

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ СОРЕВНОВАНИЕ «ШАГ В БУДУЩЕЕ,
МОСКВА»

5321

регистрационный номер

Информатика и системы управления

название факультета

Проектирование и технология производства электронной аппаратуры (ИУ4)

название кафедры

Название секции "Аэрокосмическая техника, навигация и системы управления"

название работы

Автор:

Костин Юрий Борисович

фамилия, имя, отчество

ГБОУ Школа № 1534 "Академическая", 11-й

класс

наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Семеренко Денис Алексеевич

фамилия, имя, отчество

МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИРЛ

место работы

С.н.с.

звание, должность

подпись научного руководителя

АННОТАЦИЯ

на научно-исследовательскую работу

СИСТЕМА КОРРЕКТИРОВКИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

АВТОМОБИЛЯ

Цель работы: создание системы контроля угла поворота колёс масштабной модели автомобиля, необходимой для обеспечения повышения точности конечного позиционирования и/или следование заданной траектории при относительно плохом качестве рулевой системы.

Методы и приемы: данная система основана на ПИ – регуляторе и позволяет увеличить точность следования масштабной модели автомобиля заданной траектории при относительно плохом качестве рулевой системы, связанные с конструктивными особенностями. Установление угла поворота осуществляется с помощью сервопривода и измерения угла поворота передних колёс выполняется с помощью «открытых» оптронов, работающих на отражении света. Аналогичные оптроны также используются и для измерения скорости движения масштабной модели автомобиля. Используемый в проекте микроконтроллер STM32F051R8T6 выполняет аналого-цифровое преобразование и анализ электрического сигнала, полученных с этих датчиков. Для обеспечения корректных измерений в работе выполнены экспериментальные исследования по определению зависимости интенсивности отражённого света от угла поворота колёса и от типа материала, целью которых является установить оптимальные расстояния установления «открытых» оптронов.

Полученные результаты: реализована система движения автомобиля, состоящая из двух подсистем контроля скорости движения масштабной модели автомобиля и контроля угла поворота колёс; получены экспериментальные зависимости интенсивности отражённого света от типа материала, расстояния и угла поворота объекта.

Выводы: полученные экспериментальные результаты работы открытых оптронов показывают состоятельность их применение в данной системе измерения положения объекта – колеса, с последующей регулировкой. Показано, что разработанная система может применяться в робототехнических комплексах, где требуется контролировать положение объекта в пространстве.

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ	13
1.1 Анализ существующих конструкций рулевых передач	13
1.2 Системы управления направлением, скоростью движения автомобиля	14
2 ОПИСАНИЕ РАБОТЫ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ	16
2.1 Функциональная и принципиальная схемы работы микроконтроллера	16
2.2 Методы определения скорости вращения колеса	18
2.3 Схемы определения угла поворота колёс	20
3 СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ЗАДАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ	23
3.1 Зависимость выходного сигнала оптрона от внешних условий	23
3.2 Метод измерения скорости	26
4 АЛГОРИТМ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА	29
4.1 Способ разделения программы микроконтроллера на отдельные части	29
4.2 Пример реализации алгоритма по определению скорости вращения колеса	29
4.3 Регулировка направления и скорости	30
4.4 Передача данных на ПК	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	34

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ, ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

ЭДС		Электродвижущая сила
ДУП		Датчик угла поворота
ШИМ		Широтно-импульсная модуляция
МК		Микроконтроллер
ИК		Инфракрасный
АЦП		Аналого-цифровой преобразователь
ПИ-регулятор		Пропорционально-интегральный регулятор
ПК		Персональный компьютер
ММА		Масштабная модель автомобиля
USART	Universal Synchronous-Asynchronous Receiver-Transmitter	Универсальный синхронно-асинхронный приёмопередатчик
ПДП	Direct memory access	Прямой доступ к памяти

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена разработке системы контроля угла поворота колёс масштабной модели автомобиля. Такая система должна обеспечить движение автомобиля из А в Б с заданной точностью при этом рулевая система не идеальна (не позволяет повернуть колёс на заданный угол с точностью хотя бы до $0,1^\circ$, возможны пропуски поворота, не идеально сбалансирована рулевая система и др). Было установлено, что при движении автомобиля на длительные расстояния с возможными сложными поворотами приводит к неточностям конечного позиционирования. В настоящее время данную проблему решают путём модернизации всей рулевой системы в целом, что непосредственно приводит к удорожанию. Постепенная автоматизация различных отраслей человеческой деятельности приводит к необходимости создания высокоточных систем позиционирования, в связи с чем и появляется необходимость добавление специальных систем контроля положения управляемого объекта – в данном случае установление положения управляемых колёс автомобиля.

Тем самым **актуальность** данной работы определяется созданием системы регистрации текущего угла поворота колёс автомобиля и при необходимости его подстраивания для достижения заданной точности конечного позиционирования автомобиля. Электродвигатели имеют важную роль в системах поворота направляющих колёс, но различные особенности, такие как повышенная температура, неправильно настроенное питающее напряжение и другие непредвиденные факторы снижают срок службы механизма и увеличивают погрешности при его работе [1]. Важно отметить, что даже высокоточная механическая система поворота колёс периодически требует технического осмотра, замены деталей и возможные другие плановые работы, **не** выполнение которых приводит к снижению точности угла поворота.

Такая система является одним из блоков управления автомобиля при дальнейшем решении задачи построения карт помещения и при самостоятельном перемещении по помещению при решении задач наблюдения.

В настоящее время угол поворота можно определить, используя датчики, работающие на различных физических принципах. К примеру, в качестве датчика угла поворота применяют несколько типов устройств таких как, потенциометрический, оптический, магниторезистивный и другие. При этом важно отметить, что схема оптических датчиков может быть различной.

Потенциометрический датчик относится к контактным датчикам и включает два потенциометра, закрепленных на рулевой колонке. Один потенциометр смещен относительно другого на 90° , что позволяет определять относительный и абсолютный углы поворота рулевого колеса (направление вращения). Изменение сопротивления потенциометра пропорционально углу поворота рулевого колеса. Из-за невысокой надёжности, связанной с наличием подвижных контактов, потенциометрические датчики в рулевом управлении в настоящее время почти не применяются [2].

Одна из распространённых *оптических* схем определения угла поворота состоит из кодирующего диска, источника света (светодиод и световод), светочувствительного элемента (строчная камера), блока определения полных оборотов вращения (плата с электронным блоком обработки). При этом кодирующий диск жестко закреплен на рулевой колонке и имеет два сегментарных кольца и с помощью одного определяется направление вращения, а с помощью другого значение угла поворота рулевого колеса. Через световод проецируется свет на кодирующий диск и в зависимости от положения рулевого колеса через кодирующий диск, и строчная камера регистрирует больше или меньше света. На основании полученных импульсов напряжения с камеры после преобразования оптического сигнала рассчитывается угол и направление поворота рулевого колеса [2].

Магниторезистивный датчик более универсальный, так как помимо регистрации угла поворота колеса, позволяет определять и его угловую скорость. Обычно в такой системе используют два магниторезистивных элемента или датчики Холла и два подвижных магнита. Но работа такой системы нарушается при появлении внешнего магнитного поля, что и

обуславливает сложность его изготовления и экранирования чувствительных элементов [2]. Несмотря на большое число достоинств, применение такой системы в масштабной модели не целесообразно. Также при создании системы контроля/установки угла поворота колёс необходимо учитывать и конструктивные особенности рулевой систем. В настоящее время существует две часто используемые рулевые системы:

- **червячная передача** имеет такие достоинства, как плавность работы, малая шумность, большое передаточное отношение и повышенная кинематическая точность. Но также существуют и недостатки: высокие требования сборки, низкий КПД, большие потери на трение, повышенный износ, необходимость компенсации осевых усилий, возникающих в опорах червячного вала [3];

- механизм **реечной передачи** отличается простотой конструкции и высоким КПД. Основные преимущества: меньшее количество шарниров и тяг, компактность, невысокая цена, надежность и простота конструкции. С другой стороны, редуктор этого типа чувствителен к ударам от неровностей дороги – каждый толчок от колес передаётся на рулевую систему, что приводит к разрушению зубчатых колёс и реек. Для уменьшения этого негативного свойства применяются амортизирующие устройства в рулевом механизме, что несомненно приводит к удорожанию всей конструкции [4].

Несмотря на отмеченные достоинства и недостатки, все рулевые системы требуют технического осмотра, также важен баланс конечная стоимость рулевой системы и качества её исполнения. В работе делается акцент на использовании относительно низкокачественной рулевой системы с системой автоматического дорегулирования угла поворота колёс. Также использование такой системы позволит проводить технические осмотры реже.

Постановка задачи: разработать систему движения масштабной модели автомобиля с системами контроля угла поворота колёс и измерения скорости движения.

Целью работы является создание системы контроля угла поворота колёс масштабной модели автомобиля, необходимой для обеспечения повышения точности конечного позиционирования и/или следования заданной траектории при относительно плохом качестве рулевой системы.

Для достижения поставленной цели необходимо **решить следующие задачи:**

- разработать функциональную схему системы контроля угла поворота колёс, основанной на базе «открытых» оптрона и микроконтроллера и обеспечивающей необходимое направление движения автомобиля;
- выполнить теоретико-экспериментальные исследования измерения угла поворота колёс, разработать алгоритмы управления поворотом колёс;
- создание ПИ – регулятора установки заданного угла поворота;
- разработать программу управления поворотом колёс для микроконтроллера, и начертить принципиальную электрическую схему.

Положения, выносимые на защиту:

- установка колёс автомобиля зависит от конструктивных особенностей рулевой системы и большинство рулевых систем склонны с течением времени к износу, что приводит к снижению точности угла поворота, поэтому необходимо выполнять контроль угла поворота колёс;
- регистрируемый электрический сигнал, получаемый с «открытого» оптрона, зависит от типа поверхности материала от которого происходит отражение света;

Методы исследований: постановка и проведение эксперимента, методы моделирования и основные статистические методы обработки экспериментальных данных.

Практическая новизна работы определяется новым подходом в создании системы управления поворотом колёс автомобиля, обеспечивающий

точный способ его позиционирования, и независящий от механического устройства рулевой системы.

Апробация работы. Работа прошла апробацию на открытом уроке по физике, и на открытом уроке дополнительного образования «Цифровые устройства и микроконтроллеры».

Структура и объем работы. Работа состоит из четырех основных разделов, введения и заключения.

Во **введении** определена актуальность работы и её практическая значимость, кратко описаны уже существующие аналоги систем контроля угла поворота колёс. Определена цель работа и задачи, необходимые для достижения цели.

В **первом разделе** приведены результаты анализа существующих решений управления поворотом колёс автомобилей. Рассмотрены основные конструкции управления поворотом колёс. Показано, что в большинстве автомобилей отсутствуют электронные системы измерения угла поворота колёс, что, несомненно, определяет актуальность выбранной темы.

Во **втором разделе** приведена общая функциональная схема автомобиля, состоящая из пяти основных модулей и дано обоснование разбиения системы управления автомобиля. Показаны различные методы измерения линейных перемещений и обоснован выбор использования «открытых» оптронов. Также в этом разделе представлена принципиальная электрическая схема системы контроля угла поворота и приведены основные алгоритмы работы.

В **третьем разделе** представлены алгоритмы работы микроконтроллера при проведении экспериментальных исследований по определению оптимальных характеристик и положения «открытых» оптронов относительно поверхностей объектов для определения угла поворота колёс. Разработаны соответствующие экспериментальные установки и определены основные характеристики открытых оптронов.

В **четвёртом разделе** представлены результаты основных экспериментальных исследований, подтверждающих гипотезу об

использовании датчиков – «открытых» оптронов для определения скорости вращения колёс и угла поворота колёс. Отмечены основные проблемы при измерении угла поворота колёс. Показаны основы применения ПИ – регулятора при установке заданного угла поворота колёс, и показано, что данный способ установки колёс хорошо согласуется с установкой заданной траекторией движения автомобиля.

В **заключении** сделаны основные выводы об использовании разработанной системы, отмечены её достоинства и недостатки, отмечены перспективы её использования.

Основными **результатами работы** являются:

- результаты проведённых исследований работы «открытого» оптрона;
- реализованный на языке С алгоритм ПИ – регулятора для подстройки угла поворота колёс автомобиля;
- результаты моделирования работы ПИ – регулятора.
- разработанная и отлаженная программа для микроконтроллера управления скоростью вращения колёс и контроль угла поворота;

В качестве **практической ценности** работы хочется отметить дальнейшую возможность использования данной системы не только в рулевой системе автомобиля, но и в робототехнических комплексах. Полученные экспериментальные результаты в работе по принципам работы «открытого» оптрона в зависимости от внешних условий могут быть использованы для определения положения объекта в пространстве. Конечно, данный способ имеет ограничения на максимальный угол поворота объекта, и на максимальное расстояние от «открытого» оптрона до объекта. Однако даже при таких ограничениях алгоритмы и программы для микроконтроллера разработанной системы могут быть использованы в аналогичных системах.

Разработанная система контроля угла поворота колёс – это первый шаг в создании автомобиля с возможностью перемещения без участия оператора, при этом задаются координаты начального и конечного пункта назначения. В случае нарушения работы рулевой системы, к примеру, поворот колёс на

заданный угол (путём установления скважности широтно-импульсной модуляции для серво двигателя или проскальзывания шагов поворота шагового двигателя) не возможен, приведёт к сбою рулевой системы без обратной связи (непосредственно измерение угла поворота колёс), а использование данной системы решает данную проблему.

Реализация результатов. Результатами работы являются система контроля движения (состоит из двух систем: система контроля угла поворота колёс и система определения скорости движения) масштабной модели автомобиля; программы для персонального компьютера, которая принимает данные от разработанной системы и сохраняет данные на жёсткий диск персонального компьютера; экспериментальные результаты определения интенсивности отражённого света от расстояния до объекта, окрашенного в различные цвета.

Общий объём работы 34 страниц, 13 рисунков, список использованных источников из 12 наименований.

1 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ

1.1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РУЛЕВЫХ ПЕРЕДАЧ

Конструкций управления колёсами автомобиля придуманы множество решений. В настоящее время наиболее используемые конструкции управления рулевыми колёсами являются *реечная* и *червячная* передачи.

Червячная передача, схема конструкции которой состоит из червяка (винта с резьбой), и червячного колеса, (зубчатого колеса с зубьями особой формы) [3].

Реечная зубчатая передача состоит из зубчатого колеса и рейки. Передача выполняется с зубьями различных форм и служит для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот. Отличительной особенностью является малое количество деталей, что повышает надёжность, уменьшает размер механизма и снижает стоимость. Из недостатков: редуктор чувствителен к неровностям – толчки разрушают зубчатые колёса и рейки; зубчатое зацепление приводит к неравномерному перемещению рейки [4].



Рисунок 1 – Фотография рулевой система MMA

В используемой MMA система поворота колёс основана на червячной передаче, в которой червяк и валик заменён на сервопривод.

1.2 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЕМ, СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Для обеспечения заданной скорости ММА используется коллекторный двигатель, включённый в диагональ мостовой транзисторной схемы. Такой способ подключения обеспечивает управление, как направлением так и скоростью вращения вала двигателя. При этом скорость вращения колёс может регистрироваться различными способами, к примеру, энкодером или магнитами в составе с датчиками Холла.

В настоящее время одни из самых распространенных двигателей, используемые для поворота его вала на заданный угол – это сервоприводы, шаговые двигатели. Однако в некоторых схемах могут использоваться и коллекторные двигатели. Несмотря на широкое их распространение каждый двигатель обладает как своими достоинствами так и недостатками.

Сервопривод состоит из системы шестерёнок и системы определения положения вала коллекторного двигателя. Такая реализация системы с использованием обратной связи обеспечивает поворот на заданный угол и удержание вала в текущем положении. Главным преимуществом является работа с быстрым ускорением, отсутствием значительных вибраций и относительно низкая стоимость. Но при длительном использовании и изнашивании шестерёнок необходимо дополнительно контролировать угол поворота вала [11].

Шаговые двигатели преобразуют управляющий импульс тока в угловое перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении. При этом угол поворота вала при стандартном режиме управления обычно составляет $1,8^\circ$, при использовании специальных систем управления этот угол можно уменьшить до $1/16$. Отличительной особенностью шагового двигателя является дискретное вращение, при котором заданному числу импульсов соответствует определенное число совершаемых шагов, что является большим преимуществом, так как отсутствует необходимость устанавливать датчики для определения поворота. Но, несмотря на это, ошибка поворота может составлять до 0,5 шага. Также благодаря такому способу работы достигается высокая

надежность, но для удержания вала в заданном положении потребляется ток, и в мобильной системе это может привести к необходимости увеличения объёма батареи [5, 6, 11].

Коллекторный двигатель состоит из неподвижной части – статора и подвижной – ротора. В статоре располагаются обмотки возбуждения, ротор отвечает за передачу возникающей механической энергии. Одна из составляющих частей ротора – вал. С одной стороны, на валу размещён коллекторный узел, с помощью которого на обмотки ротора передаётся электрическая энергия. Из преимуществ: простое устройство, возможность регулировки скорости в широких пределах и низкая стоимость. Из недостатков можно выделить высокий уровень шума, подверженность износу частей двигателя [7].

Так, изначально, конструкция рулевой системы включала в себя сервопривод, что является оправданным в данной ММА, из-за малой стоимости, небольших размеров и меньшего, по сравнению с шаговым двигателем, энергопотребления, поэтому система рулевого управления была реализована по стандартной схеме управления сервоприводами. Несмотря на это, программа была разработана таким образом, чтобы можно было легко заменять типы двигателей. Система измерения угла поворота колёс работает независимо от типа используемого двигателя и обеспечивает, при необходимости, поворот колёс до ближайшего возможно угла согласно ПИ-регулятору. Скорость вращения колёс ММА также задаётся с помощью ПИ-регулятора и регистрируется с помощью открытых оптронов. Несомненно для задания направления скорости вращения колёс был выбран коллекторный двигатель.

2 ОПИСАНИЕ РАБОТЫ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЯ

2.1 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМЫ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Различные элементы конструкции сгруппированы по целевому назначению на блоки измерения скорости, измерения угла поворота колёс, управления двигателем, передачи информации на ПК и рулевой системы. Взаимодействие частей показано на функциональной схеме устройства. Такое упрощает доступ к различным модулям и позволяет при необходимости изменять их, не затрагивая остальные компоненты. Разбиение аппаратной части системы также делит и программу на части, что улучшает «читаемость» кода и облегчает его отладку, за счёт уменьшения времени, затрачиваемого на поиск и исправление ошибок. Одно из дополнительных преимуществ такого подхода к написанию программы – более простое, по сравнению с неделимым кодом, добавление новых функций и изменение уже написанных.

Система управления ММА благодаря группировке элементов системы по целевому назначению, разбита на пять основных модулей, как показано на рисунке 2. Такое разделение облегчает разработку программы для МК и разбиение программы МК на отдельные части, что улучшает читаемость кода и облегчает его отладку, сокращая время нахождения и исправления ошибок, а также даёт преимущество по модернизации исходных кодов в случае дальнейшего совершенствования.

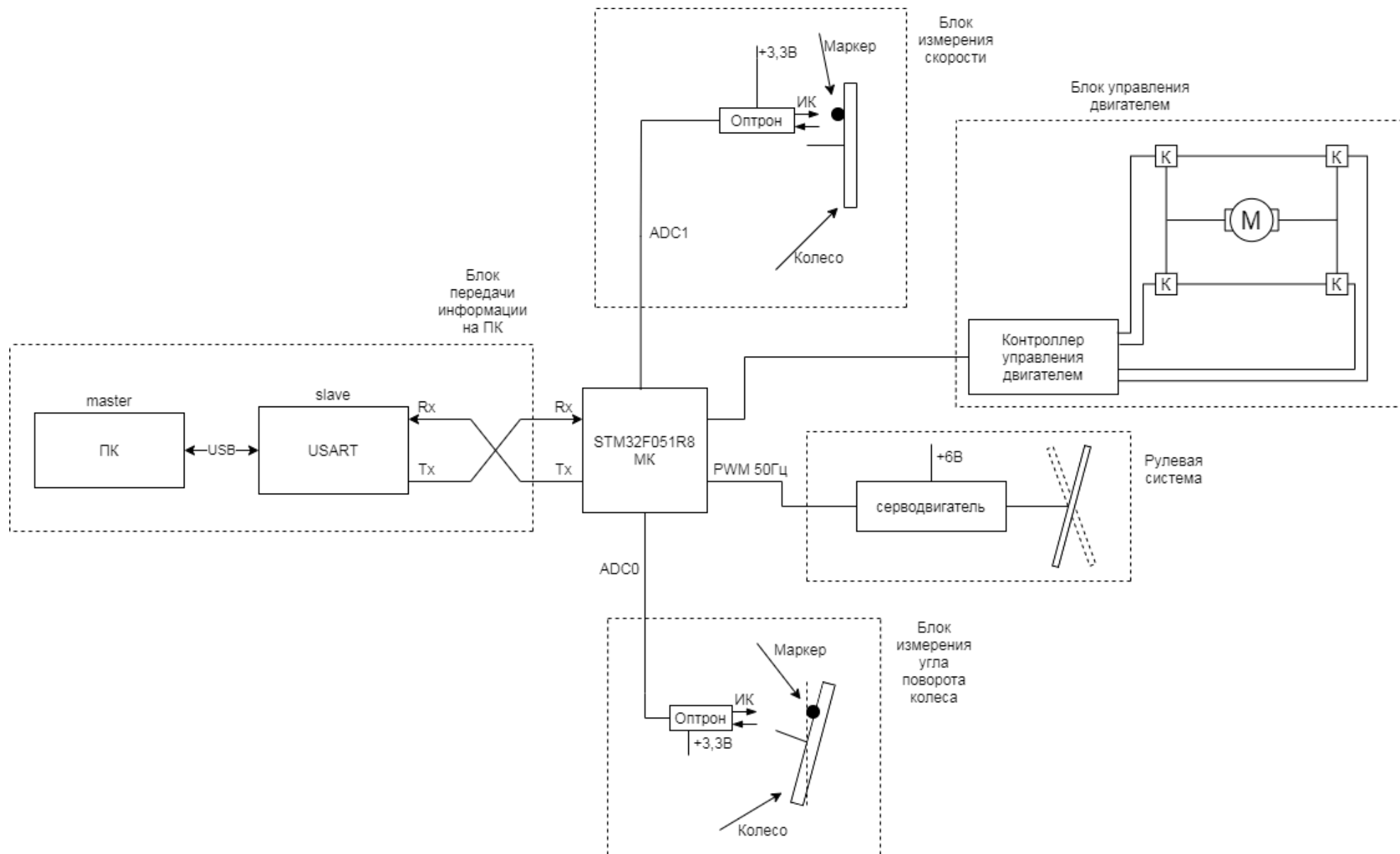


Рисунок 2 – Функциональная схема ММА

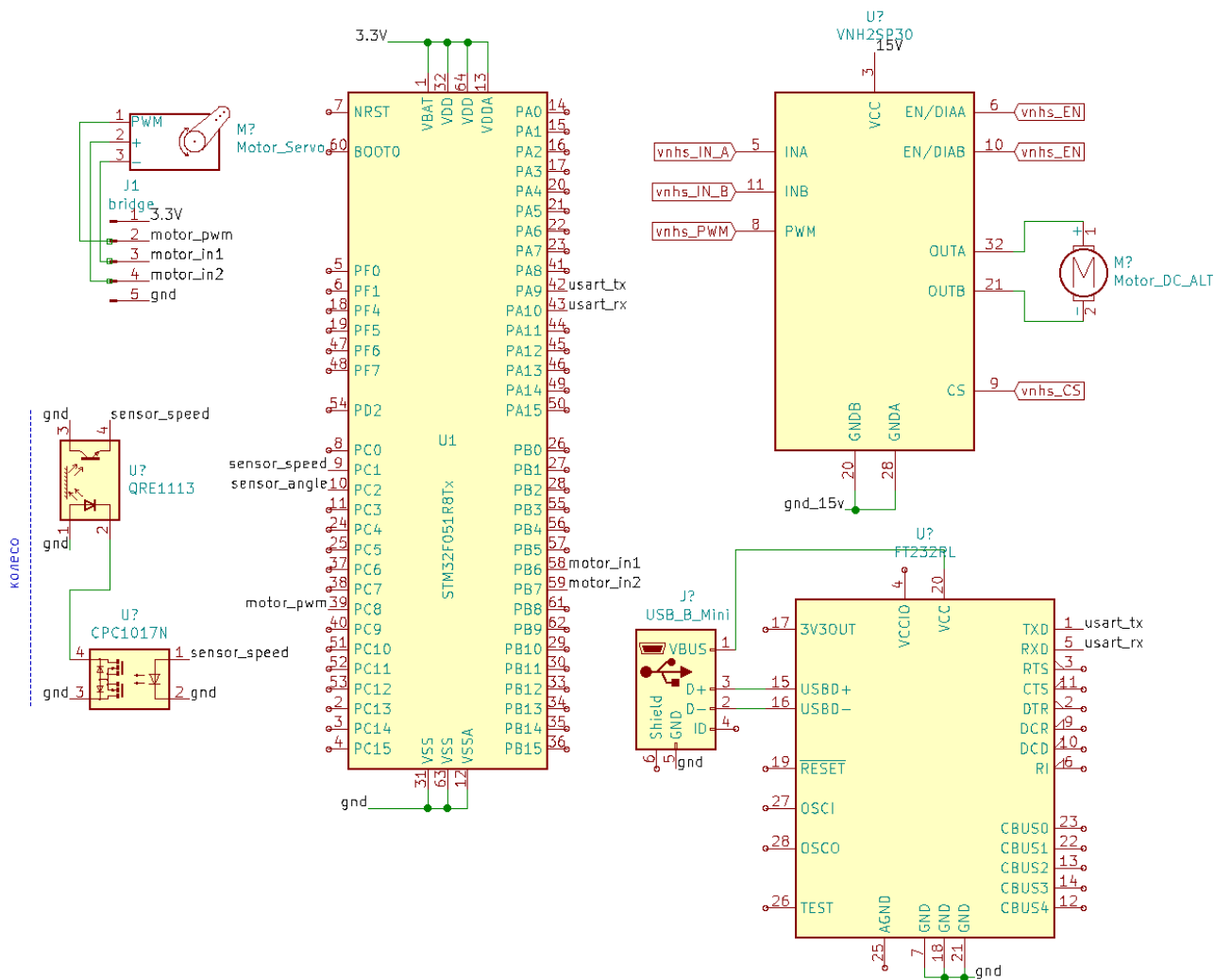


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема ММА

Согласно разработанной функциональной схеме системы управления автомобилем была разработана принципиальная электрическая схема в системе KiCad, показанная на рисунке 3.

2.2 МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕСА

На данный момент в качестве датчиков частоты вращения колёс часто применяются активные и пассивные по принципу работы.

Пассивные датчики состоят из задающего и чувствительного элементов. Чувствительный элемент выполнен в виде катушки с железным сердечником и соприкасающимся с ним постоянным магнитом. Задающий элемент представляет собой железное кольцо с зубьями. В соответствии с законом электромагнитной индукции магнитное поле датчика меняется в зависимости

от того, находится датчик напротив зуба на диске или напротив промежутка. Следовательно, прохождение через магнитное поле датчика каждого из зубьев индуцирует напряжение в цепи катушки датчика. Подсчёт числа импульсов напряжения позволяет системе рассчитать частоту вращения и скорость колеса [2].

Преимуществом является простота конструкции. Недостатками являются необходимость обеспечить высокую точность зазора между элементами, большая масса и размеры и низкая точность при малых скоростях.

Активные датчики также состоят из двух компонентов: чувствительного и задающего. Чувствительный компонент включает датчик магнитного поля и электронную схему. Задающий элемент представляет собой пластмассовое кольцо, участки поверхности которого намагничены в противоположных направлениях (магнитное кольцо). Северный и южный полюса магнитов выполняют функции зубцов и впадин колеса. При прохождении датчика магнитного поля через изменяющееся магнитное поле изменяется и возникающая в нем ЭДС Холла, а для магниторезистивных датчиков изменяется его сопротивление. Чем быстрее намагниченные участки магнитного кольца проходят мимо датчика магнитного поля, тем быстрее изменяется и ЭДС (напряжение) Холла. Частота вращения колеса с датчиками этого типа, так же как и с пассивными, определяется исходя из частоты изменения напряжения [2].

Из преимуществ можно выделить меньшие размеры конструкции, высокую точность, которая не зависит от измеряемой частоты. Из недостатков является необходимость подключать дополнительное питание.

Также существует и другой способ измерения частоты вращения колёс. В настоящее время такие устройства получили название *энкодер* или *ДУП*.

Энкодер используется для точного измерения цифровым способом угла поворота, направления, скорости и положения колеса. По способу выдачи данных энкодеры делятся на инкрементный и абсолютный.

Инкрементальный энкодер имеет диск с метками, по которым формируется последовательность импульсов, частота которых зависит от разрешения и скорости вращения. В датчике существуют два выхода, на которых импульсы сдвинуты по фазе на четверть. По разнице фаз определяется направление вращения. Основным недостатком такого способа является необходимость непрерывной обработки и анализа сигналов, а для определения положения необходимо сперва найти нуль-метку [8, 11].

Абсолютный энкодер имеет поделённый на сектора диск, где каждый участок имеет свой. Благодаря такому не требуется создавать нулевой сектор, относительно которого рассчитывается угол, в любой момент времени известно абсолютное положение энкодера, даже в неподвижном положении сразу после включения датчика [8, 11].

Но из-за высокой стоимости этих датчиков и сложности установки их в заданной ММА рассмотрены другие не менее перспективные решения для измерения скорости вращения колёс.

Мной был выбран оптический датчик – открытый оптрон, работающий на отражении света от препятствия при этом, величина отражённого света зависит от типа поверхности и её цвета, как было установлено в ходе экспериментальных исследований. Для упрощения разработки программы для микроконтроллера и обеспечения измерения высокой скорости вращения колёс внутренняя поверхность колеса была на половину покрашена в белый и наполовину в чёрный цвета, что позволило получить сигнал прямоугольной формы, частота которого зависит от частоты вращения колеса.

2.3 СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА ПОВОРОТА КОЛЁС

В настоящее время уже существуют датчики для контроля траектории движения автомобиля, основанные на различных физических принципах. Имеется несколько типов устройств таких как, потенциометрический, оптический, магниторезистивный и другие. При этом важно отметить, что схема датчиков может быть различной

Потенциометрический датчик относится к контактным датчикам и включает два потенциометра, закрепленных на рулевой колонке. Один потенциометр смещен относительно другого на 90° , что позволяет определять относительный и абсолютный углы поворота рулевого колеса и направление вращения. Изменение сопротивления потенциометра пропорционально углу поворота рулевого колеса. Из-за невысокой надёжности, связанной с наличием подвижных контактов, потенциометрические датчики в рулевом управлении в настоящее время почти не применяются [2].

Одна из распространённых *оптических* схем определения угла поворота состоит из кодирующего диска, источника света, светочувствительного элемента и блока определения полных оборотов вращения (плата с электронным блоком обработки). Свет проецируется на кодирующий диск и в зависимости от положения рулевого колеса строчная камера регистрирует больше или меньше света. На основании полученных импульсов напряжения с камеры после преобразования оптического сигнала рассчитывается угол и направление поворота рулевого колеса [2].

Магниторезистивный датчик более универсальный, так как помимо регистрации угла поворота колеса, позволяет определять и его угловую скорость. Обычно в такой системе используют два магниторезистивных элемента или датчики Холла и два подвижных магнита. Измерения построены на том, что для каждого положения рулевого колеса существует свое положение магнитов, которое фиксируют магниторезисторы. Но работа такой системы нарушается при появлении внешнего магнитного поля, что и обуславливает сложность его изготовления и экранирования чувствительных элементов [2].

Несмотря на большое число достоинств, применение такой системы в масштабной модели не целесообразно, по причине своего относительно большого размера и высокой стоимости. Также на ММА используется нестандартная для обычного автомобиля рулевая передача, что дополнительно увеличивает трудности при установке такой системы.

Поэтому система контроля скорости вращения колеса и его угла поворота основана на оптроне «открытого типа». Открытый оптрон, внешний вид которого показан на рисунке 4.

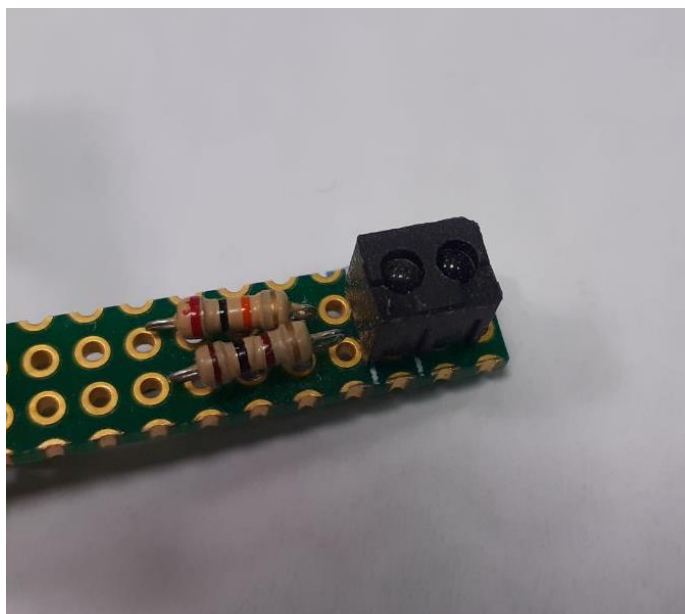


Рисунок 4 – Фотография открытого оптрона

Хочу отметить, что схема включения оптрона достаточно проста и состоит в задании тока через светодиод, а также подбор резистора для транзистора в цепи коллектора. Получение и обработку данных, получаемых с датчика, выполняется на МК STM32F051R8, при этом сложность программы заключается в подборе необходимой частоты преобразования встроенного АЦП.

3 СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ЗАДАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ММА

3.1 ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ОПТРОНА ОТ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ

Основным элементом управления и контроля является МК STM32F051R8. Его работа заключается в формировании ШИМ сигналов, поступающих на модули установления скорости и угла поворота и непрерывном измерении аналогового сигнала с оптронов с помощью встроенного АЦП с достаточной частотой не более 20 кГц на каждый канал АЦП.

Для определения оптимального расположения датчиков была создана опытная экспериментальная установка, и проведены соответствующие исследования по определению зависимости влияния цвета отражающей поверхности на количество света, попадающего в оптрон.

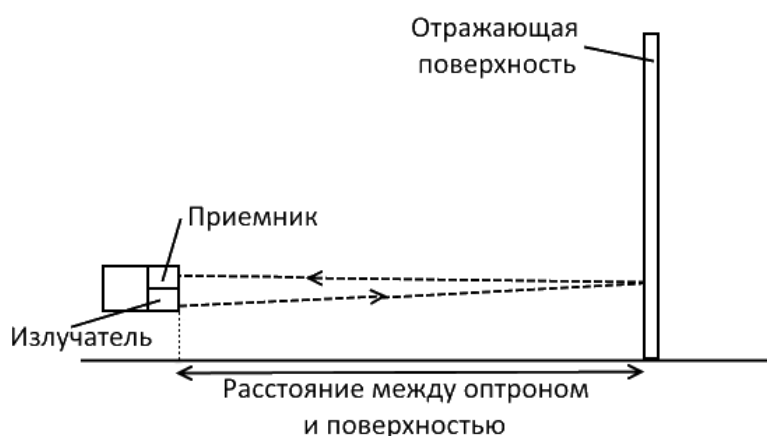


Рисунок 5 – Схема измерения зависимости интенсивности отражённого от поверхности света при изменении типа поверхности и расстояния от датчика до поверхности объекта

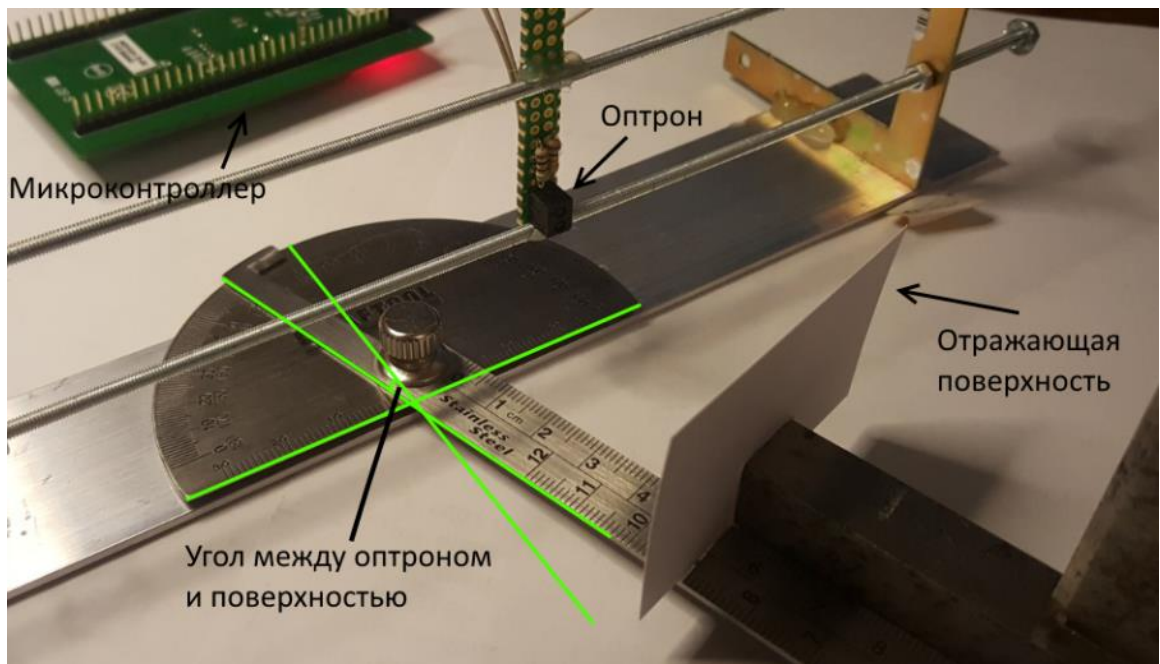


Рисунок 6 – Схема измерения зависимости интенсивности отражённого от поверхности света от угла поворота поверхности объекта

В результате измерений была установлена зависимость, показанная на рисунке 7.

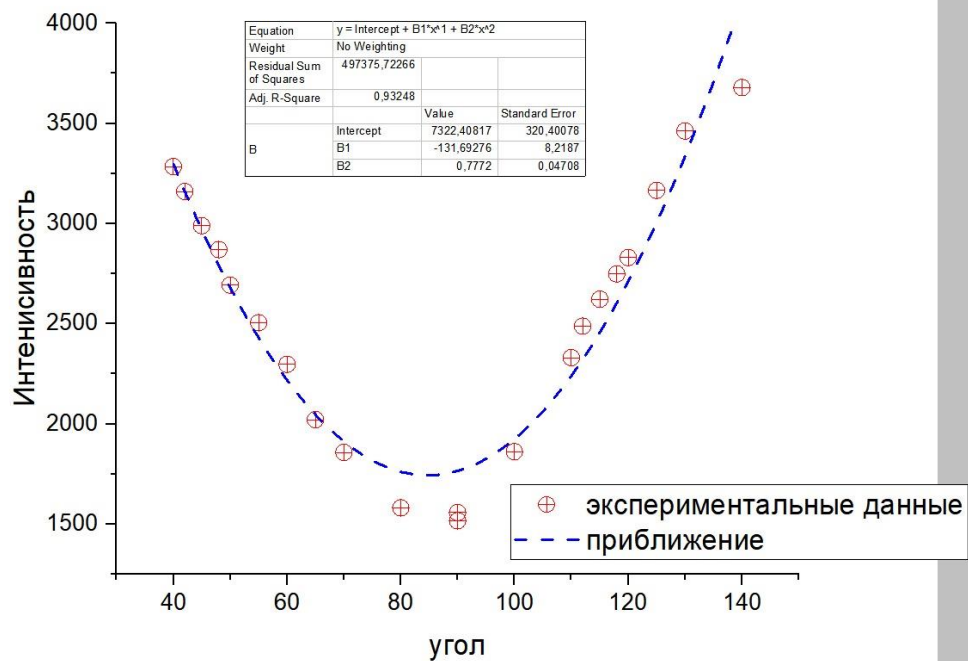


Рисунок 7 – График зависимости интенсивности света, от угла поворота белой бумаги

Из полученной экспериментальной зависимости (рисунок 7) можно сделать вывод, что на точность измерений влияют много внешних факторов, несмотря на это полученные экспериментальные данные имеют очевидную закономерность, но для повышения точности необходимо использовать ПДП режим и выполнять обработку данных, связанную с усреднением полученных данных, отбрасывая самые большие и маленькие значения.

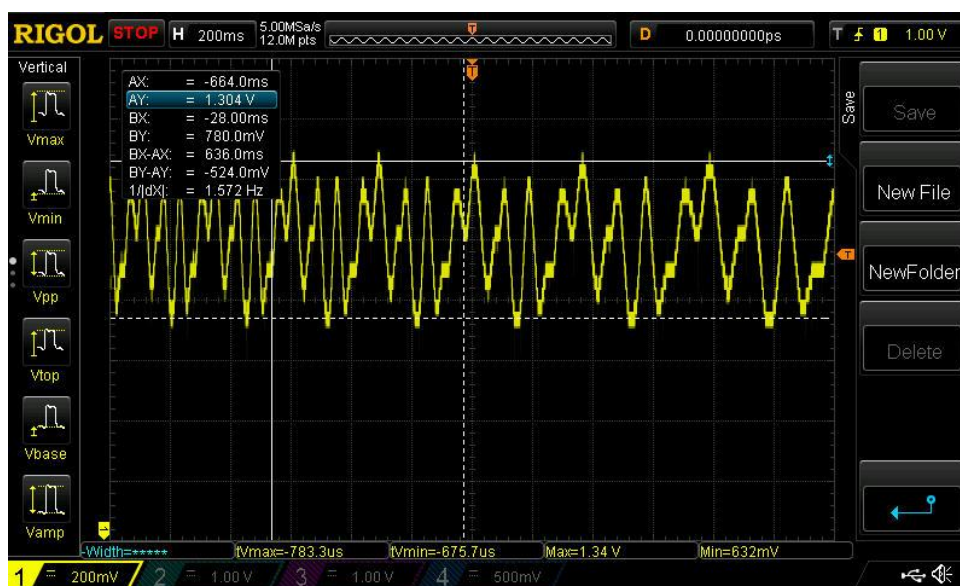
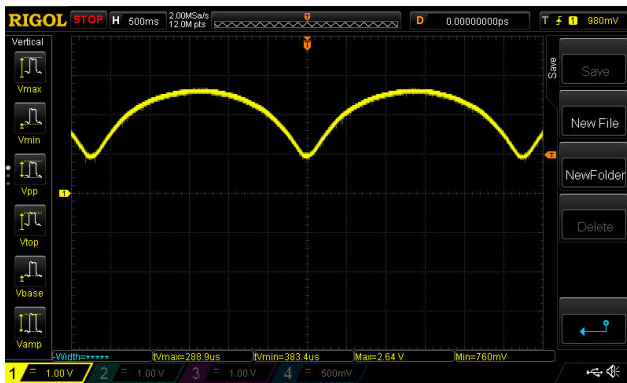


Рисунок 8 – Осциллограмма, полученная с оптрона, контролирующего угол поворота колеса при его вращении

На рисунке 8 показана осциллограмма, которая была получена в результате вращения рулевого колеса. К сожалению, полученная осциллограмма не позволяет детектировать угол с заданной точностью, и установка датчика напротив колеса является не пригодным, и необходимо устанавливать датчики напротив поверхности, вращение которых исключено.

При отсутствии вращения рулевого колеса результат измерения сигнала представляет собой ожидаемый результат, анализ которого показывает строгую зависимость угла поворота колеса от аналогового сигнала, получаемого с датчика (рисунок 9а). Форма аналогового сигнала, показанная на рисунке 9б, является результатом измерения в реальных условиях – при вращении колеса. Форма, полученного сигнала показывает зависимости расположения датчика и поверхности колеса.



а)



б)

Рисунок 9 – Осциллограммы, полученные с открытого оптрона, установленного напротив рулевого колеса, угол которого плавно меняется; при отсутствии вращения а) при вращении б)

Основным выводом из выполненных исследований и анализа полученных данных является требование измерения угла при отсутствии вращения, т.е. установка датчика напротив не вращающейся поверхности.

3.2 МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ

Как было сказано выше, определение скорости вращения колеса ММА выполняется с помощью открытого оптрона, при этом половина колеса была окрашена в чёрный цвет, другая – в белый. Такая окраска связана с тем, что полосы имеют равную величину и при обработке полученных данных с АЦП будет регистрироваться сигнал прямоугольной формы, частота которого будет зависеть от скорости вращения колеса. Осциллограммы измерения скорости показаны на рисунке 10.

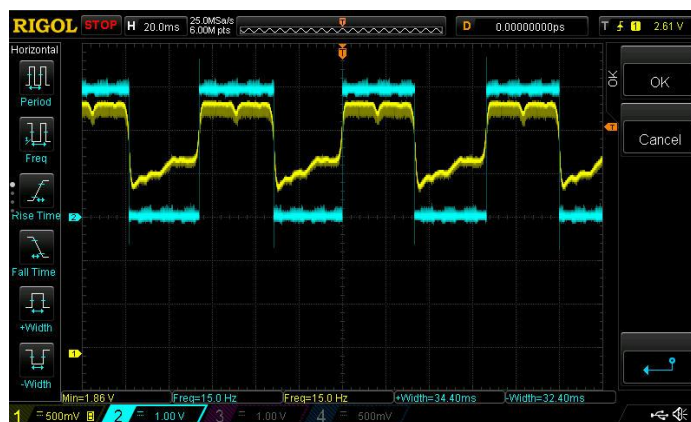


Рисунок 10 – Осциллограммы измерения скорости вращения колеса, полученные с помощью осциллографа; прямоугольные импульсы формируются

микроконтроллером с вывода PA1, демонстрирующие правильность работы алгоритма определения частоты вращения колёс.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что минимальная частота вращения 0,6 Гц, а максимальная 15 Гц. Стабильность частоты вращения превышает 0,5% без использования специальных алгоритмов регулирования.

При нанесённой на колесо узкой полоски и высокой скорости вращения колеса может быть затруднена регистрация этой полоски и как следствие придётся повышать частоту АЦ преобразования, а также при высокой скорости вращения ширина этой полоски становится уже.

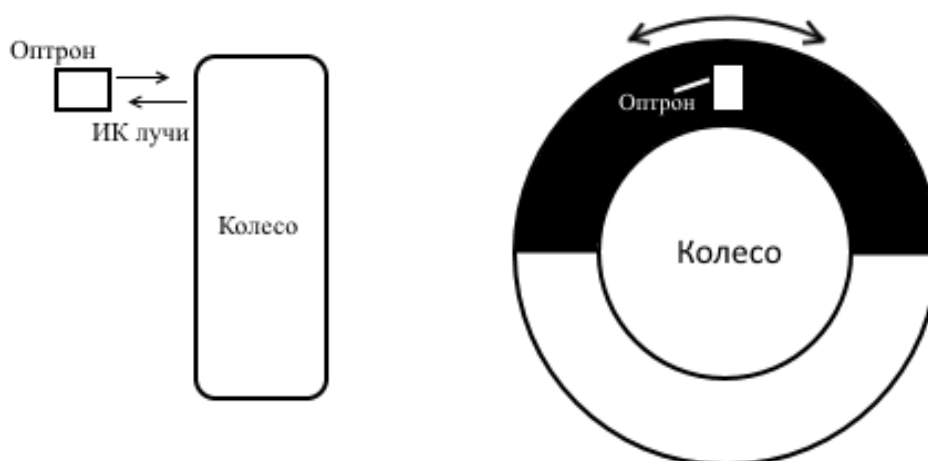


Рисунок 11 – Схемы расположения оптрона и раскраски колеса

На рисунке 11 показана схема окраски колеса. Так как черный и белый цвет влияют на интенсивность отражённого света (как было установлено ранее), то на коллекторе транзистора открытого оптрона формируются прямоугольные импульсы. По количеству таких импульсов, частоте срабатывания АЦП и длине окружности колеса можно измерить скорость. При работе датчика неизбежно возникают погрешности, связанные с неидеальностью окружающей среды (внешнее освещение, поверхность колеса и др.), а потому при обработке сигнала для каждого цвета задаётся пороговое значение интенсивности отражаемого света. Также при работе оптрона могут

возникать случайные погрешности, которые излишне завышены или занижены. Исключение таких данных при обработке необходимо для более точного анализа вращения колеса.

4 АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

4.1 СПОСОБ РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОГРАММЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА НА ОТДЕЛЬНЫЕ ЧАСТИ

Работу программы микроконтроллера можно разбить на несколько основных частей:

- измерение скорости вращения колёс;
- измерение угла поворота колёс;
- задание угла поворота колёс;
- задание направления движения автомобиля;
- задание скорости движения автомобиля;
- связь с ПК для приёма и передачи команд и данных.

Такое разделение программы связано с конструкцией модели, в которой различные датчики и механизмы используются для своих определённых задач.

Для реализации прототипа программы для МК было решено использовать язык C, так как он более производителен по сравнению с Java или Python, и легок в освоении, по сравнению, например, с Ассемблером.

4.2 ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕСА

Датчиками являются два оптрона, один из которых используется для определения скорости вращения колеса, а другой – для определения угла поворота. Оptron формирует сигнал в соответствии с яркостью входящего света. Данные с датчиков считываются попеременно с помощью АЦП, который формирует импульсы с установленной частотой. Полученные значения анализируются микроконтроллером по полученной в ходе экспериментов зависимости яркости отражённого света от цвета отражающей поверхности, расстояния между оптроном и поверхностью и углом поворота поверхности.

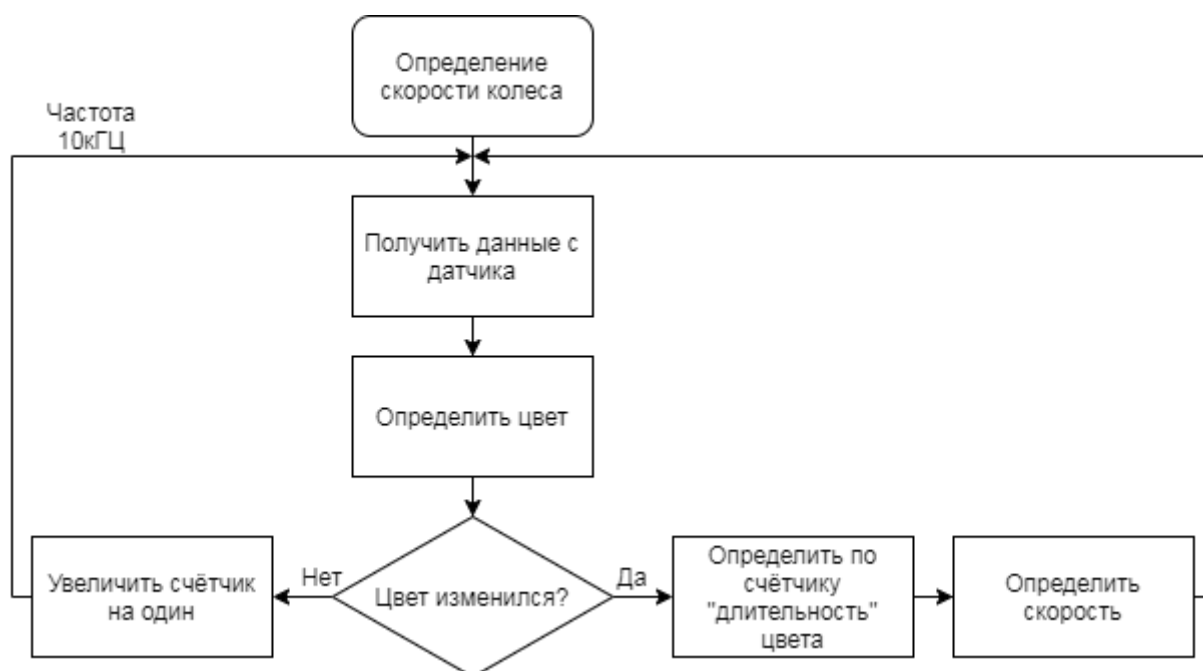


Рисунок 12 – Схема работы алгоритма по определению скорости ММА

В ходе проверки работоспособности программы, было замечено, что в некоторые моменты оптрон выдавал некорректные значения. Проблема была решена с помощью анализа предыдущих значений, на основе которых рассчитывается реальное значение некорректной точки.

4.3 РЕГУЛИРОВКА НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ

Поворот передних колёс на определённый угол осуществляется с помощью сервопривода. Вращение задних колёс реализуется при помощи коллекторного двигателя. В связи с физическими особенностями такие механизмы являются инерционными, а потому при быстром изменении значения входного сигнала, изменение угла поворота и скорости колёс происходит не мгновенно, из-за этого возникает ошибка при повороте. Важно решить эту проблему, так как впоследствии ошибка будет накапливаться и негативно влиять на работоспособность автомобиля.

Решение данной задачи возможно используя ПИ-регулятор.

Воздействующее значение на управляемый блок в ПИ-регуляторе вычисляется по формуле:

$$f(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt,$$

где K_p и K_i – это коэффициенты пропорционального и интегральной составляющих, а $e(t)$ – разница между текущим значением функции и уставкой.

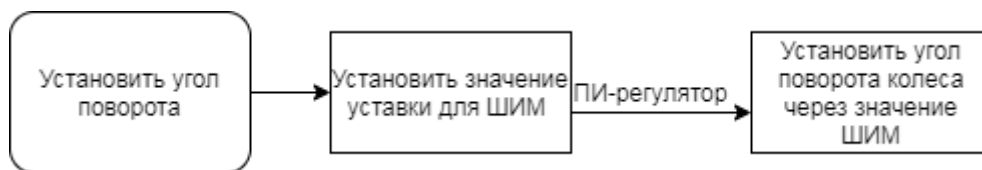


Рисунок 13 – Схема работы алгоритма по установке угла поворота колеса ММА

ПИ-регулятор позволяет плавно изменять значения ШИМ до необходимого уровня, благодаря чему удаётся избежать ошибок, связанных с инерционностью различных систем, используемы в ММА [12].

4.4 ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ НА ПК

Передача данных на ПК реализуется через USART. Необходимые данные для отправки записываются в особый циклический буфер, откуда данные передаются на компьютер. Устройство USART отличается тем, что по каналу за один раз возможно передавать только один байт. Поэтому, если размер переменной составляет больше одного байта, необходимо разделить переменную на массив байт перед отправкой по USART. В связи с этим программа на ПК, принимающая эти значения, сперва «склеивает» значения ячеек массива в первоначальные переменные, и только после анализирует эти значения. Отправка данных с ПК на МК происходит аналогично. Нужно отметить, что благодаря использованию ПДП режима, данные из буфера попадают в регистр USART напрямую, без использования ЦП. Это позволяет уменьшить количество задач, выполняемых процессором, благодаря чему увеличивается его скорость работы, а потому получаемые от датчиков каждое значение успевает полностью обработаться до того, как «приходит» новое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы, как и было изначально задумано, была создана система управления масштабной моделью автомобиля, способная контролировать траекторию своего движения, используя данные, полученные с установленных датчиков. Слежение за направлением перемещения позволяет увеличить точность передвижения без использования сторонних систем навигации.

В результате исследований были сделаны следующие выводы:

- яркость отражённого света зависит от цвета отражающей плоскости, дальности до поверхности и угла поворота относительно неё;
- с помощью ПИ-регулятора обеспечивается установка угла поворота колёс;
- было установлено, что отклонение частоты вращения колёс при использовании мостовой схемы на транзисторах и управления током протекающим через двигатель ШИМ сигналом не превышает 0,5 % от заданной частоты;
- измерение угла поворота колёс необходимо выполнять на не вращающейся поверхности, так как передние колёса могут двигаться с люфтом, и поэтому происходит изменение интенсивности, регистрируемой оптроном, что приводит к неправильной интерпретации полученного сигнала и соответственно ложному срабатыванию регулятора установки поворота колёс.

Был реализован протокол обмена данными между системой управления масштабной моделью автомобиля и компьютером для получения диагностической информации о системе, а также текущих параметрах. К сожалению, не удалось в полной мере проверить работоспособность ПИ-регулятора и выполнить его настройку, связанную с подбором коэффициентов. Протокол обмена данными реализован по USART, что позволяет подключать различные беспроводные модули, конечно, придётся вносить некоторые изменения в текст программы.

Полученные экспериментальные зависимости показали состоятельность применения открытых оптронов в данной системе, но их высокая чувствительность, как к цвету объекта, так и к расстоянию до него вносят высокую погрешность измерений, т.к. невозможно обеспечить строго параллельное вращение колеса относительно датчика. Поэтому установка датчиков напротив колёс ММА существенно снижает точность измерений. Несмотря на это точность определения скорости вращения была установлена в пределах допустимого и составила 5 мм/с при длине окружности колеса 204мм.

На основе полученных результатов измерений угла поворота колёс были сформулированы требования к относительному расположению датчиков – 10 мм от центра колеса, однако конструкционные особенности не позволили этого сделать. Как было сказано ранее датчики очень чувствительно к любым изменениям, поэтому рассматривается вариант создания некоторой шкалы, которая будет закреплена на движущихся частях рулевой системы, а сверху открытый оптрон, получаемый сигнал с которого будет пропорционален углу поворота колеса.

Данная работа, на мой взгляд, имеет перспективы в создании ММА с независимым управлением при условии создания карты помещений и задания конечной точки движения.

В целом требования технического задания были достигнуты, но несомненно требуют дальнейшей проработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей. Закладной А.Н., к.т.н., доцент; Закладной О.А., аспирант Национальный технический университет Украины «КПИ»
2. Системы безопасности автомобилей : учеб. пособие / Е.Л. Савич, В.В. Капустин. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. — 445 с.
3. Решетов Д. Н., Детали машин — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1989.— 496 с.
4. Металлорежущие станки. Типовые механизмы и системы металлорежущих станков: учебное пособие / А.М. Гуртяков, Б.Б. Мойзес. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 112 с.
5. Шаговые двигатели: учеб. пособие/ А. В. Емельянов, А. Н. Шилин/ ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 48 с.
6. Схемотехника № 6 (8) июнь 2001 – Леонид Ридико (стр. 13 - 16)
7. Асинхронные электродвигатели. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 104.с.: ил. — (Б-ка электромонтера; Вып. 591)
8. Электротехнический рынок № 1 (85) | 2019 — Александр Ярошенко (стр. 92 - 95)
9. Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook, Fourth Edition, Neil Sclater, Nicholas P. Chironis.
- 10.Техническая документация на МК stm32f051r8t6 RM0091 Reference manual
- 11.DC Motors, Speed Controls, Servo Systems: An Engineering Handbook, Electro-Craft Corporation, USA
- 12.Микроконтроллер в ПИ- и ПД-регуляторах, О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, В. Б. Соколов, Р. А. Просвирникова, Л. А. Шамаро

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ПЕРИФЕРИИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Инициализация портов ввода/вывода как аналоговая функция для АЦП

```
void adc_sensor_angle_speed_gpio_init(){
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOCEN;
    GPIOC->MODER |= GPIO_MODER_MODER1 | GPIO_MODER_MODER2
}

```

Инициализация таймера для формирования запуска АЦП через равные промежутки времени

```
void adc_trig_20kHz() {
    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_TIM15EN;
    TIM15->ARR = 1000;
    TIM15->PSC = 240;
    TIM15->CR2 |= TIM_CR2_MMS_1;
    TIM15->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
}

```

Инициализация АЦП:

```
void adc_init() {
    adc_sensor_angle_speed_gpio_init();
    RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_ADC1EN;
    RCC->CR2 |= RCC_CR2_HSI14ON;
    while(!(RCC->CR2 & RCC_CR2_HSI14RDY));
    ADC1->SMPR = ADC_SMPR_SMP_2 | ADC_SMPR_SMP_0 | ADC_SMPR_SMP_1;
    ADC1->CHSELR = ADC_CHSELR_CHSEL11;
    ADC1->CFGR1 &= ~ADC_CFGR1_SCANDIR;
    ADC1->CFGR1 |= ADC_CFGR1_CONT;
    ADC1->CFGR1 |= ADC_CFGR1_DISCEN;
    ADC1->CFGR1 |= ADC_CFGR1_EXTSEL_2;
    ADC1->CFGR1 |= ADC_CFGR1_EXTEN_0;
    adc_trig_20kHz();
    ADC1->IER |= ADC_IER_EOCIE;
    NVIC_SetPriority(ADC1_COMP_IRQn, 8);
    NVIC_EnableIRQ(ADC1_COMP_IRQn);
    ADC1->CR |= ADC_CR_ADEN;
    ADC1->CR |= ADC_CR_ADSTART;
}

```

Инициализация портов ввода/вывода для управления двигателем

```
void motor_gpio_init() {
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOCEN;
    GPIOC->MODER |= GPIO_MODER_MODER8_1;

    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOBEN;
    GPIOB->MODER |= GPIO_MODER_MODER7_0 | GPIO_MODER_MODER6_0;
}

```

```

void motor_pwm_init() {
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM3EN;

    TIM3->ARR = 2400; //min width 10uS, 10kHz
    TIM3->PSC = 0;
    TIM3->CCMR2 |= (TIM_CCMR2_OC3M & ~TIM_CCMR2_OC3M_0);
    TIM3->CCMR2 |= TIM_CCMR2_OC3PE;
    TIM3->CCER |= TIM_CCER_CC3E; //enable output
    TIM3->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
}

```

Инициализация системы управления поворотом колёс

```

void stwh_init_gpio() {
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOBEN;
    GPIOB->MODER |= GPIO_MODER_MODER10_1;
    GPIOB->AFR[1] |= 1 << 9;
}
void stwh_init_pwm() {
    RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM2EN;
    TIM2->ARR = 951 - 1;
    TIM2->PSC = 1000 - 1;

    TIM2->CCMR2 |= (TIM_CCMR2_OC3M & ~TIM_CCMR2_OC3M_0);
    TIM2->CCMR2 |= TIM_CCMR2_OC3PE;
    TIM2->CCER |= TIM_CCER_CC3E;
    TIM2->CR1 |= TIM_CR1_CEN;
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Функции поворота колёс

```
void stwh_RotateLeft_pwm(uint16_t pwm) {
    if (pwm > STWH_LEFT_MAX_PWM) {
        pwm = STWH_LEFT_MAX_PWM;
    }
    if (pwm < STWH_CENTER_PWM) {
        pwm = STWH_CENTER_PWM;
    }
    TIM2->CCR3 = pwm;
}
void stwh_RotateRight_pwm(uint16_t pwm) {
    if (pwm > STWH_RIGHT_MAX_PWM)
        pwm = STWH_RIGHT_MAX_PWM;
    if (pwm < STWH_CENTER_PWM)
        pwm = STWH_CENTER_PWM;
    TIM2->CCR3 = pwm;
}
```

Функция установки скорости вращения колёс

```
void SetPWMSpeed(uint8_t *data, uint8_t size) {
    pwm_speed = (data[2] << 8) | data[3];
    return;
}
```

Функция установки направления движения ММА

```
void motor_set_dir(uint8_t dir) {
    if (dir == 0) {
        GPIOB->BSRR = GPIO_BSRR_BR_7;
        GPIOB->BSRR = GPIO_BSRR_BS_6;
        return;
    }
    GPIOB->BSRR = GPIO_BSRR_BR_6;
    GPIOB->BSRR = GPIO_BSRR_BS_7;
}
```

Функции передачи основных параметров в компьютер:

Функция передачи значения скорости

```
void GetPWMSpeedCar(){
    uint8_t t_data[4];
    t_data[0] = 0xFF & (pwm_speed >> 8);
    t_data[1] = 0xFF & pwm_speed;
    create_cmd_to_PC_USART(0x02, t_data);
}
```

Функция передачи значения угла поворота колёс

```
void GetPWMAngle() {
    uint8_t t_data[4];
    t_data[0] = 0xFF & (pwm_angle >> 8);
    t_data[1] = 0xFF & pwm_speed;
    create_cmd_to_PC_USART(0x02, t_data);
}
```

```
}
```

Функция формирования команды для передачи данных в ПК

```
void create_cmd_to_PC_USART(uint8_t command, uint8_t data[4]){
    usart_AddToBufferByte(0xCA);
    usart_AddToBufferByte(command);
    usart_AddToBufferByte(data[0]);
    usart_AddToBufferByte(data[1]);
    usart_AddToBufferByte(data[2]);
    usart_AddToBufferByte(data[3]);
    usart_AddToBufferByte(CalcXor(data, 4));
}
```

Функция обработки данных полученных от ПК

```
void process_cmd_from_PC_USART() {
    uint8_t recieved_byte;
    if (usart_GetByteFromRx(&recieved_byte) == 0) {
        return;
    }
    static uint8_t temp_cmd[6]; //only num of cmd, and data with xor
    static uint8_t curr_pos = 1;
    static uint8_t status = 0;
    static uint8_t xors = 0;
    xors ^= recieved_byte;
    switch(status) {
        case 0 : /*sync*/
            status = 0;
            if (recieved_byte == SYNC) {
                curr_pos = 1;
                xors = SYNC;
                ++status;
            }
            break;
        case 1 : /*cmd*/
            temp_cmd[curr_pos] = recieved_byte;
            ++curr_pos;
            ++status;
            break;
        case 2 : /*data*/
            temp_cmd[curr_pos] = recieved_byte;
            if (curr_pos == 6) {
                if (xors == 0) {
                    ExecuteCmd[temp_cmd[1]](temp_cmd, 6);
                }
            }
            ++curr_pos;
            break;
    }
    static uint8_t count_byte = 0;
    usart_AddToBufferByte(count_byte++);
}
```

Функция обработки данных полученных в результате преобразования аналогового сигнала, получаемого от датчиков – открытых оптронов

```
void process_data_from_sensors(){
    if(ADC1->DR & 0x8000 == 0) { return;}
    temp_adc_data &= ~0x8000;
    if(temp_adc_data < 2000 || temp_adc_data > 7000){
        if(is_white){
            white_num++;
        }else{
            black_num++;
        }
        return;
    }
    if(temp_adc_data <= 3400){
        if(white_num == 0){
            black_num = 0;
            is_white = 1;
            GPIOA->ODR |= GPIO_ODR_5;
            GPIOA->ODR &= ~GPIO_ODR_6;
            create cmd to PC USART();
        }
        white_num++;
    }else{
        if(black_num == 0){
            white_num = 0;
            is_white = 0;
            GPIOA->ODR &= ~GPIO_ODR_5;
            GPIOA->ODR |= GPIO_ODR_6;
            create_cmd_to_PC_USART();
        }
        black_num++;
    }
}
```