &= \cos \vartheta \cdot \sin \psi; \\m_2 &= \cos \vartheta \cdot \cos \psi; \\n_2 &= -\sin \vartheta; \\l_3 &= -\cos \psi \cdot \sin \gamma + \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma; \\m_3 &= \sin \psi \cdot \sin \gamma + \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma; \\n_3 &= \cos \vartheta \cdot \cos \gamma.\end{aligned}\quad (5)$$

После подстановки координат сферического шарнира В связанных с подвижной СК в уравнение в неподвижной СК, последнее примет вид:

$$\begin{aligned}L_i^2 &= (x_{A_i} - l_1 \cdot x'_{B_i} - l_2 \cdot y'_{B_i} - l_3 \cdot z'_{B_i} - x_{O'})^2 + \\&+ (y_{A_i} - m_1 \cdot x'_{B_i} - m_2 \cdot y'_{B_i} - m_3 \cdot z'_{B_i} - y_{O'})^2 + \\&+ (z_{A_i} - n_1 \cdot x'_{B_i} - n_2 \cdot y'_{B_i} - n_3 \cdot z'_{B_i} - z_{O'})^2, i = 1...6.\end{aligned}\quad (6)$$

Упростить выражение можно применив к нему одно из свойств направляющих косинусов:

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1. \quad (7)$$

Упрощенное выражение выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} L_i^2 = & x'_{B_i}{}^2 + y'_{B_i}{}^2 + z'_{B_i}{}^2 + (x_{O'} - x_{A_i})^2 + (y_{O'} - y_{A_i})^2 + (z_{O'} - z_{A_i})^2 + \\ & + 2(l_1 \cdot x'_{B_i} + l_2 \cdot y'_{B_i} + l_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (x_{O'} - x_{A_i}) + \\ & + 2(m_1 \cdot x'_{B_i} + m_2 \cdot y'_{B_i} + m_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (y_{O'} - y_{A_i}) + \\ & + 2(n_1 \cdot x'_{B_i} + n_2 \cdot y'_{B_i} + n_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (z_{O'} - z_{A_i}), \quad i = 1 \dots 6. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив в место выходных угловых координат углы Крылова, выражение примет следующий вид:

$$\begin{aligned} L_i^2 = & x'_{B_i}{}^2 + y'_{B_i}{}^2 + z'_{B_i}{}^2 + (x_{O'} - x_{A_i})^2 + (y_{O'} - y_{A_i})^2 + (z_{O'} - z_{A_i})^2 + \\ & + 2 \left[x'_{B_i} (C\psi \cdot C\gamma + S\psi \cdot S\vartheta \cdot S\gamma) + y'_{B_i} \cdot S\psi \cdot C\vartheta + z'_{B_i} (S\psi \cdot S\vartheta \cdot C\gamma - C\psi \cdot S\gamma) \right] \times \\ & \times (x_{O'} - x_{A_i}) + \\ & + 2 \left[x'_{B_i} (C\psi \cdot S\vartheta \cdot S\gamma - S\psi \cdot C\gamma) + y'_{B_i} \cdot C\psi \cdot C\vartheta + z'_{B_i} (S\psi \cdot S\gamma - C\psi \cdot S\vartheta \cdot C\gamma) \right] \times \\ & \times (y_{O'} - y_{A_i}) + \\ & + 2 \left[x'_{B_i} C\vartheta \cdot S\gamma - y'_{B_i} \cdot S\vartheta + z'_{B_i} C\vartheta \cdot C\gamma \right] \cdot (z_{O'} - z_{A_i}), \quad i = 1 \dots 6. \end{aligned} \quad (9)$$

где $S\psi = \sin \psi$, $C\psi = \cos \psi$ и т.д.

Шесть уравнений (9) связывают между собой все шесть входных и шесть выходных координат рассматриваемого устройства. Система данных уравнений является кинематической моделью устройства.

Позиционирование подвижного элемента ограничивается особенностями конструкции шестикоординатного устройства. Одним из таких ограничений является предельный угол отклонения штанг в сферических шарнирах.

2.3 Расчет предельного угла отклонения штанг

Перед началом расчета предельного угла отклонения необходимо ввести такое понятие как геометрические параметры. Под геометрическими параметрами подразумевается следующее.

1. Расположение шарниров, соединяющих штанги механизма с корпусом, описывается через их координаты относительно неподвижной системы координат $OXYZ$, где точка O является точкой нала координат.

Примем, что шарниры располагаются в плоскости OXY на окружности радиусов R_A ; центр окружности совпадает с началом координат (см. рисунок 2.1). Таким образом координаты шарниров определяются следующим выражением:

$$\begin{aligned} x_{Aj} &= R_A \cdot \cos \varphi_j; \\ y_{Aj} &= R_A \cdot \sin \varphi_j. \end{aligned} \quad (10)$$

2. Расположение шарниров, соединяющих штанги с подвижной платформой. Примем, что эти шарниры расположены на окружности радиусом R_B , лежащей в плоскости $O'X'Y'$. Тогда координаты шарниров определяются через выражение:

$$\begin{aligned} x'_{Bj} &= R_B \cdot \cos \varphi_j; \\ y'_{Bj} &= R_B \cdot \sin \varphi_j. \end{aligned} \quad (11)$$

3. Пределы изменения всех штанг устройства должны быть одинаковыми.

4. Конструкция шарнира устроена таким образом, что она позволяет совершать штанге движение только в пределах некоторого конуса с углом при вершине $2\alpha_{MAX}$. На рисунке 2.2 показано поле вращения штанги в шарнире.

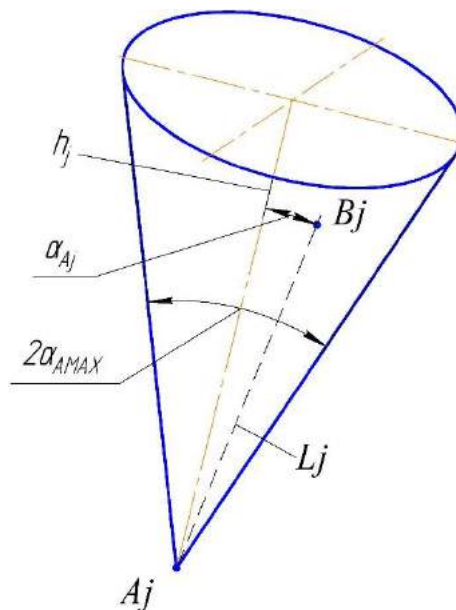


Рисунок 2.2 – Поле вращения штанги в шарнире

Угол α_{Aj} между положением j -й штанги и высотой конуса не должен превышать значения α_{MAX} . Угол α_{Aj} можно рассчитать по следующему выражению:

$$\cos \alpha_{Aj} = \frac{x_{hj} \cdot x_{ABj} + y_{hj} \cdot y_{ABj} + z_{hj} \cdot z_{ABj}}{\sqrt{(x_{hj}^2 + y_{hj}^2 + z_{hj}^2) \cdot (x_{ABj}^2 + y_{ABj}^2 + z_{ABj}^2)}}, \quad (12)$$

где $x_{hj} = x_{Aj} - x_{Bj}^{исх}$; $y_{hj} = y_{Aj} - y_{Bj}^{исх}$; $z_{hj} = z_{Aj} - z_{Bj}^{исх}$;

$x_{Bj}^{исх}$, $y_{Bj}^{исх}$, $z_{Bj}^{исх}$ – координаты шарнира B_j в исходном состоянии механизма;

$x_{ABj} = x_{Aj} - x_{Bj}$; $y_{ABj} = y_{Aj} - y_{Bj}$; $z_{ABj} = z_{Aj} - z_{Bj}$.

Шарниры, связывающие штанги с платформой также накладывают свои ограничения на перемещение штанг в пространстве. Угол α_{Bj} рассчитывается по следующему выражению:

$$\cos \alpha_{Bj} = \frac{x'_{hj} \cdot x'_{ABj} + y'_{hj} \cdot y'_{ABj} + z'_{hj} \cdot z'_{ABj}}{\sqrt{(x'_{hj}{}^2 + y'_{hj}{}^2 + z'_{hj}{}^2) \cdot (x'_{ABj}{}^2 + y'_{ABj}{}^2 + z'_{ABj}{}^2)}}, \quad (13)$$

где $x'_{hj} = x'_{Aj}^{исх} - x_{Bj}$; $y'_{hj} = y'_{Aj}^{исх} - y_{Bj}$; $z'_{hj} = z'_{Aj}^{исх} - z_{Bj}$;

$x'_{Aj}^{исх}$, $y'_{Aj}^{исх}$, $z'_{Aj}^{исх}$ – координаты шарнира A_j в системе координат $O'X'Y'Z'$

в исходном состоянии механизма;

$x'_{ABj} = x'_{Aj} - x_{Bj}$; $y'_{ABj} = y'_{Aj} - y_{Bj}$; $z'_{ABj} = z'_{Aj} - z_{Bj}$; x'_{Aj} ; y'_{Aj} ; z'_{Aj} – координаты шарнира A_j в системе $O'X'Y'Z'$ для текущего состояния механизма.

После того как была разработана кинематическая модель устройства можно переходить к разработке структурной схемы устройства, а также схем электрических принципиальных.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

3.1 Анализ сигналов емкостной матрицы

Датчики обратной связи предназначены для измерения длин штанг. Измерение длины осуществляется при помощи емкостной матрицы. На рисунке 3.1 изображены платы емкостной матрицы.

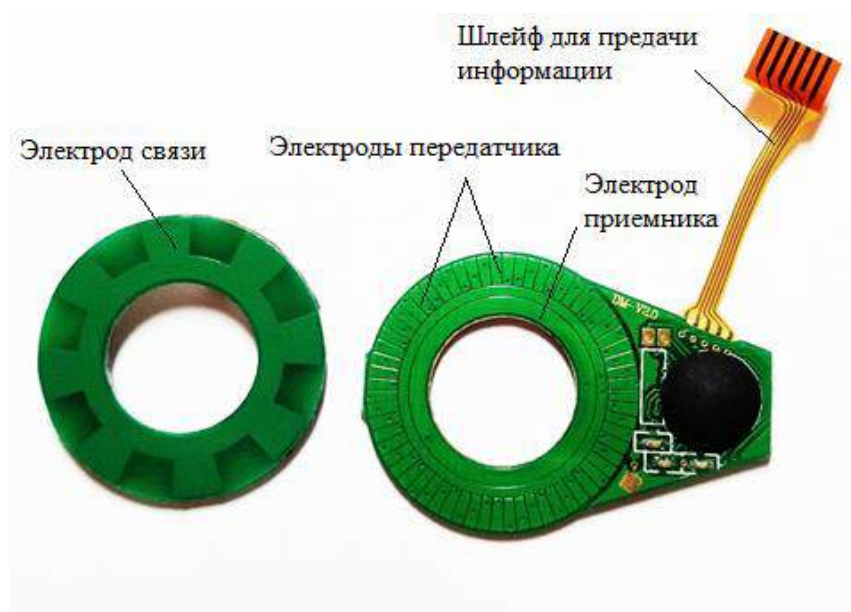


Рисунок 3.1 – Емкостная матрица

На плате справа нанесены одинаковые прямоугольные электроды на эти электроды подаются периодически изменяющиеся напряжения, сдвинутые по фазе. Эти электроды являются передающими. Также на плате вокруг отверстия находится цельный электрод, который является приемным.

На плате слева находятся электроды связи, которые перекрывают и передающие и приемный электроды и осуществляют емкостную связь части передающих электродов с приемным.

На плате справа имеется шлейф, по которому передается информация от емкостной матрицы к микроконтроллеру микрометра. После получения

информации микроконтроллер (установленный на плате справа) обрабатывает ее и выводит на дисплей текущее значение длины.

На шлейфе (см. рисунок 3.1) присутствуют 5 контактов: общий провод, синхронизирующий сигнал, сигнал информации и два сигнала высокого уровня.

Осциллограмма синхронизирующего и информационного сигналов, полученных с емкостной матрицы, изображена на рисунке 3.2.

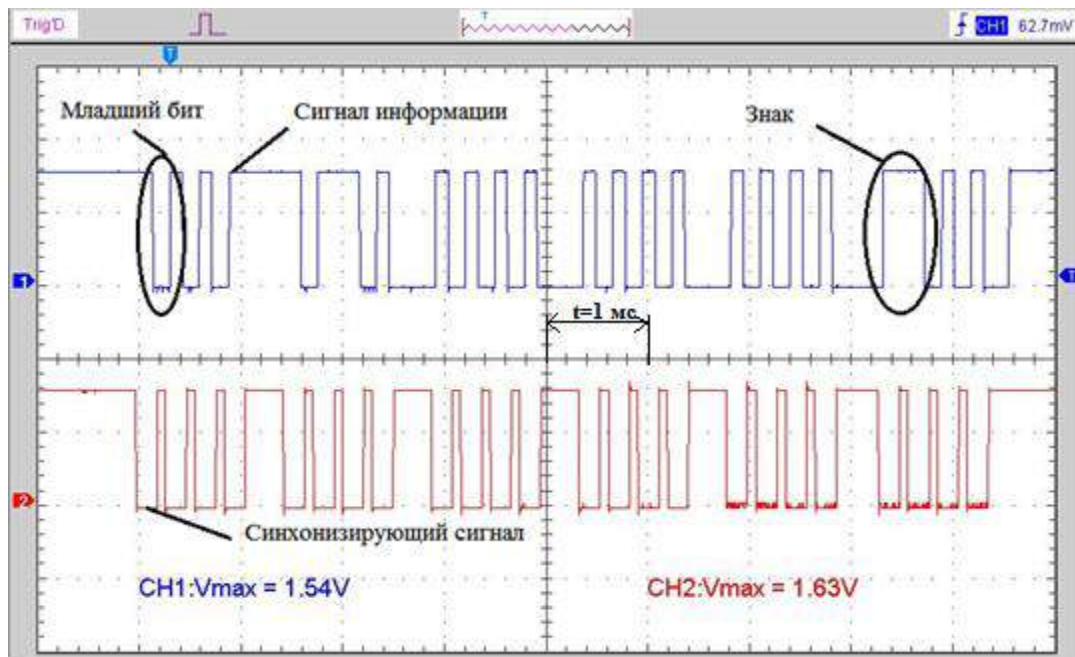


Рисунок 3.2 – Осциллограмма сигналов с матрицы

Синхронизирующий и информационный сигналы передаются пакетами раз в 100 мс. Размах сигналов составляет около 1,5 В.

Пакет синхронизирующего сигнала состоит из 23 импульсов.

Передача пакета информационного сигнала осуществляется с младшего бита. Во время передачи пакета в тот момент, когда синхронизирующий сигнал имеет высокий логический уровень, считывается состояние информационного сигнала.

Следует отметить, что 21-й импульс в пакете отвечает за знак, так высокий логический уровень соответствует знаку минус, низкий – плюсу.

Значение длины, полученное с емкостного датчика, имеет особую кодировку. На рисунке 3.3 представлены осциллограмма информационного сигнала и его представление в бинарной форме.

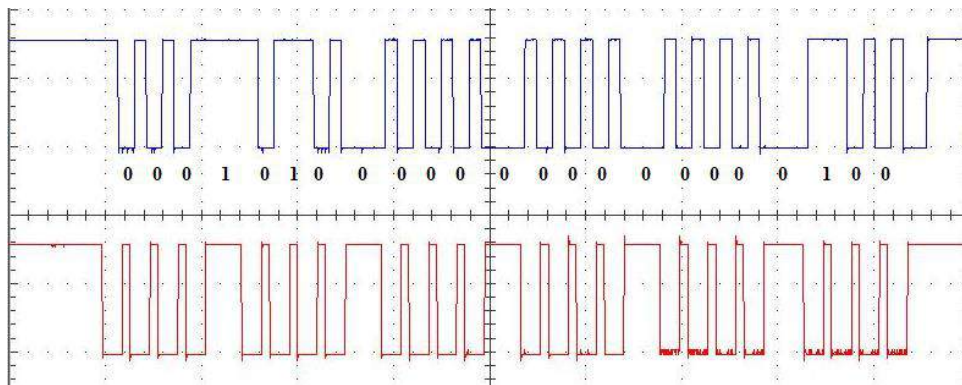


Рисунок 3.3 – Осциллограмма информационного сигнала

Так, например, значение длины, считываемое с информационного сигнала (см. рисунок 3.3) можно представить в виде числа в двоичном коде: (начиная с младшего бита) 0001 0100 0000 0000 0000 100.

Двоичное представление длины не очень удобно для дальнейших вычислений, следовательно, его необходимо перевести в десятичную систему счисления. Для этого необходимо отобразить его в нормальном виде, т.е. со старшего бита, а затем отбросить три старших бита. Таким образом двоичный код изображенный на осциллограмме можно представить в виде числа 40. Данное число соответствует значению -0,005 мм на дисплее микрометра.

После проведения серии измерений длины (таблица 3.1), эмпирические данные были внесены в программный продукт Microsoft Excel для выявления зависимости между значениями длины на дисплее микрометра и закодированными значениями, полученные с датчика.

Таблица 3.1 – Эмпирические данные

Значение длины на дисплее, мм	Значение длины с датчика
0	0
0,005	40
0,010	80
0,070	560
0,223	1813
0,900	7318

Для установления зависимости между этими величинами необходимо вычислить коэффициент корреляции.

Воспользовавшись встроенными функциями Excel, было установлено, что коэффициент корреляции равен 1. Это означает, что величины находятся в прямой зависимости.

Ввиду погрешностей измерения, графически зависимость между величинами представляется в виде кривой. Воспользовавшись встроенными средствами Excel, можно аппроксимировать кривую и получить график линейной зависимости величин, а также функцию описывающую данную зависимость.

На рисунке 3.4 представлены график зависимости длин на дисплее и датчике.

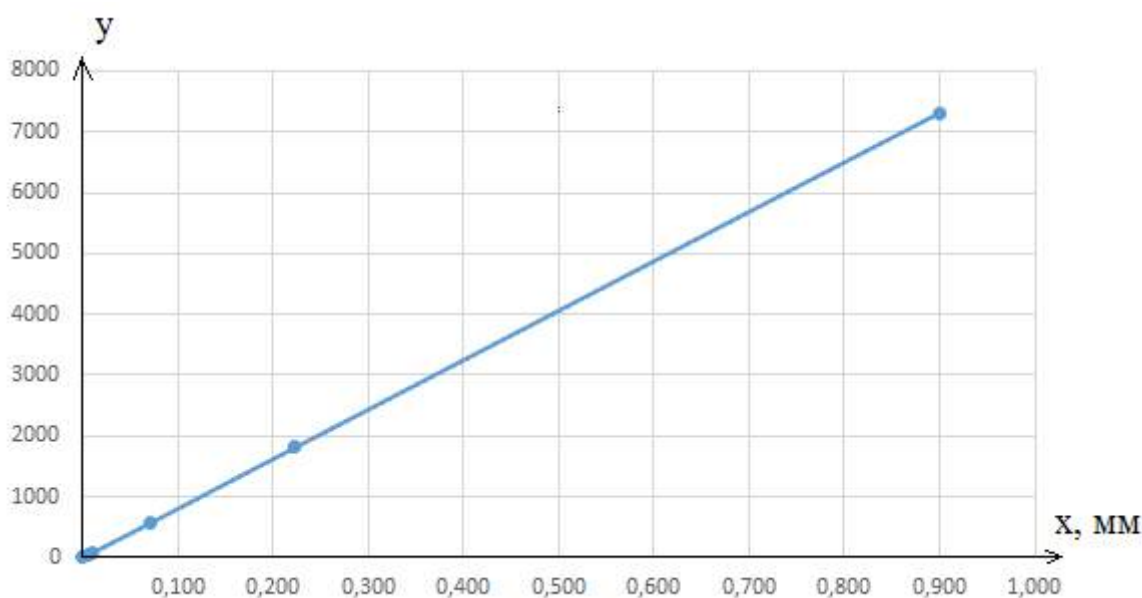


Рисунок 3.4 – График зависимости длин на дисплее и датчике

По оси ординат (y) отложены значения длины, получаемой с датчика, по оси абсцисс (x) отложены значения длины в миллиметрах, отображаемые на дисплее.

Функция, описывающая зависимость длины на дисплее и датчике, выглядит следующим образом:

$$y(x) = 8130,3x. \quad (14)$$

Благодаря, выведенной зависимости (14) длины на дисплее и на датчике можно легко получить текущее значение длины, считав информацию с датчика ОС. Данная зависимость будет использоваться при разработке ПО системы управления.

Следующим шагом, после анализа датчиков ОС, является сборка испытательного стенда, который позволит продемонстрировать принцип изменения длины штанги, а также считывание информации о текущей длине.

3.2 Сборка испытательного стенда

Испытательный стенд представляет из себя конструкцию, которая позволяет продемонстрировать процесс изменения длины штанги, а также считать информацию с датчика обратной связи о текущей длине. Внешний вид испытательного стенда изображен на рисунке 3.5.

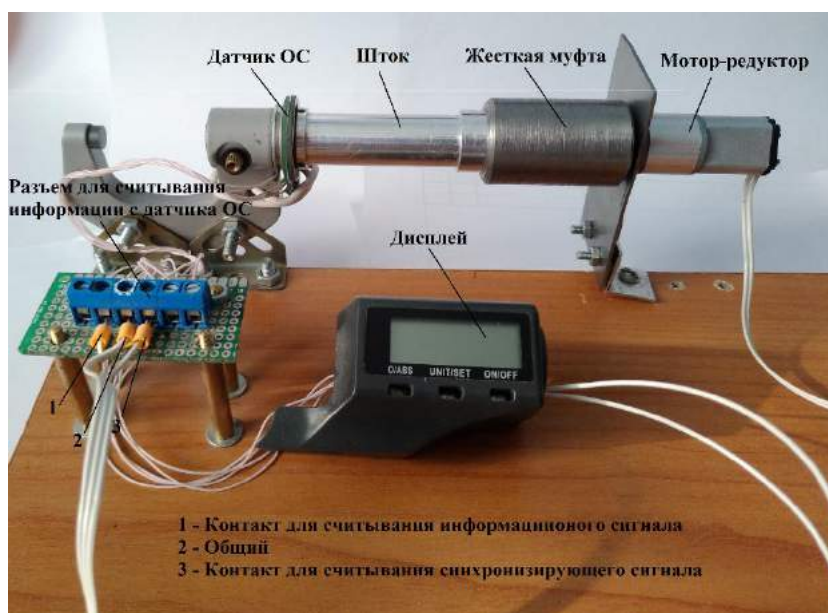


Рисунок 3.5 – Внешний вид испытательного стенда

В состав данного стенда входят элементы аналогичные тем, что установлены на объекте автоматизации, а именно мотор-редуктор и измерительный узел. Также на испытательном стенде установлены жесткая муфта, для передачи вращения от

выходного вала мотор-редуктора штоку измерительного узла и разъем для считывания информации с датчика ОС.

Принцип работы стенда можно описать следующим образом. При подключении питания к мотор-редуктору его вал начинает вращаться. Вращение от вала мотор-редуктора к штоку измерительного узла передается за счет муфты. Угловое перемещение штока анализируется датчиком обратной связи и трансформируется в значение линейного перемещения, под которым можно понимать изменение длины штанги. После чего на соответствующий разъем подается информация о текущей длине. В зависимости от полярности питания мотор-редуктора значение текущей длины, считываемое с датчика и отображаемое на дисплее может быть, как положительным, так и отрицательным.

4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ

4.1 Разработка структурной схемы

Система управления шестикоординатным устройством позиционирования имеет двухуровневую иерархическую структуру:

- подсистема верхнего уровня;
- подсистема нижнего уровня.

Подсистема верхнего уровня представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ).

Подсистема верхнего уровня должна обладать следующими функциями:

- прием информации о текущем положении подвижного элемента от подсистемы нижнего уровня;
- визуализация информации о текущей положении подвижного элемента;
- передача команд о требуемом положении подвижного элемента подсистеме нижнего уровня.

Подсистема нижнего уровня представляет собой совокупность плат управления, датчиков, исполнительных элементов, осуществляющих непосредственное взаимодействие с шестикоординатным устройством.

Подсистема нижнего уровня в свою очередь должна решать следующие задачи:

- прием информации о требуемом положении подвижного элемента с АРМ;
- управление электродвигателями устройства;
- передача информации о текущем положении подвижного элемента;
- беспроводная передача данных между подсистемами верхнего и нижнего уровней.

На основе выше упомянутых функций подсистем была разработана комбинированная функциональная схема системы управления шестикоординатным устройством позиционирования, приведена в приложении Б.

В подсистеме нижнего уровня для решения той или иной задачи выделены следующие блоки:

- блок приема/передачи информации;
- центральный блок управления;
- блоки управления электродвигателями.

Блок приема/передачи информации предназначен для обмена информацией с подсистемой верхнего уровня для беспроводного обмена данными с центральным блоком управления.

Центральный блок управления предназначен для обмена данными с блоками управления электродвигателями.

Блок управления электродвигателями предназначен для считывания информации с датчиков ОС и управления электродвигателем.

Рассмотрим процесс передачи данных от АРМ к блокам управления электродвигателей.

С автоматизированного рабочего места поступает информация о требуемом положении подвижного элемента в центральный блок управления. Обмен информацией между АРМ и центральным блоком управления происходит по беспроводному каналу передачи данных. Затем информация передается на 6 блоков управления электроприводами. В этих блоках происходит сравнение информации о длинах штанг, полученных с датчиков с информацией, полученной от центрального блока. После чего блоки управления электроприводами подают управляющие сигналы электроприводам, изменяя тем самым длины штанг.

Следует сказать, что разработка центрального блока управления и блоков управления электродвигателями была рассмотрена в ВКР прошлых лет. Таким образом далее необходимо рассмотреть состав блока центрального управления и блоков управления электродвигателями, а также разработать блок приема/передачи информации.

4.2 Описание центрального блока управления

Блок управления предназначен для приема информации о требуемом положении подвижного элемента от подсистемы верхнего уровня через модуль беспроводной передачи данных. А также для обработки принятой информации и последующей передачи информации блокам управления электродвигателями. На рисунке 4.1 изображен внешний вид печатного узла блока центрального управления. Схема электрическая принципиальная блока приведена в приложении В.

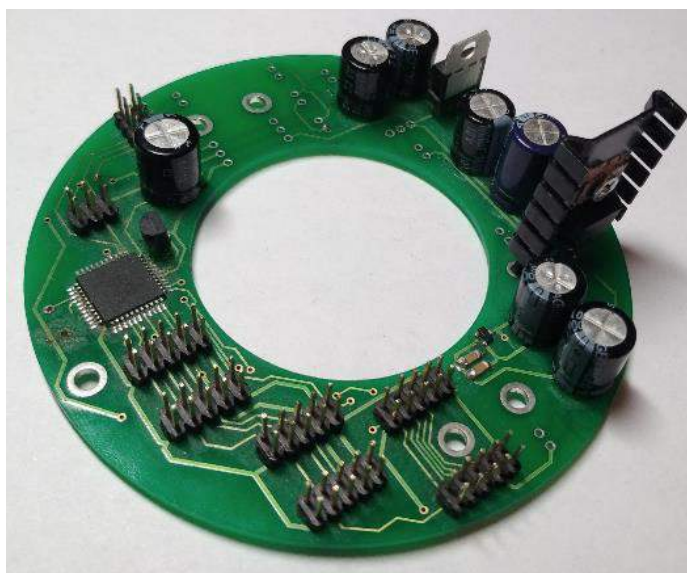


Рисунок 4.1 – Внешний вид печатного узла центрального блока управления

Основой блока центрального управления является микроконтроллер (МК) Atmega162 [5].

В состав блока центрального управления входят каскад сброса и каскад линейных стабилизаторов.

Далее необходимо определить какие функции выполняет каждый каскад и из каких элементов состоит. А также необходимо рассмотреть основные характеристики модуля беспроводной передачи информации.

4.2.1 Каскад сброса

Каскад предназначен для формирования и передачи сигнала сброса на соответствующий вывод микроконтроллера ($\overline{\text{RESET}}$). Каскад сброса реализован на микросхеме MCP120-450DI/TO, которая является монитором питания [6]. Схема каскада изображена на рисунке 4.2.

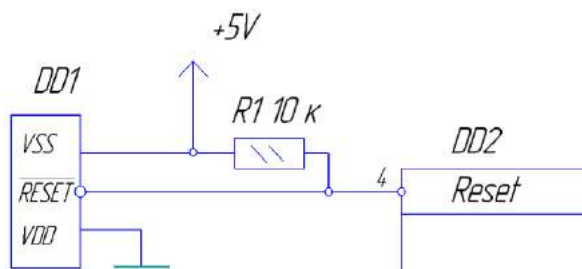


Рисунок 4.2 – Схема каскада сброса

Монитор (супервизор) питания – микросхема, в число задач которой входят формирование сигнала сброса при включении питания, при снижении напряжения питания до порогового, а также при наличии выбросов напряжений в цепи питания.

В таблице 4.1 приведена техническая характеристика микросхемы MCP120-450DI/TO.

Таблица 4.1 – Техническая характеристика

Номинальное напряжение питания, В	5
Потребляемый ток, мкА	45
Длительность сигнала «Сброс», мс	350
Активный уровень сигнала «Сброс»	Низкий
Выход	Открытый сток
Минимальное контролируемое напряжение, В	4,25
Максимальное контролируемое напряжение, В	4,50

Микросхема МСР120-450DI/ТО не может формировать на своем выходе высокий логический уровень, вследствие чего выход микросхемы подтягивается к питанию через резистор сопротивлением 10 кОм.

4.2.2 Каскад линейных стабилизаторов

Каскад предназначен для обеспечения питающим напряжением различных устройств. В каскаде присутствуют линии питания: +5 В, +6 В, +3.3 В, +3 В.

Питающие напряжения, перечисленные выше, формируются при помощи линейных стабилизаторов напряжения, и предназначены для питания конкретных устройств:

- + 5 В (L7805) – питания микроконтроллера [7];
- + 6 В (КР142ЕН5Б) – питание электродвигателей [8];
- +3.3 В (МСР1700Т) – питание модуля беспроводной передачи данных [9];
- +3 В (КР1158ЕН3В) – питание датчиков обратной связи [10].

В таблице 4.2 приведены основные технические характеристики линейных стабилизаторов: L7805AVC, КР142ЕН5Б, КР1158ЕН3В, МСР1700Т, установленных в блоке центрального управления.

Таблица 4.2 – Характеристики стабилизаторов напряжения

Наименование	L7805AVC	КР142ЕН5Б	КР1158ЕН3В	МСР1700Т
Выходное напряжение, В	5	6	3	3.3
Максимальное входное напряжение, В	35	15	15	6
Максимальный ток нагрузки, А	1,5	2	0,5	0,25
Диапазон рабочей температуры, °С	0-+125	-40-+70	-45-+70	-40-+125
Корпус	ТО220	ТО220	ТО220	SOT23

На рисунке 4.3 изображена типовая схема включения стабилизаторов.

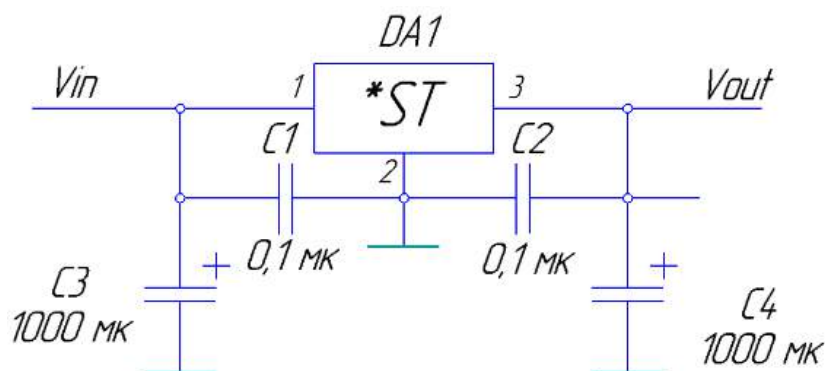


Рисунок 4.3 – Схема включения стабилизаторов

Линейный стабилизатор представляет собой микросхему, принцип действия которой основан на автоматическом регулировании с отрицательной обратной связью. В схемах с обратной связью может возникать процесс самовозбуждения, т.е. возникновение незатухающих колебаний. Для устранения процесса самовозбуждения стабилизатора его входные и выходные цепи обычно шунтируют конденсаторами емкостью в 100 нФ.

Шунтирование входных и выходных линий стабилизатор электролитическими конденсаторами большой емкости обеспечивает фильтрацию помех.

4.3 Модуль беспроводной передачи информации

Модули беспроводной передачи информации встроены в систему управления для обеспечения беспроводной связи между подсистемами верхнего и нижнего уровней. В системе управления шестикоординатным устройством позиционирования используются модули nRF24L01 [11]. В системе управления используются два модуля. Один подключается к блоку приема/передачи информации, другой к блоку центрального управления. Данные модули являются беспроводными приёмопередатчиками осуществляющие передачу данных на частоте 2.4 ГГц. На рисунке 4.4 изображен внешний вид модуля nRF24L01.

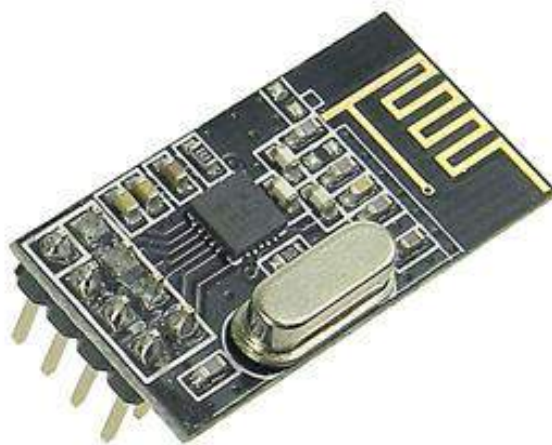


Рисунок 4.4 – Модуль беспроводной передачи информации

В таблице 4.3 приведены основные технические характеристики модуля беспроводной передачи информации.

Таблица 4.3 – Технические характеристики модуля

Частота приема/передачи, ГГц	2.4
Расстояние приема/передачи, м, не более	100
в помещении, м, не более	30
Количество каналов, шт	126
Напряжение питания, В	3.3
Скорость передачи, Мбит/с, не более	2

Передача информации от блока к модулю осуществляется через SPI-интерфейс.

В таблице 4.4 приведена распиновка выводов модуля.

Таблица 4.4 – Распиновка выводов модуля nRF24L01

Номер вывода	Наименование вывода	Тип вывода
1	GND	Вход
2	VCC	Вход
3	CE	Вход
4	CSN	Вход

Продолжение таблицы 4.4

Номер вывода	Наименование вывода	Тип вывода
5	SCK	Вход
6	MOSI	Вход
7	MISO	Выход
8	IRQ	Выход

Выводы 1, 2 предназначены для подключения к ним питающего напряжения 3.3 В.

Выводы 4-7 предназначены для обмена информацией по интерфейсу SPI.

Вывод 3 определяет режим работы модуля. Если на выводе присутствует сигнал логической 1, модуль настроен на режим приема информации. Если на выводе CE логический 0 – на передачу.

Вывод 8 является выводом прерывания. Предназначен для отслеживания приема/передачи данных, а также ошибок передачи. Если происходит прием/передача данных или во время приема/передачи произошла ошибка на выводе IRQ устанавливается логический 0. В остальных случаях на выводе IRQ присутствует логическая 1.

После того как был рассмотрен центральный блок, теперь необходимо рассмотреть назначение блока управления электродвигателем и его основные элементы.

4.4 Описание блока управления электродвигателем

Блок предназначен для непосредственного управления электродвигателем в соответствии с заданным законом регулирования.

На рисунке 4.5 представлен внешний вид печатного узла блока управления электроприводом. Схема электрическая принципиальная блока приведена в приложении Г.

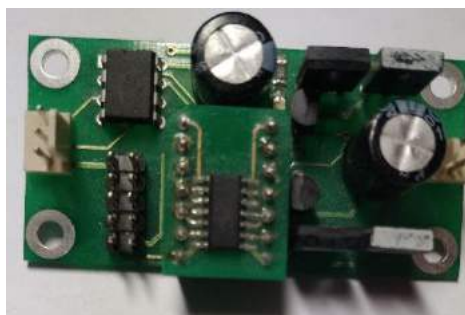


Рисунок 4.5 – Внешний вид печатного узла

Основой блока является микроконтроллер Attiny20 [12]. Также в состав блока входят каскад согласования логических уровней и выходной транзисторный каскад.

Блок не имеет отдельного разъема питания, именно поэтому питание микроконтроллера и питание электродвигателя осуществляется через подключение к блоку центрального управления.

4.4.1 Каскад согласования логических уровней

Каскад предназначен для согласования логических уровней сигналов, получаемых с датчиков обратной связи и поступающих в микроконтроллер. Схема каскада изображена на рисунке 4.6.

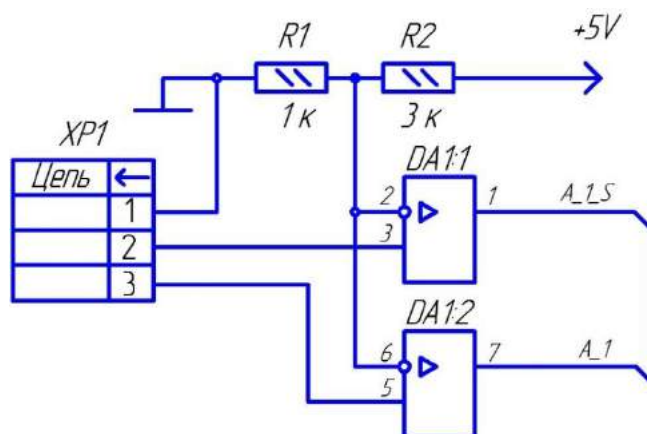


Рисунок 4.6 – Схема каскада согласования

Через разъем ХР1 осуществляется получение информации о текущей длине штанги от датчика обратной связи.

Размах импульсов сигналов с датчиков приблизительно равна 1,5 В. Для того чтобы микроконтроллер смог определить в сигналах с датчиков логические 0 и 1 необходимо чтобы на его входы поступали сигналы с размахом импульсов минимум 2 В.

Для решения этой задачи в каскад интегрирован двухканальный операционный усилитель LM358L, включенный по схеме без гистерезисного компаратора [13].

На инвертирующие входы подается опорное напряжение, взятое с резистивного делителя. На неинвертирующие входы подаются сигналы с датчиков обратной связи.

Если принять опорное напряжение на уровне 1,25 В и сопротивление резистора R_1 равным 1 кОм, то сопротивление резистора R_2 определяется по следующей формуле:

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{U_{\text{POWER}}}{U_{\text{REF}}} - 1 \right) = 1000 \cdot \left(\frac{5}{1.25} - 1 \right) = 3000 \text{ Ом}, \quad (15)$$

где U_{POWER} – напряжение на резистивном делителе, В;

R_1, R_2 – сопротивления резисторов, Ом;

U_{REF} – выходное напряжение, В.

В следующем разделе будет рассмотрены состав и назначение выходного транзисторного каскада.

4.4.2 Выходной транзисторный каскад

Каскад предназначен для управления электроприводом. Каскад представляет собой два транзисторных полумоста, предназначенные для обеспечения двунаправленного вращения мотор-редуктора. На рисунке 4.7 изображена схема каскада (правый и левый полумосты).

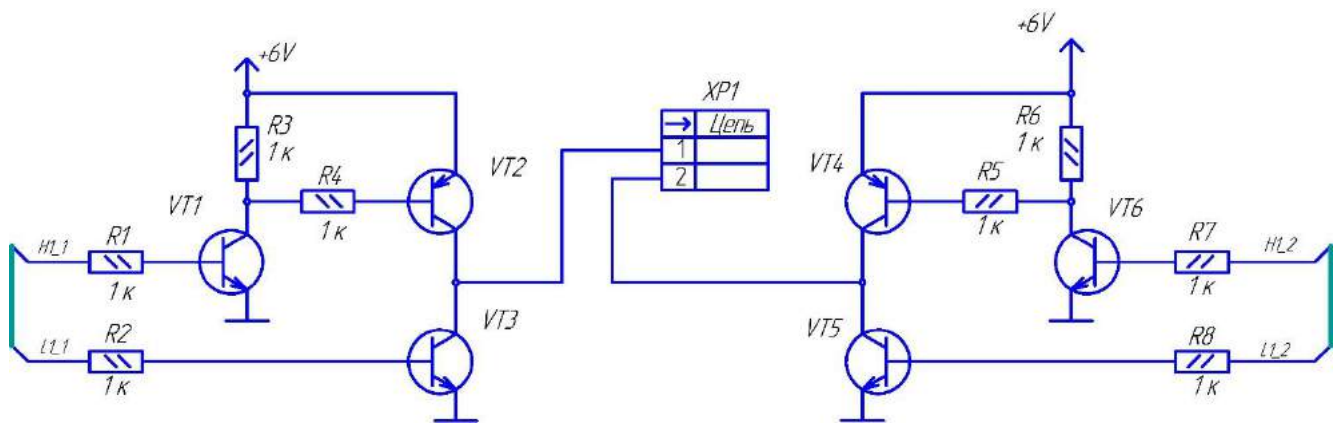


Рисунок 4.7 – Схема выходного каскада

Каждый из полумостов состоит из верхнего и нижнего плеч. Каждое из плеч может формировать высокий и низкий логические уровни.

Разъем XP1 предназначен непосредственно для подключения мотор-редуктора.

Рассмотрим принцип работы левого полумоста, правый работает аналогично:

1. Для формирования на выходе полумоста логической 1 необходимо, чтобы сигнал Н1_1 имел высокий логический уровень. Тем самым транзистор VT1 открывается. В свою очередь база транзистора VT2 соединяется через резистор R4 с общим проводом – транзистор VT2 тоже открывается. На выходе верхнего плеча формируется высокий логический уровень.

Сигнал L1_1 должен иметь низкий логический уровень для того чтобы держать транзистор VT3 закрытым.

2. Для формирования на выходе полумоста логического 0 необходимо, чтобы сигнал Н1_1 имел низкий логический уровень. Сигнал L1_1 должен иметь высокий логический уровень для того, чтобы открыть транзистор VT3 и тем самым соединить выходную линию полумоста с общим проводом.

Согласно схеме комбинированной функциональной, в состав системы входит блок приема/передачи информации. Именно разработке данного блока будет посвящен следующий раздел.

4.5 Разработка блока приема/передачи информации

4.5.1 Общие сведения о блоке приема/передачи

Блок приема/передачи информации предназначен для обмена информацией с АРМ, а также для обмена данными по беспроводному каналу передачи с блоком центрального управления. На АРМ установлен ПК, с которого оператор осуществляет непосредственное управление устройством. Следовательно, необходимо обеспечить блок приема/передачи интерфейсами аналогичным персональному компьютеру.

Наиболее распространенным интерфейсом у ПК является USB, следовательно, необходимо обеспечить возможность подключения блока приема/передачи информации к ПК через USB-порт. Преимуществом данного интерфейса является наличие выводов питания от USB порта, следовательно, пропадает необходимость во внешнем источнике питания для блока.

Основой блока будет являться микроконтроллер, который и будет осуществлять управление приемом и передачей данных между верхним и нижним уровнями. Микроконтроллер, который будет использоваться в блоке приема/передачи, должен обладать соответствовать следующим требованиям:

- напряжение питания МК должно составлять 5 В;
- встроенный интерфейс SPI для обмена данными с модулем беспроводной передачи данных;
- встроенный интерфейс USB для обмена информацией с ПК через USB-порт;

Ввиду того, что в ограниченные сроки необходимо собрать систему управления целиком и провести ее функциональное тестирование, было принято решение не покупать МК со встроенным USB интерфейсами, а воспользоваться МК, который есть сейчас «на руках». Таким контроллером оказался ATmega8A [14]. Также уже имелся преобразователь интерфейсов USB-UART RDC1-USB-UART [15].

На основе всего выше сказанного, можно составить структурную схему блока приема/передачи информации, которая отображает элементы из которых будет состоять блок приема/передачи информации, а также их взаимосвязи между собой. Структурная схема изображена на рисунке 4.8.

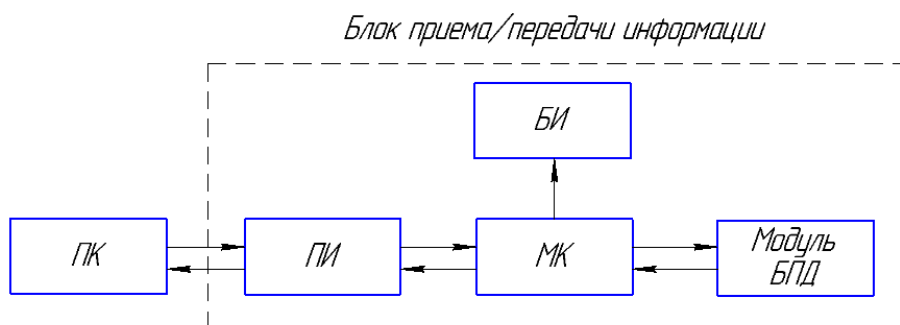


Рисунок 4.8 – Структурная схема блока приема/передачи информации

Названия элементов структурной схемы расшифровываются следующим образом:

- ПК – персональный компьютер;
- ПИ – преобразователь интерфейсов;
- МК – микроконтроллер;
- БИ – блок индикации;
- Модуль БПД – модуль беспроводной передачи данных.

Блок индикации необходим для отладки блока приема/передачи, а также для отображения того, что информация принята/передана по беспроводному каналу связи.

4.5.2 Микроконтроллер

Основным элементом блока приема/передачи информации должен быть МК. В блоке приема/передачи будет использоваться микроконтроллер ATmega8A.

Основные технические характеристики данного МК приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Основные технические характеристики МК ATmega8A

Напряжение питания, В	5
Количество входов/выходов, шт	23
Встроенные интерфейсы	I2C, SPI, UART
Тактовая частота, МГц	16
Объем памяти программ, Кбайт	8

Микроконтроллер ATmega8A не поддерживает протоколы обмена данными по интерфейсу USB. Следовательно, необходимо использовать плату преобразователь интерфейса USB в тот интерфейс, который поддерживает МК ATmega8A. Например интерфейс UART.

4.5.3 Преобразователь интерфейсов USB-UART

Преобразователь интерфейсов USB-UART встроен в систему управления для осуществления обмена информацией между АРМ и МК ATmega8A. В качестве преобразователя интерфейсов выбран преобразователь RDC1-USB-UART. Внешний вид данного преобразователя изображен на рисунке 4.9.

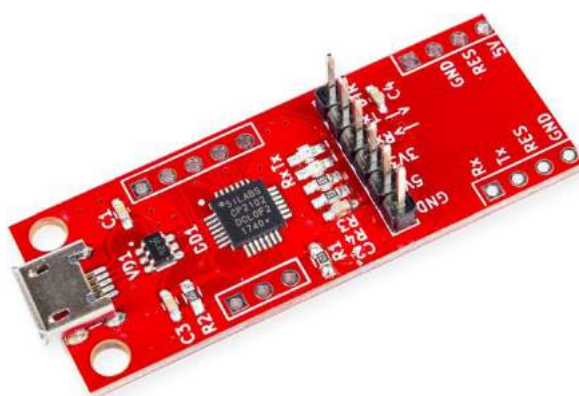


Рисунок 4.9 – Внешний вид преобразователя интерфейсов

МК ATmega8A, установленный в блоке приема/передачи информации, будет общаться с преобразователем по-обычному UART, а к АРМ данные передаются по USB. Персональный компьютер, установленный на АРМ, распознает подключенное устройство как COM-порт, поэтому и работать с ним можно как с обычным COM-портом.

Для связи с ПК на плате установлен разъем microUSB, для связи с устройствами есть соответствующие выводы Rx и Tx.

На плате установлены SMD светодиоды для отслеживания приема/передачи информации.

Данный преобразователь имеет в своем составе микросхему защиты USB порта USBLC6-2SC6 [16].

На плате преобразователя интерфейсов имеются выводы 5V и GND для питания различных устройств.

Следующим этапом разработки блока приема передачи информации является разработка схемы электрической принципиальной.

4.5.4 Разработка схемы электрической принципиальной

В предыдущих подпунктах было решено использовать в качестве основного элемента блока приема/передачи МК ATmega8A. Для реализации обмена информацией между МК и АРМ было решено использовать преобразователь интерфейсов. Также блок приема/передачи информации должен иметь возможность обмениваться данными по беспроводному каналу связи при помощи модуля nRF24L01.

На основании этого была разработана схема электрическая принципиальная блока приема/передачи информации. Схема отображена в приложении Д.

В составе микроконтроллера ATmega8A есть встроенный тактирующий RC генератор на 16 МГц. Допуск на частоту от внутреннего генератора составляет $\pm 5\%$. Это может повлечь за собой то что, фактическая скорость передачи данных по интерфейсам UART и SPI будет отличаться от установленной.

Вследствие этого приемник и передатчик информации (например, АРМ и блок приема/передачи информации) не смогут осуществить обмен между собой.

Для увеличения точность тактирования в блок интегрирован внешний кварцевый резонатор НС-49U [17]. Резонансная частота данного резонатора составляет 8 МГц, точность настройки составляет $\pm 0,003\%$.

Для питания модуля беспроводной передачи информации требуется питание от +3.3 до +3.6 В. Для этого в электрическую схему встроены линейный стабилизатор напряжения МСР1700Т с номинальным выходным напряжением +3.3 В.

В электрическую схему были добавлены разъемы, необходимые для подключения преобразователя интерфейсов к блоку приема/передачи информации. Через линии 5V и GND преобразователя интерфейсов осуществляется питание микроконтроллера. Линии Rx и Tx подключаются непосредственно к выводам TXD и RXD микроконтроллера для обмена данными по интерфейсу UART.

В схеме имеется разъем предназначенный для программирования микроконтроллера через специальное устройство – программатор. Программирование осуществляется через SPI интерфейс микроконтроллера.

В схеме присутствуют три светодиода VD1-VD3. Светодиоды VD1, VD2 предназначены для отладки и проверки работоспособности микроконтроллера. Светодиод VD3 необходим для контроля наличия питания всей схемы.

Для фильтрации помех по линии питания в +5 В и +3,6 В присутствуют электролитические конденсаторы С1-С3 на 1000 мкФ.

4.5.5 Разработка печатной платы

Разрабатываемая печатная плата – двухсторонняя, на обеих ее сторонах выполнены элементы проводящего рисунка и все требуемые соединения в соответствии со схемой электрической принципиальной.

Для платы выбрана координатная сетка с шагом 1,25 мм по ГОСТ 10317-79 [18].

На плате будут использоваться металлизированные отверстия для крепления компонентов и переходов между слоями платы. Диаметр переходных отверстий составляет 0,6 мм. Размеры отверстий определим для каждого выводного элемента печатной платы.

Размеры отверстий для крепления микроконтроллера и разъемов представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Размеры отверстий для выводов

Элемент печатной платы	Ширина вывода элемента, мм	Толщина вывода элемента, мм	Диаметр металлизированного отверстия, мм
XP1... XP4, XS1	0,64	0,64	0,80
DD1	0,53	0,28	0,80

Для крепления элементов с выводами круглого сечения в таблице 4.7 приведены диаметры металлизированных отверстий под данные элементы.

Таблица 4.7 – Размеры отверстий

Элемент печатной платы	Диаметр вывода элемента, мм	Диаметр металлизированного отверстия, мм
HC-49	0,47	0,80
C1 ... C3	0,53	0,80
HL1 ... HL3	0,50	0,80

Для крепления конденсаторов C1...C3 и резисторов R1...R15 используются контактные площадки шириной 0,6 мм и длиной 0,85 мм.

Для установки печатной платы требуется наличие монтажных отверстий. В нашем случае отверстия будут диаметром 3,2 мм под резьбу М3 по ГОСТ 11284-75 [19].

Размеры печатной платы и правила её выполнения взяты по ГОСТ 23751-86 [20]. Габаритные размеры платы составляют 60 мм x 65 мм.

ГОСТ 23751-86 устанавливает пять классов точности выполнения элементов конструкции. Примем для разрабатываемой печатной платы третий класс точности.

В качестве материала печатной платы используется лист фольгированного стеклотекстолита СФ-2-35Г толщиной 1,2 мм, облицованный с двух сторон медной фольгой толщиной 0,035 мм по ГОСТ 10316-78 [21].

Рассчитаем ширину печатного проводника для цепей питания. Согласно документации производителя микроконтроллера АТmega8А, максимальный ток, протекающий по линии питания не должен превышать 300 мА.

По ГОСТ 23751-86 плотность тока для фольги должна составлять от 100 до 250 А/мм². Примем плотность тока равную 100 А/мм². Ширину проводника определим по формуле:

$$h = \frac{I}{i \cdot \Delta}, \quad (16)$$

где I – сила тока, А; i – плотность тока, А/мм²; Δ – толщина фольги, мм.

$$h = \frac{0,3}{100 \cdot 0,035} = 0,086 \text{ мм.}$$

По третьему классу точности минимальная ширина печатного проводника составляет 0,25 мм. Примем ширину сигнальных проводников равной 0,3 мм. Тогда ширину силовых проводников линий +5 В примем равной 0,7 мм, а линии +3,6 В равной 0,5 мм, что обеспечит визуальное разделение сигнальных и силовых линий.

Чертеж печатной платы приведен в приложении Е.

Разработка печатной платы велась с использованием редактора ARES программного продукта Proteus. Этот редактор позволяет спроектировать печатную плату на основе созданной электрической схемы в редакторе ISIS.

Проектирование печатной платы в редакторе ARES представляет собой расстановку посадочных мест компонентов и последующее соединение их между собой печатными проводниками.

4.5.6 Разработка печатного узла

Печатный узел - печатная плата с подсоединенными к ней электрическими и механическими элементами.

Разработанный печатный узел для блока приема/передачи отображен в приложении Ж.

Все элементы печатного узла необходимо паять припоем ПОС-61 по ГОСТ 21931-76 [22].

При монтаже полярных элементов таких как электролитические конденсаторы (С1-С3), светодиоды (VD1-VD3) необходимо соблюдать полярность.

При монтаже микроконтроллера DD1 необходимо соблюдать правильность ее установки. Так на корпусе микроконтроллера небольшим кружком обозначена первая ножка элемента.

При монтаже кварцевого резонатора ZQ1 необходимо между ним и печатной платой установить диэлектрическую подложку во избежание замыкания на корпус резонатора.

5 ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

5.1 Постановка задачи управления

Систему управления шестикоординатным устройством позиционирования можно отнести к замкнутой системе с отрицательной обратной связью. Схема управления изображена на рисунке 5.1.

Управление устройствами с параллельной структурой имеет ряд особенностей, а именно одновременное управление всеми приводами при формировании требуемой траектории движения подвижного элемента. Следовательно, управление таким устройством должно осуществляться по нескольким входным переменным, а именно 6.

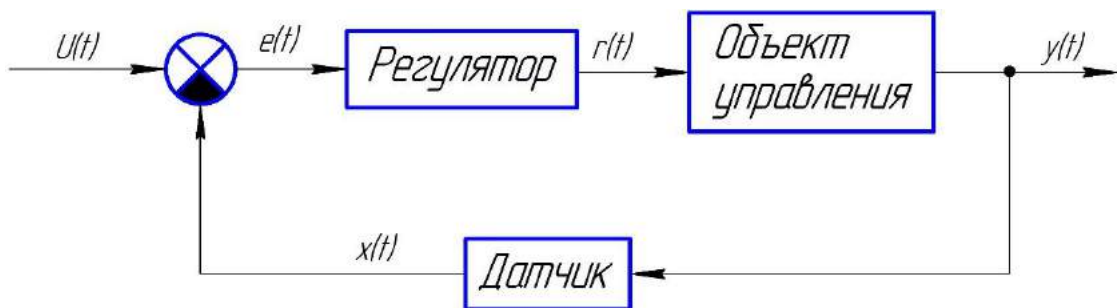


Рисунок 5.1 – Схема управления

На рисунке 5.1 приняты следующие обозначения:

$$U(t) = \begin{pmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ \dots \\ U_6(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор требуемых координат;}$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_6(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор фактических координат;}$$

$$e(t) = \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \dots \\ e_6(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор ошибок управления (рассогласования);}$$

$$r(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \dots \\ r_6(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор параметров управления.}$$

Принцип управления по данной схеме заключается в том, что сигнал, который несет в себе информацию о требуемой координате подвижного элемента подается на регулятор. Он в свою очередь, в соответствии с заданным законом управления, передает параметры управления на объект. Затем сигнал с объекта сравнивается с требуемым. Фактически данная схема стремится уменьшить рассогласование $e(t)$ между требуемыми $U(t)$ и фактическими $y(t)$ координатами. Величина рассогласования определяется по следующему выражению:

$$e(t) = U(t) - y(t); \quad (17)$$

В разрабатываемой системе управления объектами управления служат электродвигатели. Датчиками в этой системе являются емкостные матрицы от микрометра. Таким образом для реализации задачи управления необходимо разработать регулятор для управления объектом, т.е. электродвигателем.

5.2 Закон регулирования

Управление электродвигателями устройства осуществляется по некоторому закону регулирования в соответствии со схемой управления (см. рисунок 5.1). В качестве такого закона выступает ПИД-закон регулирования, а в качестве устройства осуществляющего данный закон ПИД-регулятор соответственно.

ПИД-регулятор – устройство, осуществляющее управление некоторым объектом, в контурах с обратной связью. Управляющий сигнал регулятора является

суммой трех составляющих: пропорциональной (P), интегральной (I), дифференцирующей (D).

На рисунке 5.2 изображена структурная схема ПИД-регулятора

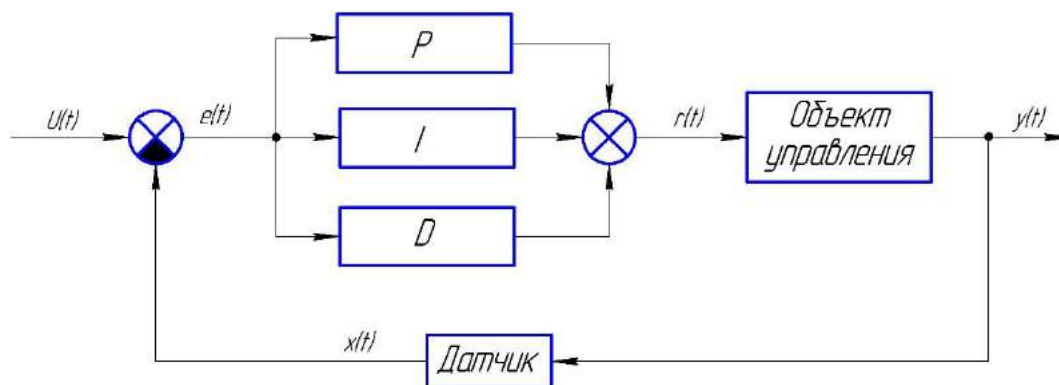


Рисунок 5.2 – Схема ПИД-регулятора

Условно ПИД-регуляторы можно разделить на непрерывные и дискретные.

Управляющее воздействие $u(t)$ для непрерывного ПИД-регулятора можно описать следующим образом:

$$u(t) = P + I + D = K \left[e(t) + \frac{1}{T_{И}} \int_0^{t_0} e(t) dt + T_{Д} \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (18)$$

где K – пропорциональный коэффициент регулятора, $T_{И}$ – интегральный коэффициент регулятора, $T_{Д}$ – дифференциальный коэффициент регулятора.

В отличие от непрерывных дискретные регуляторы обеспечивают изменение регулирующего воздействия только в определенные моменты времени. Между этими моментами регулирующее воздействие остается постоянным.

Воспользовавшись преобразованием Лапласа можно получить уравнение для управляющего воздействия в операторной форме:

$$U(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_{И} \cdot s} + T_{Д} \cdot s \right] E(s). \quad (19)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

$$W(s) = K \frac{[T_{И} \cdot T_{Д} \cdot s^2 + T_{И} \cdot s + 1]}{T_{И} \cdot s}, \quad (20)$$

s – комплексная переменная.

В выражении передаточной функции можно заметить, что степень комплексной переменной в числителе превосходит степень знаменателя. Это говорит об идеальном регуляторе и свидетельствует о его физической нереализуемости.

Метод билинейного преобразования заключается в формальной замене комплексной переменной s на выражение с комплексной переменной z .

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1}, \quad (21)$$

где $z = e^{j\omega h}$ – комплексная переменная

Импульсно передаточная функция:

$$H(z) = K \frac{\left[(T_{И} \cdot T_{Д} \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right)^2 + T_{И} \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right) + 1 \right]}{T_{И} \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right)} \quad (22)$$

Воспользовавшись программным продуктом MathCad можно упростить данное выражение:

$$H(z) = K \left[\frac{2T_{Д}(z-1)}{h(z+1)} + \frac{h(z+1)}{2T_{И}(z-1)} + 1 \right]. \quad (23)$$

Затем применив операцию факторизации можно привести дроби к общему знаменателю:

$$H(z) = K \frac{[h^2 \cdot z^2 + 2h^2 \cdot z + h^2 + 2T_{И} \cdot h \cdot z^2 - 2T_{И} \cdot h + 4T_{Д} \cdot T_{И} \cdot z^2 - 8T_{Д} \cdot T_{И} \cdot z + 4T_{Д} \cdot T_{И}]}{2T_{И} \cdot h(z-1) \cdot (z+1)}. \quad (24)$$

Полиномиальные коэффициенты в данном выражении выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
a_0 &= 2T_{И} \cdot h; \\
a_1 &= 0; \\
a_2 &= -2T_{И} \cdot h; \\
b_0 &= K(h^2 + 2T_{И} \cdot h + 4T_{Д} \cdot T_{И}); \\
b_1 &= K(2h^2 - 8T_{Д} \cdot T_{И}); \\
b_2 &= K(h^2 + 2T_{И} \cdot h + 4T_{Д} \cdot T_{И}).
\end{aligned}
\tag{25}$$

Разностное уравнение:

$$y_0 = \frac{b_0}{a_0} \cdot U_0 + \frac{b_1}{a_0} \cdot U_1 + \frac{b_2}{a_0} \cdot U_2 - \frac{a_1}{a_0} \cdot y_1 - \frac{a_2}{a_0} \cdot y_2
\tag{26}$$

Полученное разностное уравнение будет использовано в программном коде для микроконтроллера ATiny20, таким образом будет реализован дискретный ПИД-регулятор для управления электродвигателями.

В следующем разделе будет рассмотрен метод управления электродвигателями, который предполагается использовать в системе управления. Использование данного метода обусловлено тем, что разработанный в ВКР прошлых лет блок управления электродвигателем, спроектирован именно для использования данного метода управления

5.3 Метод управления электродвигателями

В качестве метода управления электродвигателем предполагается использование импульсного управления по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Импульсное управление заключается в том, что на объект управления подаются импульсы, обладающие определенными характеристиками. Изменяя данные характеристики импульсов осуществляется управление объектом [23].

При широтно-импульсной модуляции происходит изменение длительности импульсов, при этом период следования импульсов остается неизменным.

ШИМ сигнал характеризуется такими параметрами как период сигнала, ширина (длительность) импульса, коэффициент заполнения (обратная ей величина – скважность).

Коэффициент заполнения – отношение длительности импульса к периоду следования импульсов. Коэффициент заполнения определяет долю мощности, доставляемую к двигателю.

На рисунке 5.3 изображены ШИМ сигнал и параметры его характеризующие.

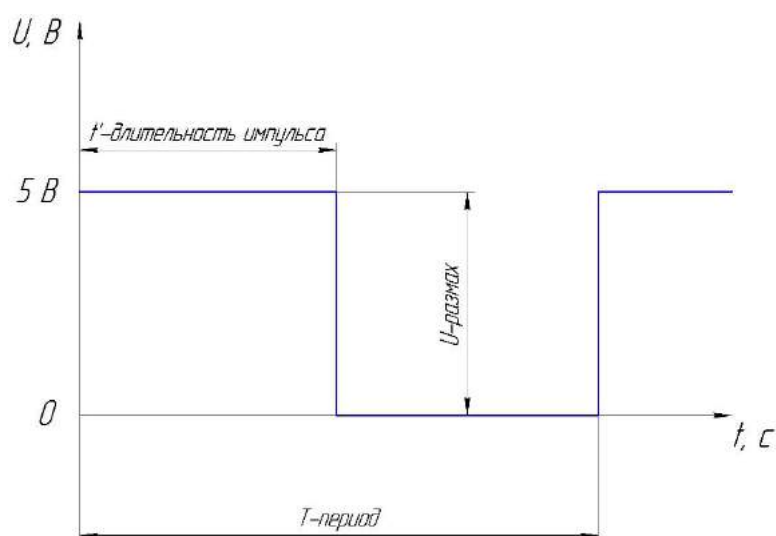


Рисунок 5.3 – ШИМ сигнал

Таким образом коэффициент заполнения (D) можно вычислить по следующей формуле:

$$D = \frac{1}{Q} = \frac{t'}{T} \cdot 100\%, \quad (27)$$

где t' – длительность импульса, с;

T – период сигнала, с;

Q – скважность сигнала.

На рисунке 5.4 изображены ШИМ сигналы с различными коэффициентами заполнения.

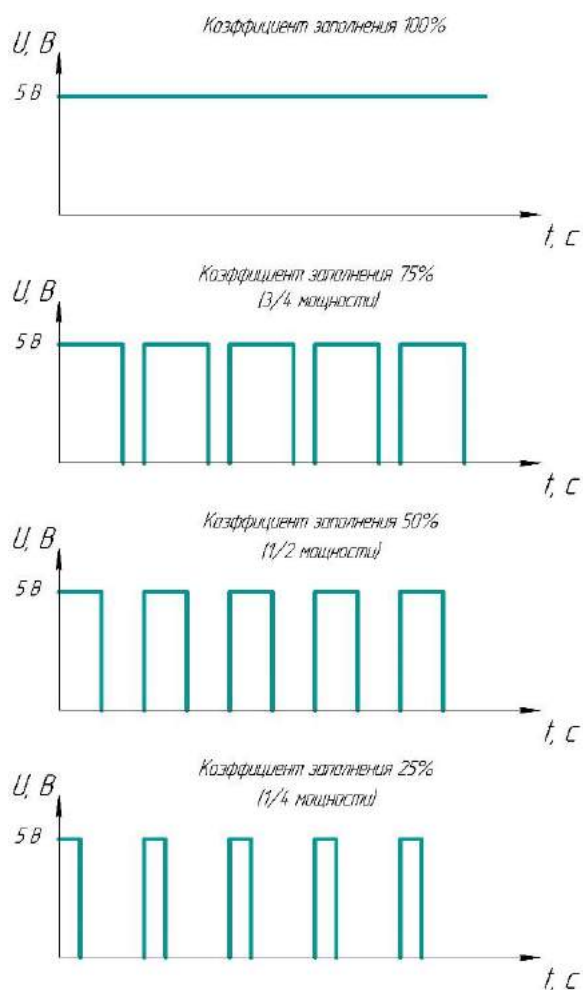


Рисунок 5.4 – ШИМ сигналы

Проведя серию испытаний над электродвигателем, который установлен на испытательном стенде, были получены значения частот вращения ротора в соответствии с заданными коэффициентами заполнения, подаваемого на статор ШИМ сигнала (таблица 5.1).

Период следования импульсов ШИМ сигнала составлял 10 мс. Отсчет времени останавливался в тот момент, когда на дисплее появлялось значение 1 мм.

Таблица 5.1 – Эмпирические данные

Кoeffициент заполнения, %	Время, с	Частота вращения, об/мин
0	-	0
5	-	0
10	-	0

Продолжение таблицы 5.1

Коэффициент заполнения, %	Время, с	Частота вращения, об/мин
20	-	0
30	-	0
40	10,39	5,78
50	7,74	7,75
60	6,64	9,04
70	5,65	10,62
80	5,15	11,65
90	4,68	12,82
100	4,19	14,32

При помощи встроенных средств программного продукта Excel был получен коэффициент корреляции, описывающий взаимосвязь между коэффициентом заполнения и частотой вращения ротора электродвигателя. Коэффициент корреляции составил 0,971 – высокая корреляция.

На рисунке 5.5 изображен график зависимости частоты вращения ротора от коэффициента заполнения сигнала.

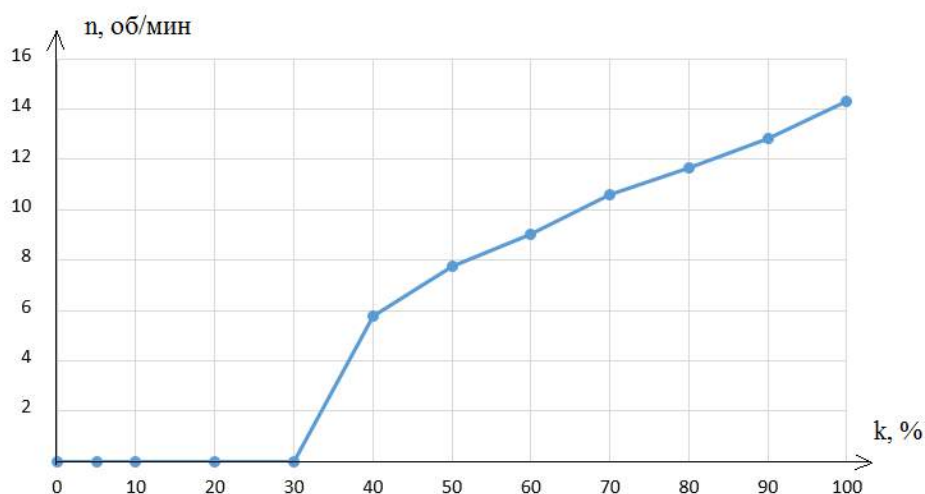


Рисунок 5.5 – Зависимость между коэффициентом заполнения ШИМ сигнала и частотой вращения ротора

На графике видно, что при коэффициенте заполнения свыше 30% зависимость имеет линейный характер. Такой вид графика обусловлен трением в подшипниках двигателя, а также его инерцией. Так при коэффициенте заполнения свыше 30%, ток в цепи якоря достаточен для преодоления сил трения.

6 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

6.1 Разработка подпрограммы считывания информации с датчиков ОС

В блоке управления электродвигателем информация полученная с датчика ОС должна обрабатываться микроконтроллером. Следовательно, необходимо разработать для микроконтроллера ATtiny20 программу для считывания информации с датчика ОС.

Функциональное тестирование программы будет проводится на испытательном стенде, описание которого приведено в разделе 3.2 пояснительной записки, после того как программа будет загружена в МК, а блок приема/передачи подключен к испытательному стенду.

Чтобы удостовериться в том, что информация считана с датчика ОС верно необходимо дополнительно подключить ЖКИ LM016L [24]. Если значение текущей длины на ЖКИ и на дисплее измерительного узла будут совпадать (допуская погрешность в 0,001 мм) значит разработанная программа считывания информации с датчика корректна.

Листинг программного кода для МК ATtiny20 для считывания информации с датчика ОС представлен в приложении И.

Для проверки данного программного кода на корректность считывания инф с датчика была собрана схема, изображенная на рисунке 6.1. На макетной плате расположен МК, к которому подключается ЖКИ. Также к МК подключены два провода идущие от блока управления электродвигателем. Благодаря операционному усилителю, установленном в блоке, МК сможет считывать информацию с сигналов с датчика ОС.

На рисунке 6.1 видно, что значение, отображаемое на ЖКИ совпадает со значением на дисплее измерительного узла (на дисплее 1571, на ЖКИ 1571).

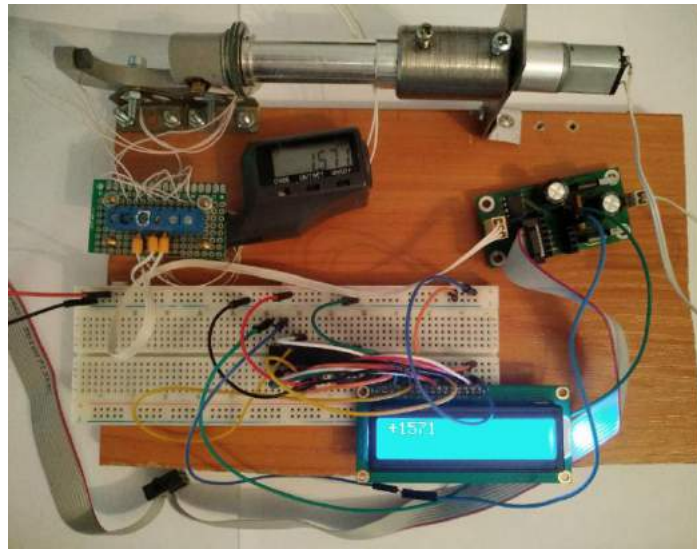


Рисунок 6.1 – Функциональное тестирование

На рисунке 6.2 изображена схема для тестирования программы (на дисплее - 3915, на ЖКИ -3916).

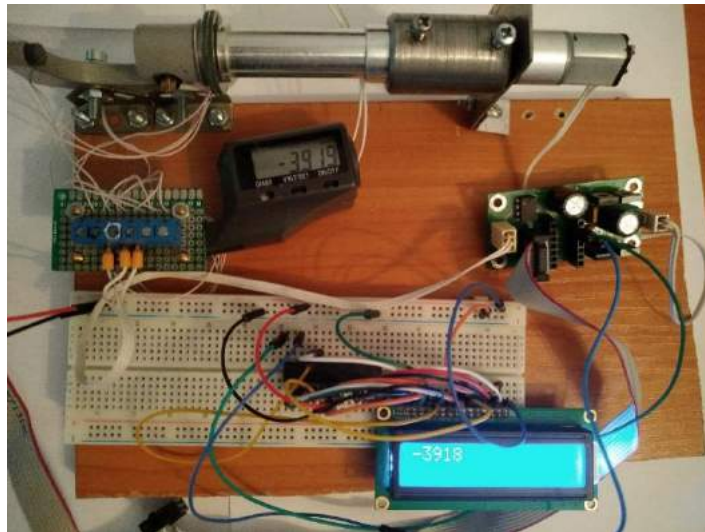


Рисунок 6.2 – Тестирование программы

На основании этого можно сделать вывод о том, что программа для считывания информации с датчика ОС работает правильно.

На следующем этапе будет разработана программа для управления мотор-редуктором ПИД-закону.

6.2 Разработка программы управления мотор-редуктором

Управление мотор-редуктором должно осуществляться по ПИД-закону. В разделе 5.2 данной пояснительной записки были получены коэффициенты разностного уравнения для дискретного ПИД-регулятора. Разностное уравнение дискретного ПИД-регулятора будет являться основой программы управления мотор-редуктором.

В разностном уравнении присутствует такой параметр, как ошибка регулирования. Согласно уравнению (17), ошибка определяется как разность требуемого и текущего значения величины, в данном случае длины. Для нахождения текущей длины необходимо использовать код программы разработанный в предыдущем разделе.

В качестве метода управления мотор-редуктором был выбрано управление при помощи ШИМ сигнала. ШИМ сигнал будет реализован при помощи режима СТС первого таймера счетчика МК ATtiny20. У первого таймера/счетчика есть два регистра сравнения OCR1A и OCR1B. Регистр OCR1A будет отвечать за период следования импульсов. При совпадении внутренней переменной счетчика со значением данного регистра необходимо на соответствующие плечи полумостов чтобы включить питание мотор мотор-редуктора. Регистр OCR1B будет отвечать за ширину импульса. При совпадении внутренней переменной счетчика со значением данного регистра необходимо подать сигналы на соответствующие плечи полумостов, чтобы отключать питание мотор-редуктора. Листинг программного кода для МК ATtiny20 для управления мотор-редуктором представлен в приложении К.

После того как программный код для управления мотор-редуктором был разработан, необходимо провести функциональное тестирование. Для этого данный программный код был загружен в МК ATtiny20, после чего блок управления электродвигателем был подключен к испытательному стенду.

При проведении функционального тестирования допускается, чтобы величина ошибки регулирования была не более 10 мкм.

Пусть необходимо чтобы значение длины на дисплее составляло 200 мкм. Для этого необходимо в программном коде переменной `micrometr_zad` присвоить значение 200.

Результат работы разработанного программного кода изображен на рисунке 7.3.

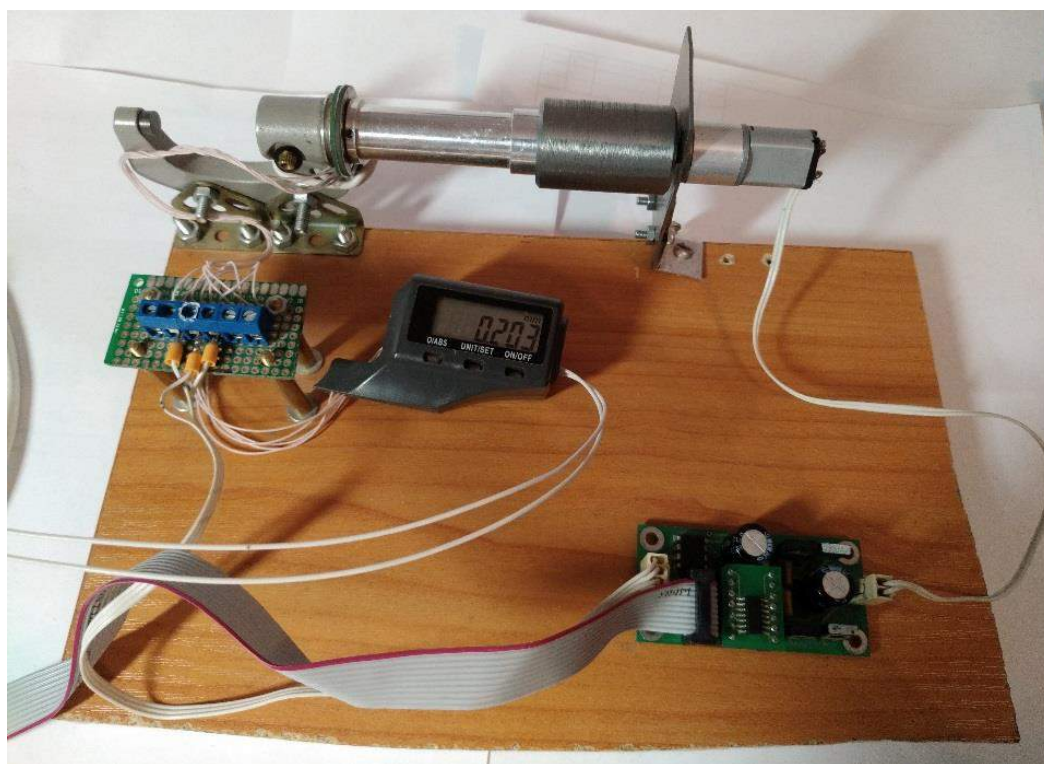


Рисунок 7.3 – Результат работы программы при значении 200 мкм

На дисплее (см. рисунок 7.3) отображено значение длины равное 203 мкм. Это означает что ошибка регулирования составляет 3 мкм.

Чтобы убедиться в том, что программа работает корректно изменим требуемое значение длины на -300 мкм (т.е. `micrometr_zad = -300`), после завершения процесса управления мотор-редуктором, на дисплее отобразится значение -299 мкм. Таким образом ошибка регулирования составила 0,001 мм.

На рисунке 7.4 отображен результат работа программы.

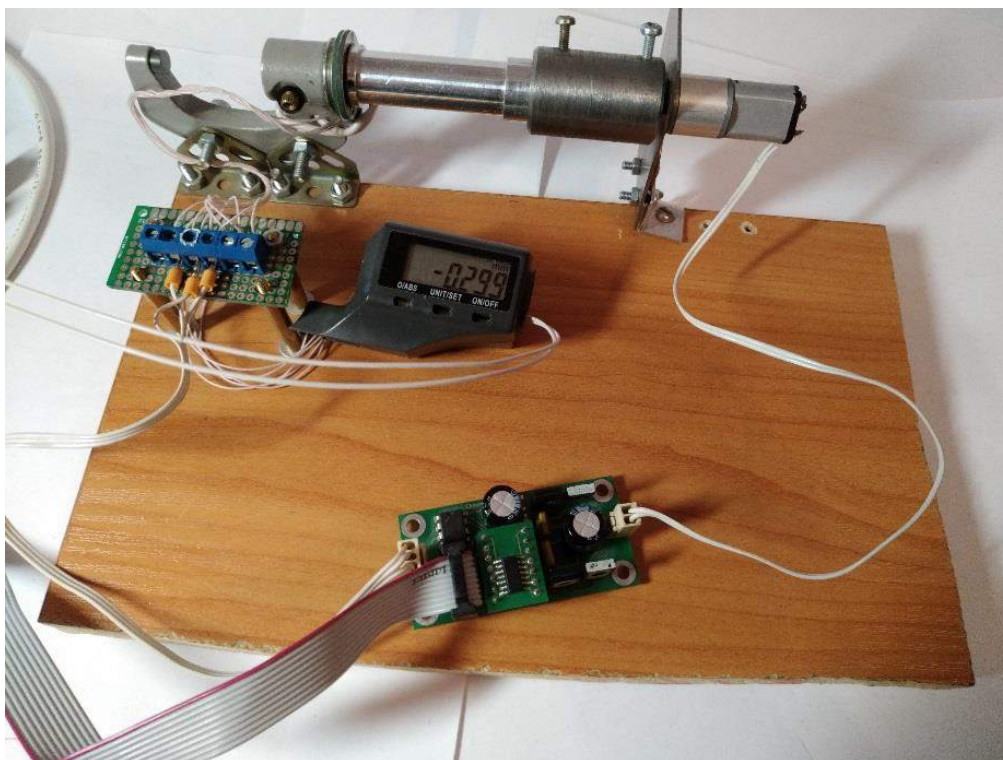


Рисунок 7.4 – Результат работы программы при значении -300 мкм

На основании этого можно сделать вывод о том, что разработанный программный код для управления мотор-редуктором прошел функциональное тестирование.

Последним этапом разработки системы управления шестикоординатным устройством является разработка программного обеспечения (ПО) для каждого из блоков, а также проведение функционального тестирования ПО и всей системы в целом. Этому будет посвящен следующий раздел.

6.3 Тестирование системы управления шестикоординатного устройства

Для тестирования системы управления шестикоординатным устройством, необходимо собрать печатный узел блока приема/передачи информации. Ввиду отсутствия возможности изготовления печатной платы для блока приема/передачи информации, было принято решение собрать печатный узел на макетной плате с использованием метода навесного монтажа проводников.

Внешний вид печатного узла блока управления электродвигателем собранного на макетной плате изображен на рисунке 7.5.

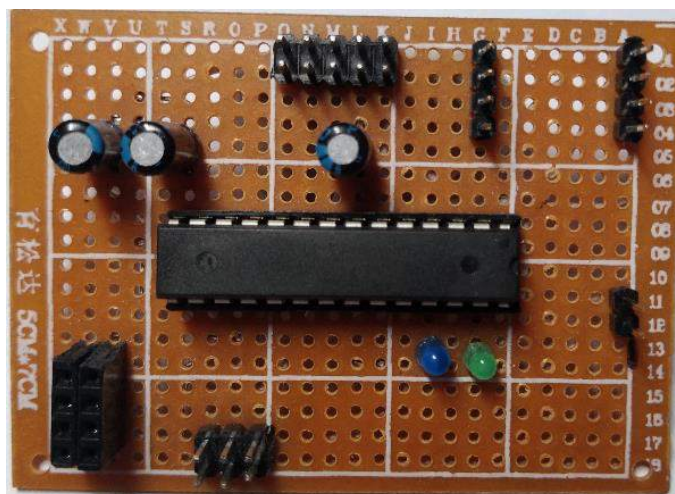


Рисунок 7.5 – Внешний вид печатного узла

Алгоритм работы системы управления представлен в приложении З.

Программный код для МК ATmega8A отображен в приложении И. В данном программном коде реализован алгоритм обмена информацией между блоком приема/передачи и ПК по протоколу USART. Также реализован алгоритм обмена информацией между блоком и модулем беспроводной передачи информации по протоколу SPI.

Программный код для МК ATmega162 отображен в приложении К. В программном коде реализованы алгоритмы обмена информацией между центральным блоком управления и модулем беспроводной передачи информации, а также между этим блоком и блоком управления электродвигателем. Обмен информацией осуществляется по протоколу SPI.

Программный код для МК ATtiny20 отображен в приложении Л. В программном коде реализованы алгоритмы считывания информации с датчика ОС, управление мотор-редуктором по ПИД-закону, обмен информацией с центральным блоком управления по протоколу SPI.

Для отправки информации с ПК на блок приема/передачи используется терминальная программа «Terminal 1.9» последовательного порта.

Интерфейс терминальной программы «Terminal 1.9» изображен на рисунке 7.6.

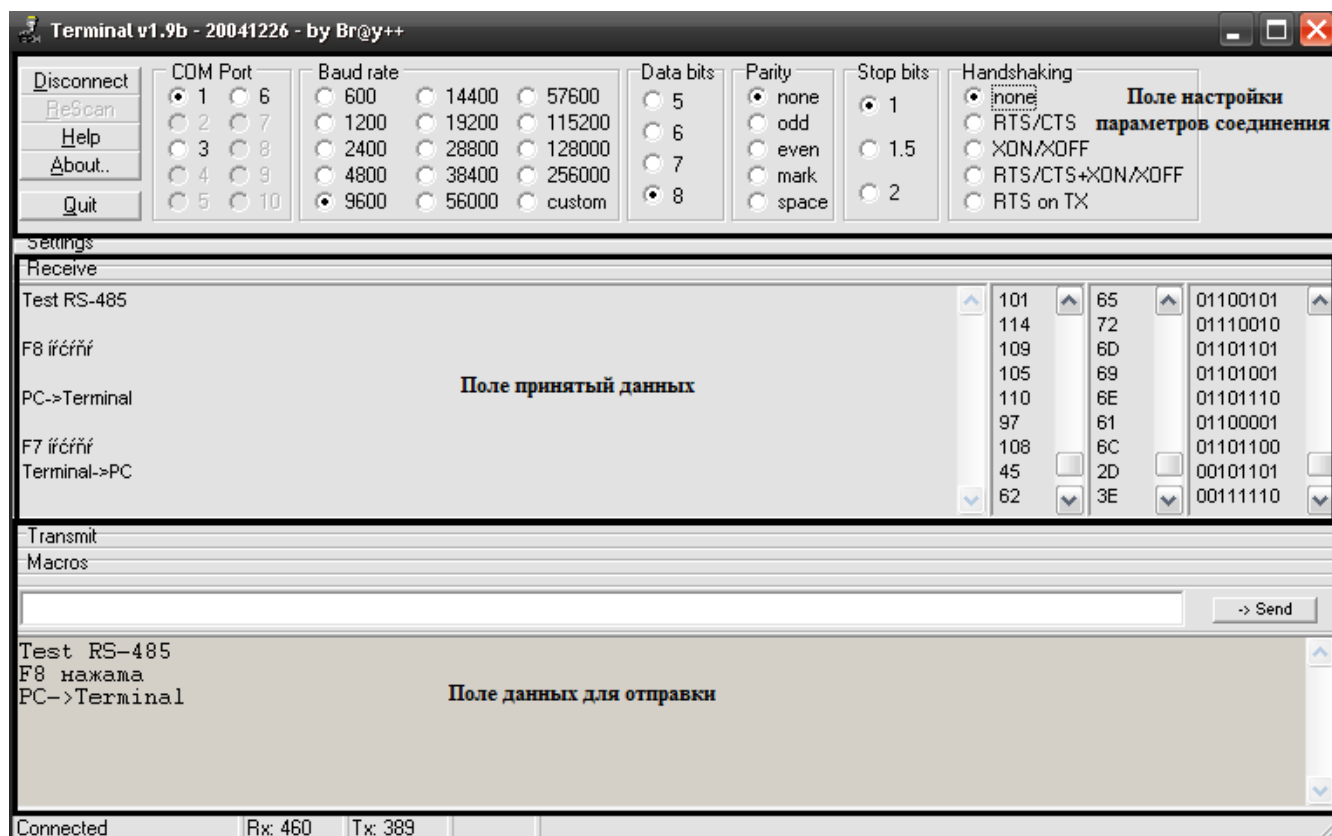


Рисунок 7.6 – Интерфейс терминальной программы

Перед началом тестирования системы управления необходимо проделать следующие операции:

- загрузить в каждый МК соответствующее ПО;
- подключить модули беспроводной передачи к блоку приема/передачи и центральному блоку управления;
- подключить преобразователь интерфейсов к блоку приема/передачи информации;
- подключить преобразователь интерфейсов к ПК;
- подключить дисплей измерительного узла к центральному блоку управления;

- центральный блок управления соединить с блоком управления электродвигателем;
- подключить блок управления электродвигателем к испытательному стенду;
- подключить питание к центральному блоку управления;
- произвести настройку параметров обмена передачи данными в терминальной программе.

После выполнения всех операций, описанных выше можно приступить к тестированию системы. Введем в поле для отправки данных терминальной программы значение -450 (рисунок 7.7).

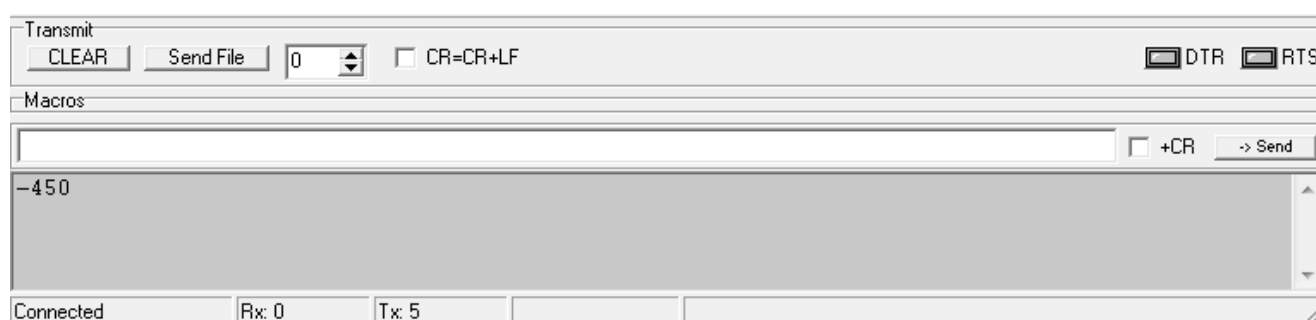


Рисунок 7.7 – Поле для отправки данных с введенным значением длины -450

После того как было введено значение и нажата клавиша «Enter», на блоке приема/передачи загорается светодиод, это говорит о том, что данные успешно отправлены по беспроводному каналу связи. Данные принимаются центральным блоком управления и передаются на блок управления электродвигателем. В соответствии с заданным законом регулирования мотор-редуктор начинает вращать шток измерительного узла. После того как на дисплее появляется значение -0,450, двигатель останавливается (рисунок 7.8).

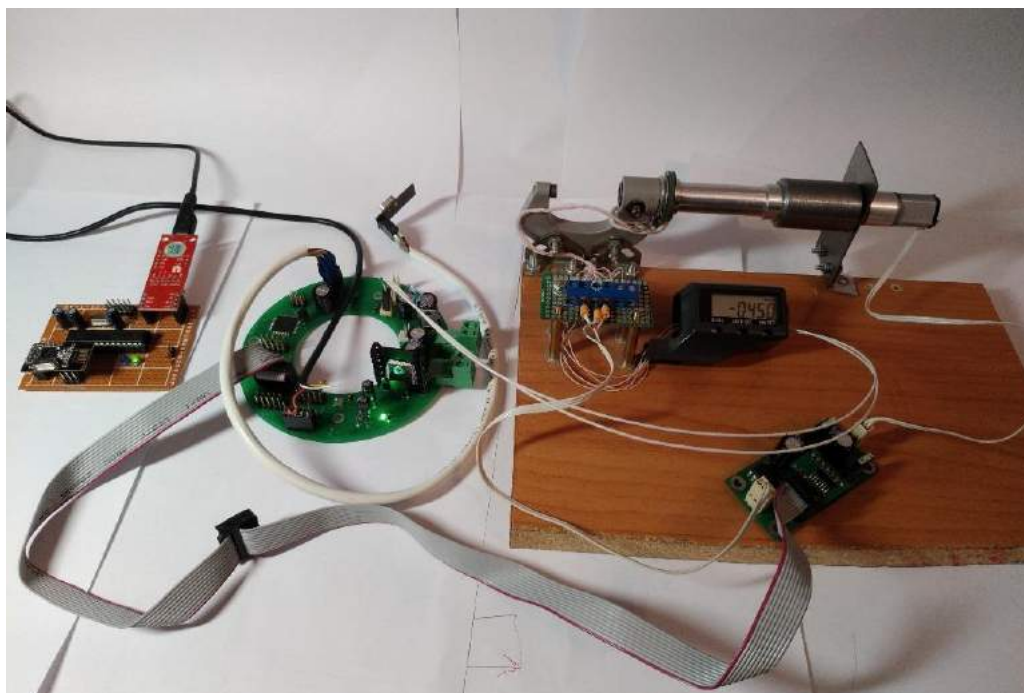


Рисунок 7.8 – Тестирование системы управления (значение -450)

Если ввести в терминальной программе значение +250 (рисунок 7.9), то двигатель начнет вращаться в обратную сторону.

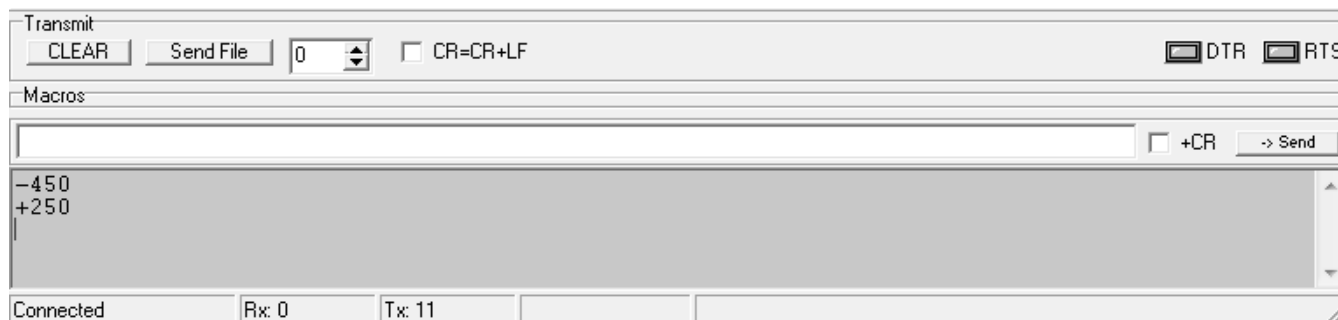


Рисунок 7.9 – Поле для отправки данных с введенным значением длины 250

После того как на дисплее измерительного узла появилось значение 0,252, двигатель остановился (рисунок 7.10).

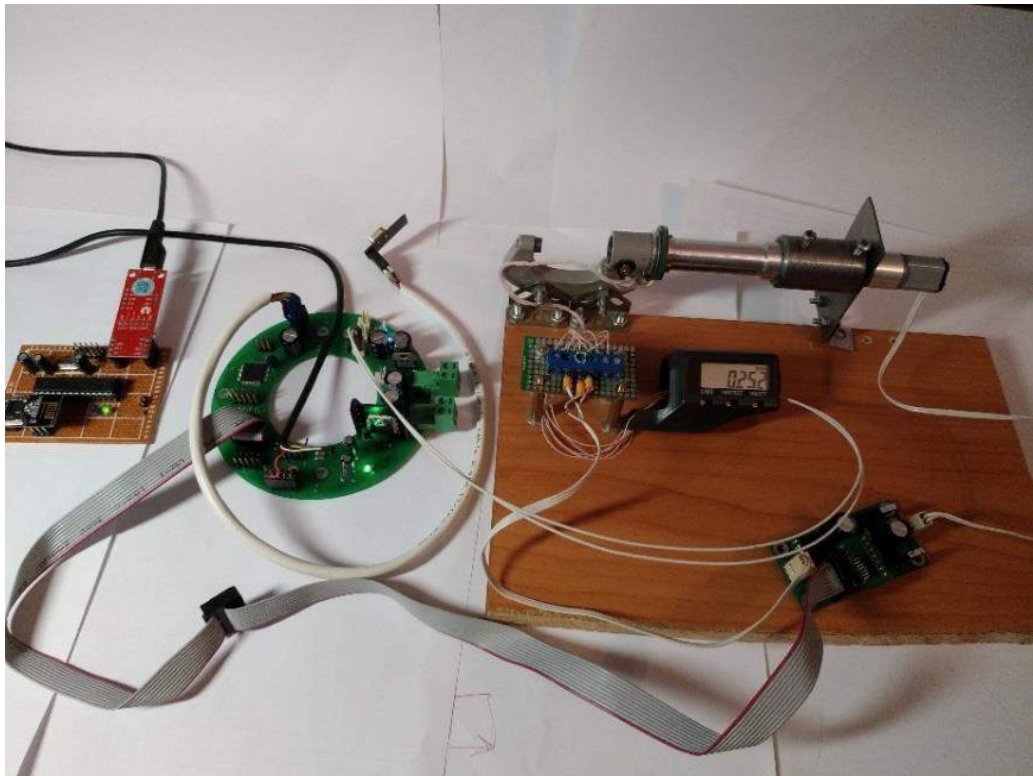


Рисунок 7.10 – Тестирование системы управления (значение 250)

На основании этого можно сделать вывод о том разработанное программное обеспечение для микроконтроллеров, разработанный блок приема/передачи работоспособны. На данный момент разработанная система управления способна управлять изменением одной штанги объекта автоматизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения курсового проекта была разработана систем управления шестикоординатным устройством позиционирования с беспроводным каналом передачи информации. Данная система осуществляет позиционирование подвижного элемента относительно неподвижного корпуса.

Для данной системы управления были разработаны кинематическая схема устройства, схемы электрические принципиальные, чертежи печатной платы и печатного узла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтдинов, А.И. Система управления многокоординатным позиционирующим механизмом: выпускная квалификационная работа / А.И. Альтдинов. – Челябинск, 2015. – 86 с.
2. Технические характеристики цифрового микрометра MDC-25MX. – <https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2014/08/2145-MDC-MX.pdf>.
3. Каталог продукции компании KYSAN Electronics: Spur Geared Motors LS-16GA030-50 – <http://www.kysanelectronics.com/Catalog/Catalog.pdf>.
4. Смирнов, В.А. Научные основы и алгоритмы управления оборудованием с параллельными приводами: монография / В.А. Смирнов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009 – 163 с.
5. Технические характеристики микроконтроллера ATmega162. – https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2513-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega162_Datasheet.pdf.
6. Технические характеристики монитора питания MCP120-450DI/TO – <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11184d.pdf>.
7. Технические характеристики стабилизатора напряжения L7805 – <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L7805.pdf>.
8. Технические характеристики стабилизатора напряжения KP142EH5B – <https://static.chipdip.ru/lib/491/DOC001491784.pdf>.
9. Технические характеристики стабилизатора напряжения MCP1700T – <https://static.chipdip.ru/lib/276/DOC000276804.pdf>.
12. Технические характеристики стабилизатора напряжения KP1158EH3B – <https://www.promelec.ru/pdf/1158en.pdf>.
11. Технические характеристики модуля беспроводной передачи информации nRF24L01 – https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf.

12. Технические характеристики микроконтроллера ATtiny20. – http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-8235-8-bit-avr-microcontroller-attiny20_datasheet.pdf.
13. Технические характеристики операционного усилителя LM358L – <http://www.unisonic.com.tw/datasheet/LM358.pdf>.
14. Технические характеристики микроконтроллера ATmega8A. – <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Microchip%208bit%20mcu%20AVR%20ATmega8A%20data%20sheet%2040001974A.pdf>.
15. Каталог продукции компании «Телеметрия»: Преобразователь интерфейсов RDC1-USB-UART – https://telemetry.ru/catalog/preobrazovatel_i_interfeysov/rdc1_usb_uart_preobrazovatel_usb_uart_s_vozmozhnostyu/.
16. Технические характеристики микросхемы USBLC6-2. – <https://www.st.com/resource/en/datasheet/CD00050750.pdf>.
17. Технические характеристики кварцевого резонатора HC-49U. – <http://www.tdmegalit.ru/upload/iblock/59b/Quarz.pdf>.
18. ГОСТ 10317-79. Платы печатные. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 3 с.
19. ГОСТ 11284-75. Отверстия сквозные под крепежные детали – М.: Стандартиформ, 2006 – 5 с.
20. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции – М.: Издательство стандартов, 1986 – 4 с.
21. ГОСТ 10316-78. Гетинакс и стеклотекстолит фольгированные. Технические условия – М.: Стандартиформ, 2016 – 6 с.
22. ГОСТ 21931-76. Припой оловянно-свинцовые в изделиях. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1986 – 4 с.
23. ШИМ-регулятор оборотов. – http://www.motor-r.info/p/blog-page_26.html.
24. Технические характеристики ЖКИ LM016L. – <http://www.picaxe.com/docs/led008.pdf>.