

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Кафедра _____
(наименование института полностью)
«Промышленная электроника»
_____ (наименование)

11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

_____ (код и наименование направления подготовки)
Электронные приборы и устройства
_____ (направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Разработка систем безопасности и позиционирования для автономной
мобильной платформы»

Студент

Е.Е. Пименов

_____ (И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, А.В. Прядилов

руководитель

_____ (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение.....	4
1. Актуальность	6
1.1 Состояние вопроса	6
1.2 Существующие решения.....	6
1.2.1 Роботы-сортировщики.....	6
1.2.2 Дроны или беспилотники.....	8
1.2.3 Паллетайзеры	10
1.2.4 Роботы тележки и буксировщики	11
2. Датчики и их принципы работы	15
2.1 Инфракрасные датчики линии.....	16
2.2 Магнитные датчики линии.....	19
2.3 Лидар	20
2.3.1 Лазерный излучатель.....	21
2.3.2 Сканер и оптика	22
2.3.3 Процессоры.....	22
2.3.4 Электроника времени	23
2.3.5 Лидар-дальномер	23
2.3.6 Лидар с дифференциальным поглощением	24
2.3.7 Доплеровский лидар	24
2.3.8 Применение лидара	24
2.3.9 Ограничения лидара	26
2.3.10 Преимущества и недостатки LiDAR.....	26
2.4 Камеры	27
3 Отслеживание линии инфракрасными датчиками	29
3.1 Отслеживание линии с помощью одного датчика	29
3.2 Отслеживание линии с помощью двух датчиков	31
3.3 Отслеживание линии с помощью трех датчиков.....	33
3.4 Отслеживание линии с помощью четырех и более датчиков	36

4	Разработка системы позиционирования с использованием нескольких датчиков линии.....	39
4.1	Цифровой датчик линии.....	39
4.2	Аналоговый датчик линии	40
4.3	ПИД регулятор	41
4.4	Разработка системы позиционирования	42
4.4.1	Технические характеристики светодиодов и фотодиодов	42
4.4.2	Сборка, подключение и исследование первого датчика.....	43
4.4.3	Исследование на сонаправленность геометрической и оптической осей светодиода.....	47
4.4.4	Сборка и исследование системы позиционирования на линии	51
4.4.5	Расчет ошибки для ПИД регулятора при расположении светодиодов и фотодиодов в один ряд.....	56
4.4.5	Расчет ошибки для ПИД регулятора при расположении светодиодов и фотодиодов друг за другом.....	60
4.4.6	Алгоритм пересчета полученных значений	65
5	Система безопасности на основе лидара	68
5.1	Обзор и сравнение лидаров.....	68
5.2	Разработка алгоритма работы.....	70
5.3	Проработка расположения лидара на платформе.....	71
	Заключение	74
	Список используемой литературы и используемых источников.....	75
	Приложение А Программа для работы с Лидаром.....	79

Введение

Мы живем в обществе, которое характеризуется бурным развитием науки и технологий. Исторически сложилось так, что технологические достижения всегда играли значительную роль и сигнализировали о серьезных изменениях для человечества. В последнее время развитие новых технологий быстро ускоряется, что приводит к более широкому использованию робототехники и роботизированных автономных систем. Без сомнения, все в промышленности и частном секторе должны внедрять новые технологии, использовать достижения и использовать взаимосвязь и новые алгоритмы оптимизации, если они хотят быть конкурентоспособными в новую эпоху. Иными словами, они должны следовать новой промышленной революции.

Склады и складские помещения являются одной из областей применения, в которой робототехника и роботизированные автономные системы занимают видное место. Складские и производственные помещения уже давно являются потенциальной ареной для задач робототехники и автоматизации, помогающих людям получать более качественные и быстрые результаты. Склады являются одним из наиболее важных аспектов логистики, поскольку они широко используются для хранения или буферизации товаров между двумя точками потребления. Прием, перемещение, размещение, хранение, комплектация заказов и доставка являются основными складскими операциями.

Большинство менеджеров складов рассчитывают на то, что роботы и автономные роботизированные системы сократят количество потерь и перемещений людей. Но преимущества выходят далеко за рамки экономии труда. Мобильная робототехника также может снизить компенсацию работникам и проблемы с безопасностью на объекте, отделив перемещения человека от перемещения больших транспортных средств.

Собственно, стремительное развитие автономных транспортных средств не так уж и удивительно, поскольку их применение позволяет значительно сократить расходы компаний и исключить ряд человеческих факторов.

Поэтому создание мобильных роботов для складирования и логистики постепенно стали горячей точкой в текущем направлении интеллектуальных исследований и широко используются во многих областях повседневной жизни людей, промышленности и производства. В свою очередь, экономические выгоды различных отраслей могут непрерывно увеличиваться.

Мобильные роботы постепенно начали заменять ручную сортировку и обработку в складской логистике. Поэтому обеспечение эффективной и точной работы мобильных роботов в автоматизированном складском хозяйстве и логистике стало актуальной проблемой, требующей решения.

По мере того, как эти машины становятся все более эффективными, они также становятся более доступными и гибкими, поскольку их можно адаптировать и масштабировать практически в любой складской среде. Технологии значительно улучшились за последнее десятилетие. Затраты снижаются и позволяют каждому участвовать в разработке и продвижении автоматизации в целом.

В данной работе будут рассмотрены существующие решения роботизированных автономных систем, которые уже используются на различных складах и предприятиях. Также будут рассмотрены отдельные виды роботов, способы их работы, способы их позиционирования, используемые датчики и их принцип работы. Будет разработан и исследован способ позиционирования автономной мобильной платформы путем отслеживания черной линии с помощью нескольких оптических датчиков. Также будет разработан алгоритм автокалибровки оптических датчиков, и будет проработана возможность использования лидара в качестве системы безопасности для автономной мобильной платформы.

1. Актуальность

1.1 Состояние вопроса

Как уже было упомянуто выше, разработка роботов и автоматизированных систем для складирования и логистики является одним из приоритетных направлений робототехники на данный момент. В основном на складах и предприятиях выполняются однотипные действия, где всегда нужно перемещать различные грузы или предметы с одного места на другое. Внедрение роботов и систем для таких однотипных действий увеличивает производительность, увеличивает безопасность персонала и уменьшает затраты на оплату труда, что в свою очередь позволяет значительно экономить время и ресурсы компании или производства [3].

1.2 Существующие решения

1.2.1 Роботы-сортировщики

Данный вид роботов распознает и сортирует предметы и товары в зависимости от поставленной ему задачи. Такой тип роботов очень полезен на складах, работающих, например, в системах онлайн-торговли. Роботы-сортировщики должны уметь справляться с разбором предметов из их большого количества, а так же уметь точно их идентифицировать. С этим им помогает справляться использование искусственного интеллекта. Под искусственным интеллектом понимается программа, которая способна самообучаться. Робот использует несколько камер и машинное зрение, которое выполняет анализ предметов и действий робота, и передает всю информацию в алгоритм программы [10]. На рисунке 1 можно увидеть один из таких роботов-сортировщиков от компании Covariant [14].



Рисунок 1 – Робот-сортировщик от компании Covariant

1.2.2 Дроны или беспилотники

Дроны и беспилотные летательные аппараты, на данный момент, являются развивающейся сферой робототехники. Поэтому на сегодняшний день в логистической отрасли они нашли свое применение пока что только для решения задачи инвентаризации на складах [15].

Инвентаризация проводится для того, чтобы всегда быть в курсе актуальной информации по наличию различной продукции и грузов на складе. Как правило, работники складов делают ее вручную с применением грузоподъемника, без которого невозможно добраться до высоких полок складских стеллажей. Поэтому инвентаризация проходит медленно и муторно. Внимание работников склада ко всем нюансам снижается, из-за чего возрастает вероятность ошибок вследствие человеческого фактора.

Поэтому инвентаризация с применением дронов в разы быстрее и безопаснее. Принцип работы такого дрона показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Принцип работы дрона для инвентаризации

Дрон, управляемый оператором или самостоятельно, подлетает к грузу на стеллаже, считывает информацию с этикетки, и передает ее работнику склада или в систему [17].

Плюсов использования дронов для инвентаризации множество. Не нужно применять погрузчики или подъемники, а так же не нужно получать для работников дополнительные разрешения для высотных работ. Кроме того, запуск дрона экологичнее, чем использование мощного грузоподъемника, на работу которого тратится в среднем около 72 кВт/ч, в то время как дрон тратит электроэнергии в 100 раз меньше.

На рисунке 3 можно увидеть один из таких дронов от компании Aeriu.

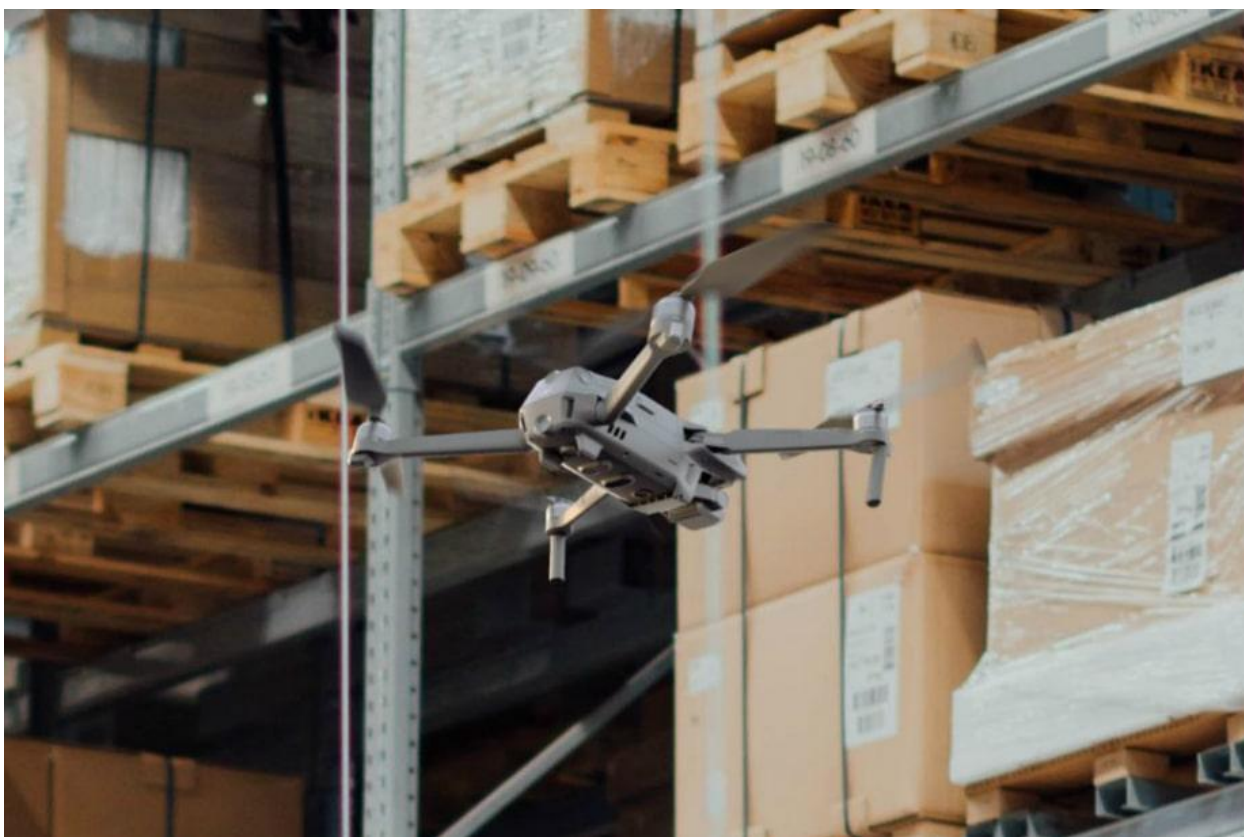


Рисунок 3 – Дрон от компании Aeriu

Данный дрон имеет камеру высокого разрешения, которая считывает или фотографирует этикетку на грузе и отправляет в облачное хранилище или систему для обработки данных.

По подсчетам специалистов из Aeriu, инвентаризация с помощью дронов происходит на 30% быстрее, а стоимость самого дрона составляет менее 10% от стоимости грузоподъемной системы [18].

1.2.3 Паллетайзеры

Роботы-паллетайзеры, как правило, представляют собой промышленный манипулятор, который предназначен для автоматического захвата и укладки продукции на паллеты или поддоны. Плюсами таких роботов является большая точность, грузоподъемность и скорость. Данные роботы могут использовать многофункциональные захваты, что благоприятно сказывается на их универсальности [9]. На рисунке 4 можно увидеть один из таких роботов от компании Kuka.

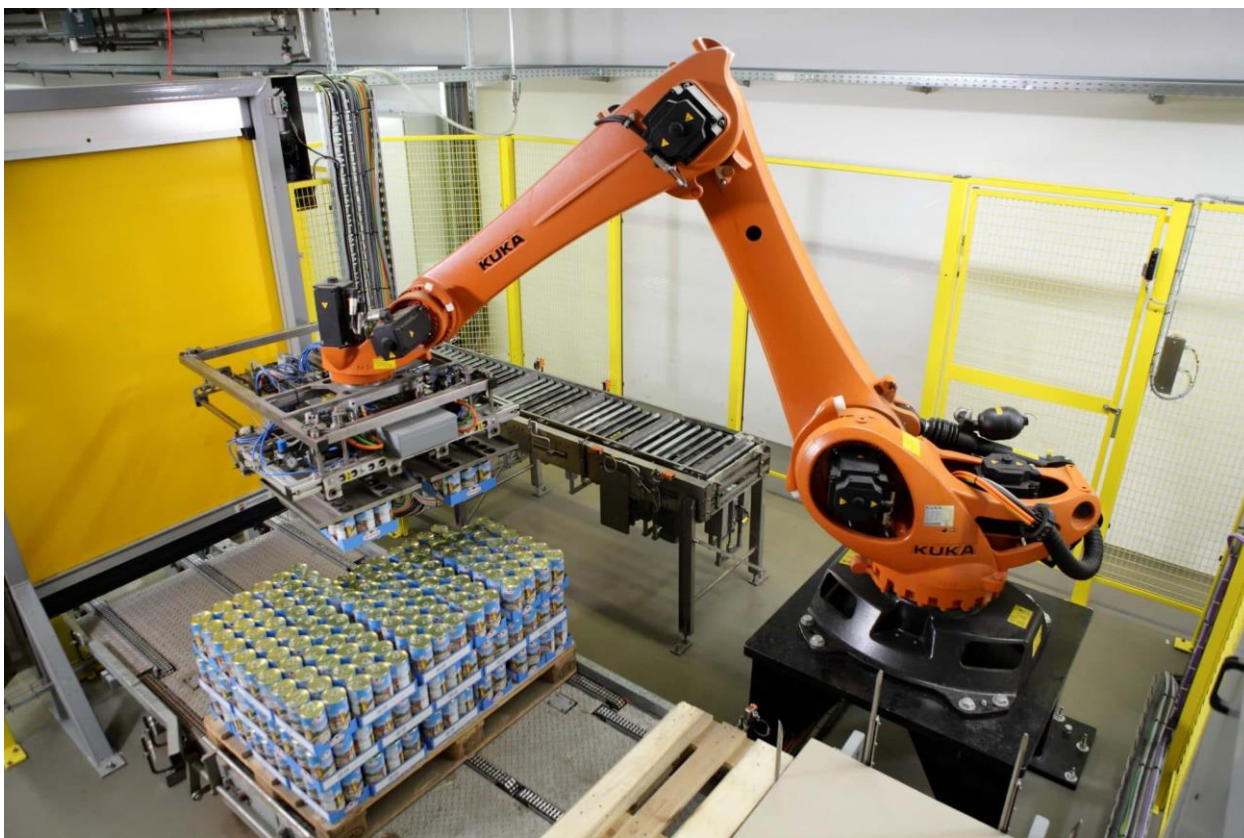


Рисунок 4 – Робот-паллетайзер от компании Kuka

1.2.4 Роботы тележки и буксировщики

Они обеспечивают перемещение грузов и предметов на значительные расстояния по определенной заданной программе. Наиболее известным представителем таких роботов является робот от компании Amazon Robotics, который показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – Робот от компании Amazon Robotics

Данная компания является одной из первых, кто начал внедрять у себя роботизированные системы автоматизации. Она показала успешный результат использования роботов всему миру, после чего многие компании начали так же автоматизировать свои различные процессы.

Робот представляет собой движущуюся на колесах небольшую тележку, которая перемещается по разметке, нанесенной на пол. Сверху тележки располагается платформа, которая с помощью встроенного механизма способна подниматься и тем самым поднимать различные грузы.

Конкретно у компании Amazon Robotics данные роботы поднимают и перемещают большие многоуровневые стеллажи или, по-другому, паллеты, на которых расположены различные предметы. Сама концепция системы умного склада компании Amazon Robotics очень проста. Человек не ходит по складу в поисках предметов. Он стоит на месте, а паллет с нужным предметом ему подвозит робот-тележка, как это показано на рисунке 6. По подсчетам компании, внедрение данной системы с роботами тележками увеличило показатели производительности в два раза [1].



Рисунок 6 – Робот с паллетом от компании Amazon Robotics

Еще одним видом таких роботов является робот буксировщик от компании Renault Россия, который представлен на рисунке 7. Данные роботы

представляют собой автоматические тележки, которые двигаются по заданной траектории, отслеживая магнитную ленту наклеенную на пол.

Робот с закрепленной оснасткой в виде прицепа с различными комплектующими автоматически перемещается между зоной комплектования и рабочими местами операторов, обеспечивая поставку комплектующих на линию сборки конвейера. После этого робот забирает пустую оснастку и следует обратно в зону комплектования за новой партией комплектующих.

В компании отметили, что производительность работы операторов на линии, а так же скорость и эффективность операций в зоне комплектования увеличилась. Так же благодаря этим роботам на участках их применения удалось отказаться от использования погрузчиков, что в свою очередь положительно отразилось на эффективности и безопасности [13].



Рисунок 7 – Робот от компании Renault Россия, перемещающий комплектующие

Из всех вышеперечисленных роботов наибольшее распространение получили роботы тележки и буксировщики. По информации из разных источников, среднестатистический работник склада тратит впустую почти семь недель в год на ненужные перемещения. Это негативно влияет на производительность и доходы компаний. Поэтому роботы тележки и буксировщики самыми первыми внедрялись для работы на складах и производствах [12]. Как уже было сказано ранее, их основное назначение – это перемещение и транспортировка различных предметов или грузов с одного местоположения на другое. Благодаря этому можно использовать простые программы управления, не требующие использования серьезных алгоритмов работы и вычислительных мощностей с применением искусственного интеллекта или машинного зрения [30].

Подведем следующие выводы по разделу:

- разработка роботов и автоматизированных систем для складирования и логистики является одним из приоритетных направлений робототехники;
- применение роботов и автоматизированных систем увеличивает производительность и эффективность, уменьшает затраты на оплату труда и экономит время и ресурсы компаний;
- роботы тележки и буксировщики являются наиболее распространенным решением при автоматизации складов и складских логистических процессов.

2. Датчики и их принципы работы

Как было упомянуто выше, роботы тележки и буксировщики на сегодняшний день являются самыми распространенными и востребованными в сфере складской логистики и производства.

Они функционируют как перевозчики материалов для доставки продукции и предметов с одного места производства на другое, где невозможно использовать рельсовые, конвейерные и порталные решения.

По сравнению с другими роботами и системами, для роботов тележек не требуется сложные программы и алгоритмы. Такая же ситуация обстоит и с конструкцией этих роботов. Конечно, для улучшения работы тележек можно усовершенствовать алгоритмы и конструкцию, использовать различные датчики и большие вычислительные мощности для обработки информации. В конечном итоге конфигурация роботов будет зависеть от назначения и желаемой точности. Общая структурная схема таких роботов показана на рисунке 8.

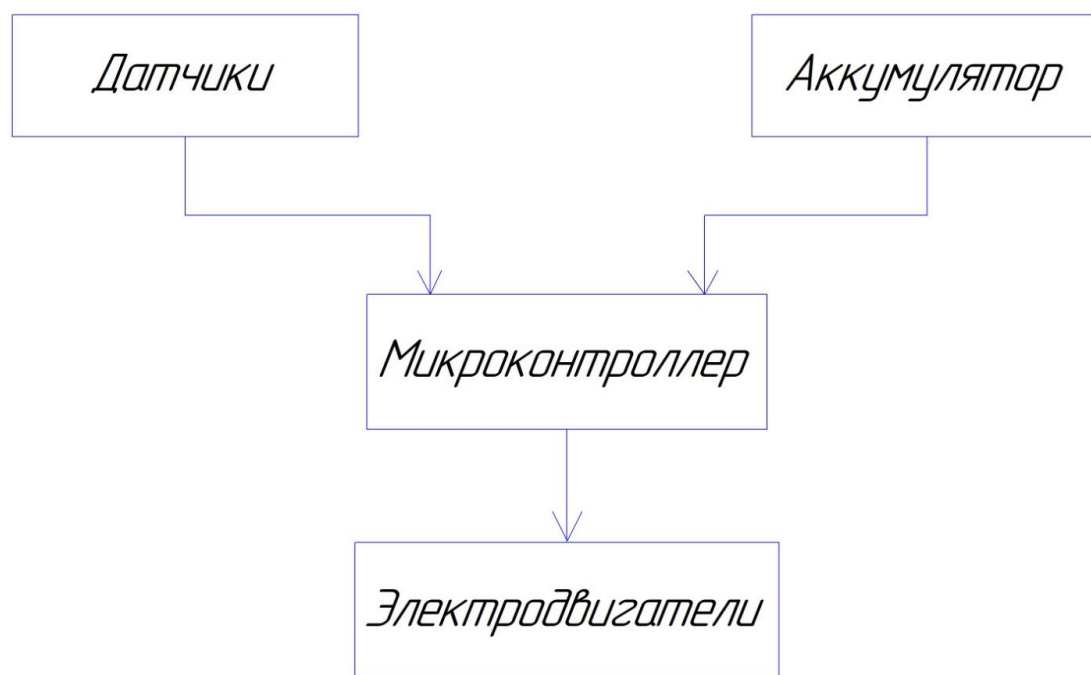


Рисунок 8 – Общая структурная схема роботов тележек и буксировщиков

Важным вопросом в создании таких роботов является позиционирование и навигация. Как отмечает в своей работе Каплина М.С. «Для успешной навигации в пространстве система робота должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения, задавать угол поворота колес и скорость их вращения, правильно интерпретировать сведения об окружающем мире, получаемые от датчиков, и постоянно отслеживать собственные координаты»[1]. Для этих целей подойдут следующие системы и датчики:

- инфракрасные датчики линии,
- магнитные датчики линии,
- компасы или гироскопы,
- навигация с помощью GPS,
- навигация с помощью сотовой связи или wifi,
- компьютерное или машинное зрение на основе камеры,
- лазерный дальномер или лидар.

Рассмотрим подробнее некоторые из них.

2.1 Инфракрасные датчики линии

Инфракрасные технологии используются для различных целей уже очень большой промежуток времени, как в повседневной жизни, так и в промышленности. Основными преимуществами инфракрасных датчиков являются низкое энергопотребление, простая конструкция и удобные функции. В зависимости от диапазона, инфракрасные сигналы могут быть незаметны человеческому глазу [21].

Инфракрасный датчик - это один из видов электронных компонентов, используемый для обнаружения определенных характеристик в его окружении посредством обнаружения инфракрасного излучения. Инфракрасный датчик может измерять тепло объекта, а также обнаруживать

движение. Эти типы датчиков только измеряют инфракрасное излучение, но не излучают его. Такой тип датчика называется пассивным [22].

Существует активный инфракрасный датчик. В отличие от пассивного, активный датчик включает в себя как передатчик или излучатель, так и приемник или детектор. В большинстве случаев излучатель представляет собой инфракрасный светодиод, а детектор представляет собой инфракрасный фотодиод, чувствительный к инфракрасному излучению той же длины волны, что и светодиод. Такую пару согласованных светодиодов и фотодиодов называют оптопарой [23]. Принцип работы оптопары показан на рисунке 9. Он основан на детектировании инфракрасного света, отраженного от поверхности. Когда свет падает на белую поверхность, он почти полностью отражается и детектируется датчиком. В случае с черной поверхностью свет полностью поглощается, и излучение не отражается обратно, поэтому фотодиод не регистрирует никакого излучения [24].



Рисунок 9 – Принцип работы оптопары

Пример оптического датчика линии показан на рисунке 10.

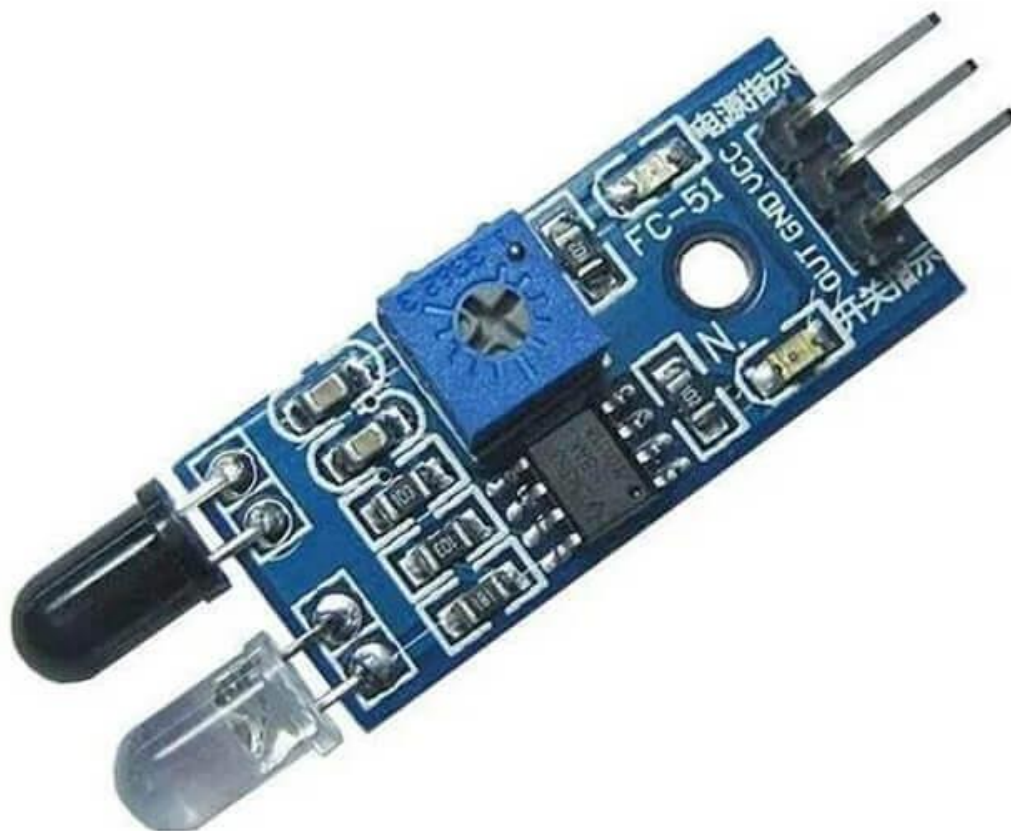


Рисунок 10 – Пример оптического датчика линии

Как уже было сказано ранее, преимуществами инфракрасных датчиков являются низкое энергопотребление, простая конструкция и очень малая стоимость. Минусами являются помехи от засветки сторонних инфракрасных источников излучения [6].

2.2 Магнитные датчики линии

Магнитный датчик построен на основе датчика Холла, который реагирует на магнитное поле. Под полом помещения, в котором используются такие тележки, на небольшой глубине проложен провод, по которому течет ток, наводящий вокруг него электромагнитное поле. Это поле регистрируется специальным магнитным датчиком, пример которого показан на рисунке 11 [19]. Вместо провода так же можно использовать магнитную ленту.



Рисунок 11 – Пример магнитного датчика линии

Преимуществами такого датчика являются высокая надежность и точность. К минусам можно отнести высокую стоимость, как самого датчика,

так и магнитной ленты. Еще одним минусом является невозможность работы такого датчика при сильных сторонних электромагнитных помехах [5].

2.3 Лидар

Лидар - это технология дальномера, которая измеряет расстояние до объекта, направляя лучи света на объект, и использует время и длину волны отраженного луча света для оценки расстояния. Пример лидара представлен на рисунке 12.



Рисунок 12 – Пример лидара

Эта технология очень похожа на технологии радара, в которой используется радиоволновая навигация для кораблей и самолетов, и сонара, в

которой используется звуковая навигация для подводных лодок. Эти технологии используют принцип отражения волн для обнаружения объектов и определения расстояния. Однако в то время как радар основан на радиоволнах, а сонар основан на звуках, лидар основан на световых лучах.

Лидар использует свет с разными длинами волн, в том числе в ультрафиолетовом, видимом или инфракрасном диапазоне. Но в большинстве случаев, на данный момент, используется лазер [16].

Лидар способен обнаруживать все виды составов материалов, в том числе неметаллы, камни, дождь, химические соединения, аэрозоли, облака и даже отдельные молекулы. Системы лидара могут запускать до 1000000 световых импульсов в секунду, что позволяет более точно определить структуру и размеры объектов.

В большинстве приложений, кроме простого дистанционного измерения, создается 3D-карта окружающей среды или объекта, на который был направлен световой луч. Это делается путем непрерывного воздействия лазерным лучом на объект или окружающую среду.

Лидар обычно состоит из 4 элементов, которые должны присутствовать независимо от изменений, связанных с применением. К таким основным элементам относятся:

- лазерный излучатель,
- сканер и оптическая система,
- процессор,
- точная электроника времени для синхронизации.

2.3.1 Лазерный излучатель

Лазер служит источником энергии для световых импульсов. Длина волны лазера, используемого в системах лидара, различается от одной версии к другой из-за специфических требований определенных версий. Например, бортовые системы лидара используют YAG-лазеры с диодной накачкой 1064

нм, в то время как батиметрические системы используют YAG-лазеры с двойной диодной накачкой 532 нм, которые проникают в воду с гораздо меньшим затуханием, чем бортовая версия 1064 нм. Однако, в целях обеспечения безопасности и независимо от версий, используемые лазеры обычно имеют низкую энергию.

2.3.2 Сканер и оптика

Сканеры являются важной частью любой системы лидаров. Они отвечают за проецирование лазерных импульсов на поверхности и получение обратно отраженных импульсов от поверхности. Скорость, с которой изображения создаются системой лидара, зависит от скорости, с которой сканеры захватывают обратно рассеянные лучи. Независимо от версий, оптика, используемая в системе лидара, должна быть высокой точности и качества, чтобы получить наилучшие результаты, особенно для картографирования. Тип линз, выбор конкретного стекла, а также используемые оптические покрытия являются основными факторами, определяющими разрешающую способность и дальность действия лидара.

2.3.3 Процессоры

Процессор высокой производительности обычно лежит в основе любой системы лидара. Он используется для синхронизации и координации действий всех отдельных компонентов лидара, гарантируя, что все компоненты работают так, как они должны. Процессор объединяет данные со сканера и таймера для получения данных об измеренных точках. Эти данные о точках затем используются для создания карт. В беспилотных автомобилях точечные данные используются для предоставления карты окружающей среды в реальном времени, чтобы помочь автомобилям избегать препятствий и выполнять общую навигацию.

Поскольку свет движется со скоростью около 0,3 метра в наносекунду, а тысячи лучей обычно отражаются обратно в сканер, то для их обработки требуется высокоскоростной процессор с высокими вычислительными возможностями. Таким образом, повышение вычислительной мощности вычислительных элементов стало одной из основных движущих сил технологии лидаров.

2.3.4 Электроника времени

Точное время имеет важное значение в системах лидара, поскольку все операции и вычисления построены на времени. Электроника времени или синхронизации представляет собой подсистему лидара, которая записывает точное время, когда лазерный импульс уходит, и точное время, когда он возвращается в сканер.

Его точность и аккуратность невозможно переоценить. Из-за рассеянного отражения отправленные импульсы обычно имеют несколько возвратов, каждый из которых должен быть точно рассчитан по времени для обеспечения точности данных.

Существует три основных типа лидаров:

- дальномерный лидар;
- лидар с дифференциальным поглощением;
- доплеровский лидар.

2.3.5 Лидар-дальномер

Это самый простой вид лидарных систем. Они используются для определения расстояния от сканера лидара до объекта или поверхности. Используя принцип времени пролета, время, необходимое отраженному лучу для достижения сканера, используется для определения расстояния между лидаром и объектом.

2.3.6 Лидар с дифференциальным поглощением

Системы лидара с дифференциальным поглощением, иногда называемые DIAL, обычно используются при исследовании присутствия определенных молекул или материалов. Системы DIAL обычно испускают лазерные лучи с двумя длинами волн, которые выбираются таким образом, что одна из длин волн будет поглощаться интересующей молекулой, а другая длина волны - нет. Поглощение одного из лучей приводит к разнице в интенсивности обратных лучей, принимаемых сканером. Эта разница затем используется для определения уровня присутствия исследуемой молекулы. DIAL используется так же для измерения концентрации химических веществ в атмосфере.

2.3.7 Доплеровский лидар

Доплеровский лидар используется для измерения скорости цели. Когда световые лучи, испускаемые лидаром, попадают на цель, движущуюся к лидару или от него, длина волны света, отраженного или рассеянного от цели, немного изменяется. Это явление известно как доплеровский сдвиг. Если цель удаляется от лидара, отраженный свет будет иметь более длинную длину волны, если движется к лидару, отраженный свет будет иметь более короткую длину волны.

2.3.8 Применение лидара

В зависимости от среды использования, лидары можно разделить на четыре типа:

- наземный лидар,
- бортовой лидар,
- космический лидар,

- лидар движения.

Эти лидары различаются конструкцией, материалами, длиной волны, внешним видом и другими факторами, которые обычно выбираются в соответствии с тем, что работает в среде, в которой они должны быть развернуты.

Благодаря своей исключительной точности и гибкости лидар имеет широкий спектр применений, в частности, производство карт высокого разрешения. Помимо геодезии, лидар используется в сельском хозяйстве, археологии и в робототехнике, поскольку в настоящее время он является одним из основных факторов, способствующих гонке автономных транспортных средств. Лидар является основным датчиком, используемым в большинстве автономных транспортных средств, и выполняет роль, аналогичную роли глаз для транспортных средств.

Есть сотни других сфер, где используется лидар. Вот лишь некоторые из них:

- автономные транспортные средства,
- 3D визуализация,
- землеустройство,
- осмотр линии электропередач,
- управление туризмом и парками,
- экологическая оценка для защиты леса,
- моделирование наводнений,
- экологическая и земельная классификация,
- моделирование загрязнения,
- разведка нефти и газа,
- метеорология,
- океанография,
- военная промышленность,
- планирование сотовой сети,
- астрономия.

2.3.9 Ограничения лидара

Лидар, как и любая другая технология, имеет свои недостатки. Дальность действия и точность систем лидара сильно ухудшаются в плохих погодных условиях. Например, в условиях тумана генерируется значительное количество ложных сигналов из-за отражения лучей туманом. Обычно это приводит к эффекту рассеивания, и поэтому большая часть выпущенного луча не возвращается обратно в сканер. Аналогичное явление происходит с дождем, поскольку частицы дождя вызывают ложные отражения.

Помимо погоды, лидарные системы можно обмануть, чтобы они думали, что объект существует. Мигание простой лазерной указки в зоне работы лидара, установленной на автономных транспортных средствах, может дезориентировать навигационные системы транспортного средства, создавая впечатление существования объекта там, где его нет. Этот недостаток, особенно в применении лазеров в беспилотных автомобилях, вызывает множество проблем с безопасностью, поскольку угонщикам не потребуется много времени, чтобы усовершенствовать принцип использования для краж. Это также может привести к авариям, когда автомобили внезапно остановятся посреди дороги, подумав, что передним есть другой, автомобиль, пешеход или препятствие.

2.3.10 Преимущества и недостатки LiDAR

Преимущества лидара:

- высокая скорость и точность сбора данных;
- высокая проникающая способность;
- не зависит от интенсивности света в окружающей среде и может использоваться ночью или на солнце;
- визуализация с высоким разрешением по сравнению с другими методами;

- отсутствие геометрических искажений;
- легко интегрируется с другими методами сбора данных;
- лидар имеет минимальную зависимость от человека, что хорошо в тех случаях, где человеческая ошибка может повлиять на надежность данных;

Недостатки лидара:

- очень высокая стоимость;
- системы лидара плохо работают в условиях сильного дождя, тумана или снега;
- системы лидара генерируют большие наборы данных, для обработки которых требуются большие вычислительные ресурсы;
- в зависимости от принятой длины волны производительность лидарных систем ограничена высотой, поскольку импульсы, запускаемые лидарами определенного типа, становятся неэффективными на определенных высотах [29].

2.4 Камеры

Использование камер невозможно без использования машинного и компьютерного зрения в совокупности с программой искусственного интеллекта [7]. Благодаря им можно очень точно идентифицировать окружающее пространство и предметы вокруг. Но для этого требуются очень большие вычислительные мощности, а так же сложные алгоритмы обработки получаемого изображения [25]. Из-за всех этих факторов использование систем с камерами является очень дорогим, и в некоторых случаях нецелесообразным. К тому же использование камер на данный момент является очень молодой сферой робототехники и программирования, из-за чего требует дальнейших доработок и исследований [26].

Подведем следующие выводы по разделу:

- для того, чтобы начать использовать роботов тележек и буксировщиков в промышленных масштабах на различных производствах для выполнения примитивных функций перемещения предметов, не требуются сложные алгоритмы и затраты больших вычислительных мощностей;
- использование инфракрасных датчиков линии является наиболее простым, доступным и дешевым методом;
- использование лидара или камер требует больших затрат вычислительных мощностей, из-за чего их стоимость становится крайне высокой;
- любые датчики имеют как положительные, так и отрицательные стороны, их применение зависит от конкретных поставленных задач.

3 Отслеживание линии инфракрасными датчиками

Как уже было упомянуто выше, отслеживание автономной мобильной платформой линии с помощью инфракрасных датчиков является самым практичным, дешевым и простым методом. Именно про этот способ и пойдет дальнейшая речь.

Для того чтобы платформа начала двигаться, микроконтроллер должен подать сигнал определенного уровня на электродвигатели. Уровень этого сигнала будет зависеть от значений, полученных с датчиков. Если нам нужно повернуть налево, микроконтроллер подаст меньший сигнал на левый электродвигатель, тем самым затормозив его, и платформа начнет поворачивать налево. Такая же ситуация происходит с поворотом направо. Для более резких поворотов и маневров можно управлять сразу двумя электродвигателями, ускоряя первый и замедляя второй.

Для того чтобы микроконтроллер понимал, какой уровень сигнала подавать на электродвигатели, или, иными словами, куда платформе дальше двигаться, он должен проанализировать значения с датчиков.

Разное количество датчиков по-разному влияет на способность робота следовать по линии.

3.1 Отслеживание линии с помощью одного датчика

Самый простой вариант заключается в использовании всего одного датчика, расположенного с одной из сторон линии. Принцип работы робота с одним датчиком линии довольно прост и показан на рисунке 13. Когда датчик видит линию, левый двигатель перестает вращаться, а правый наоборот начинает вращение. Тем самым платформа поворачивает от линии налево. Когда датчик не видит линию, левый двигатель ускоряется, а правый наоборот замедляется, тем самым обратно поворачивая к линии. Таким образом, платформа двигается вперед из стороны в сторону вдоль границы

линии. Это самая простая в использовании логика программирования, поскольку она проверяет только одно условие: обнаружена линия или нет.

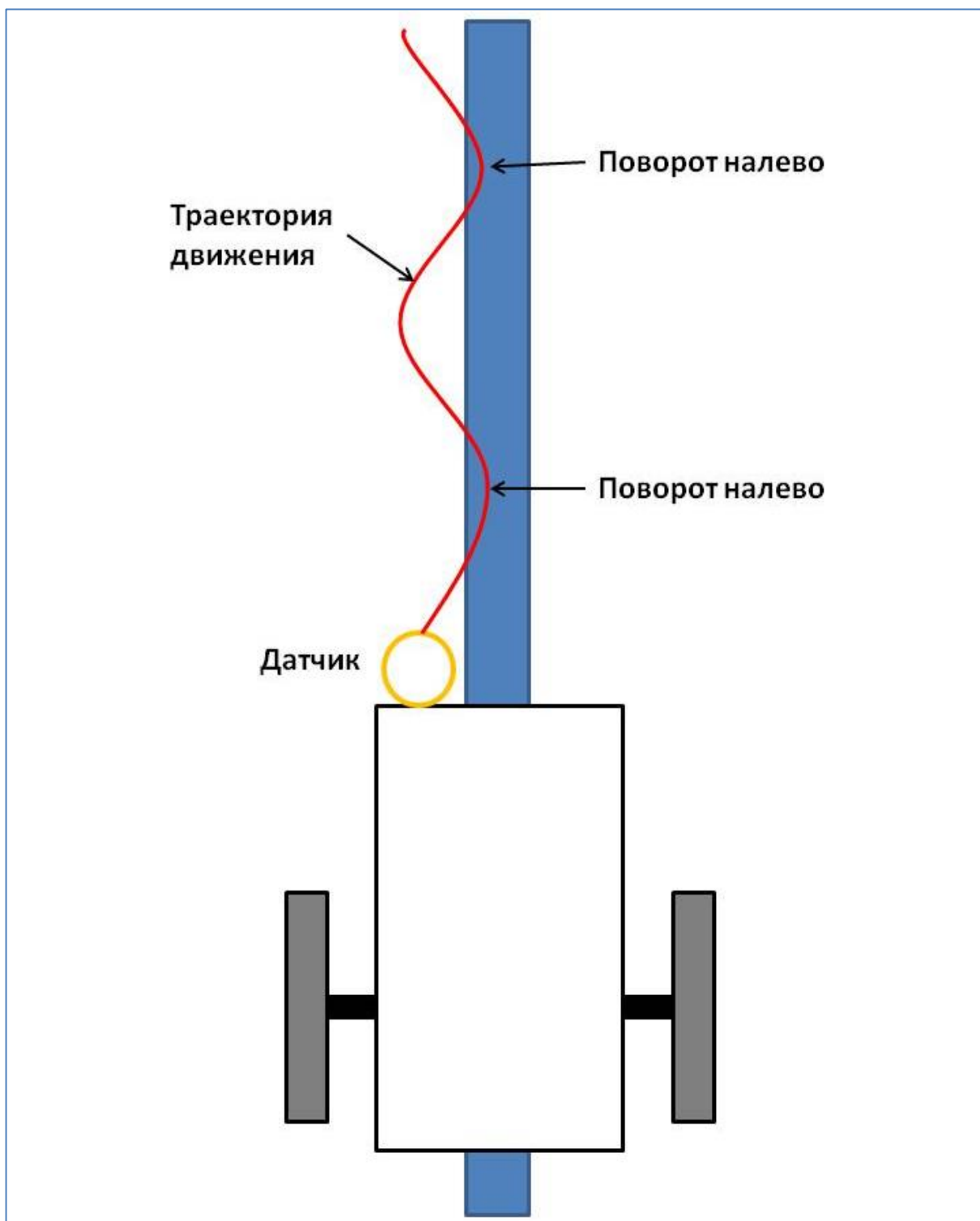


Рисунок 13 – Отслеживание линии платформой с помощью одного датчика

Плюсы данного решения:

- простая схема;
- легко программировать.

Минусы:

- очень медленная скорость передвижения платформы;
- если платформа случайно пересечет линию, то она поедет в обратную сторону по другой границе линии;
- если платформа полностью потеряет линию, то она будет крутиться на одном месте в поиске линии.

У такого метода есть еще один недостаток. В том случае, когда платформа отслеживает левую границу линии, то на правых поворотах она не сразу определит искривления трассы и из-за этого затратит большее время на поиск линии и поворот. И чем круче будет поворот, тем дольше времени потребуется платформе на поиск линии.

3.2 Отслеживание линии с помощью двух датчиков

Чтобы избежать недостатков первого метода с использованием всего одного датчика, можно использовать два датчика, расположенных по обоим краям линии, как это показано на рисунке 14. Чем меньше зазор между линией и датчиком, тем плавнее и аккуратнее робот будет следовать по линии. В таком случае каждый датчик будет отвечать за свой электродвигатель. Такой способ поможет платформе более оперативно реагировать на изменение траектории трассы, и быстрее подстраивать движения платформы под нее, особенно на поворотах. Соответственно, на большой скорости данный метод с двумя датчиками будет работать лучше, чем первый метод с одним датчиком. Но если платформа потеряет линию, то робот начнет ездить в хаотичном порядке.

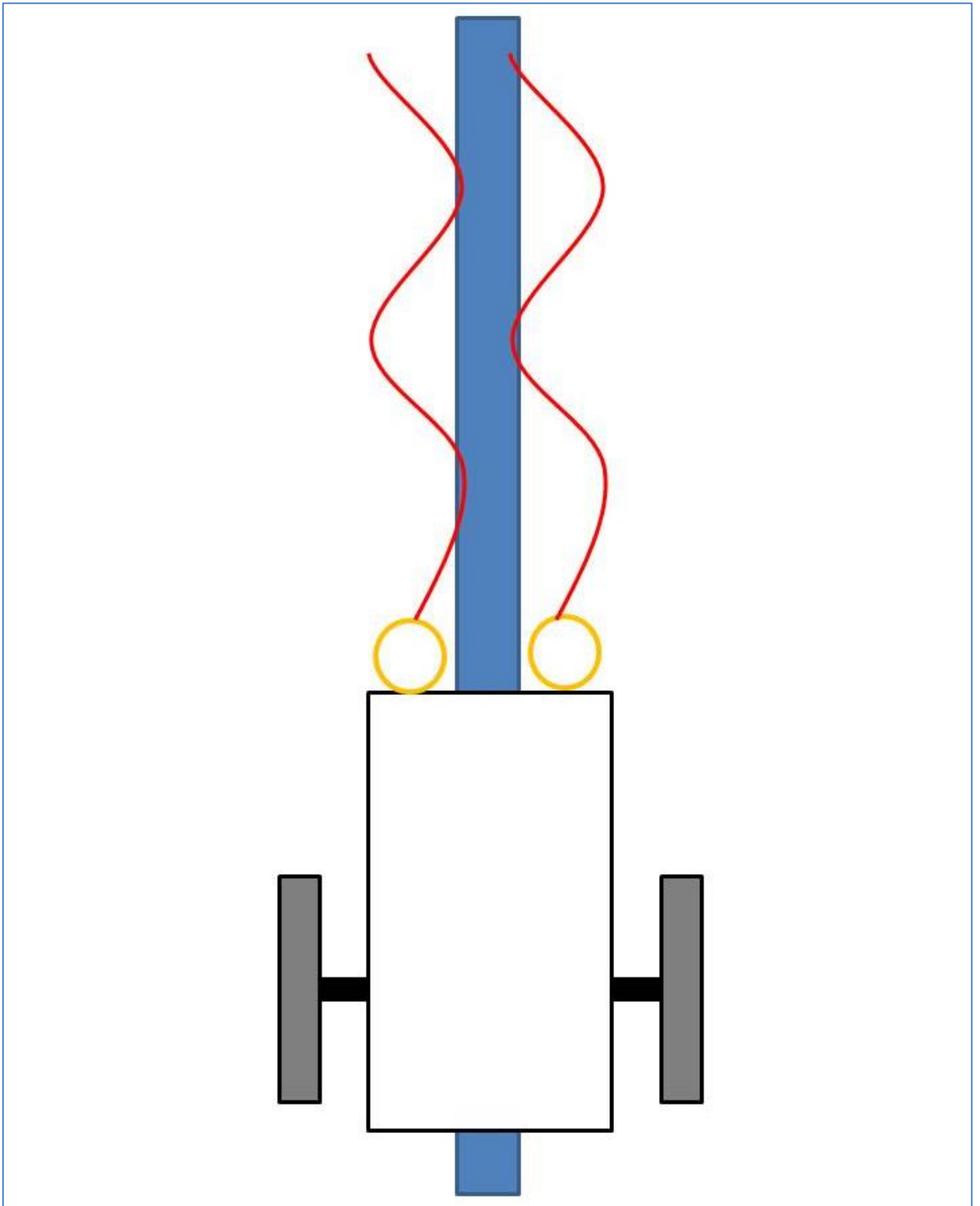


Рисунок 14 – Отслеживание линии платформой с помощью двух датчиков

Плюсы данного метода такие же как и у предыдущего:

- простая схема;
- легко программировать.

Минусы:

- все также не подходит для высоких скоростей передвижения;
- время тратится впустую, двигаясь из стороны в сторону;
- если платформа полностью потеряет линию, то обратно вернуться на нее не будет возможности.

3.3 Отслеживание линии с помощью трех датчиков

Чтобы улучшить метод с использованием двух датчиков, к ним можно установить третий датчик линии, как это показано на рисунке 15, чтобы центральный третий датчик устанавливался ровно над линией, а два боковых датчика устанавливались со смещением по обеим сторонам линии. В этом методе, как только центральный датчик не обнаружит линию, а один из боковых датчиков обнаружит линию, робот повернется, чтобы вернуть линию под центральный датчик.

Основное преимущество набора из трех датчиков линии по сравнению с парой датчиков заключается в том, что если все три датчика не обнаруживают линию, работа можно запрограммировать на остановку. Как только робот остановился, он может начать сканирование вперед и назад, пытаясь снова найти линию.

Еще одним плюсом является более тонкая настройка управления двигателями, что придаст плавность движения платформе. Будем считать, что если датчик видит линию, то такой датчик показывает единицу или 1, если не видит, то ноль или 0. Ниже приведены примеры показаний трех датчиков во время движения платформы по линии:

- 001 - линия справа;
- 010 - линия по центру;

- 100 - линия слева;
- 011 - линия ушла немного вправо;
- 110 - линия ушла немного влево.

Очевидно, что если у нас имеется комбинация, например, 001, когда только правый датчик видит линию, в таком случае нам надо сильно повернуть платформу обратно, чтобы она не съехала с линии.

А если у нас комбинация 011, когда и центральный и правый датчик видят линию, то это означает, что линия не сильно сместилась от центра платформы, соответственно можно повернуть платформу обратно к линии более плавно, потому что это не такой критичный режим как при комбинации 001.

Плюсы данного метода:

- самый надежный простой метод следования за линией;
- способен определить, потеряна ли линия;
- возможность настройки с постепенной регулировкой движения;
- легко программировать;

Минусы:

- все еще ездит с ненужными перемещениями из стороны в сторону;
- все также не подходит для высоких скоростей.

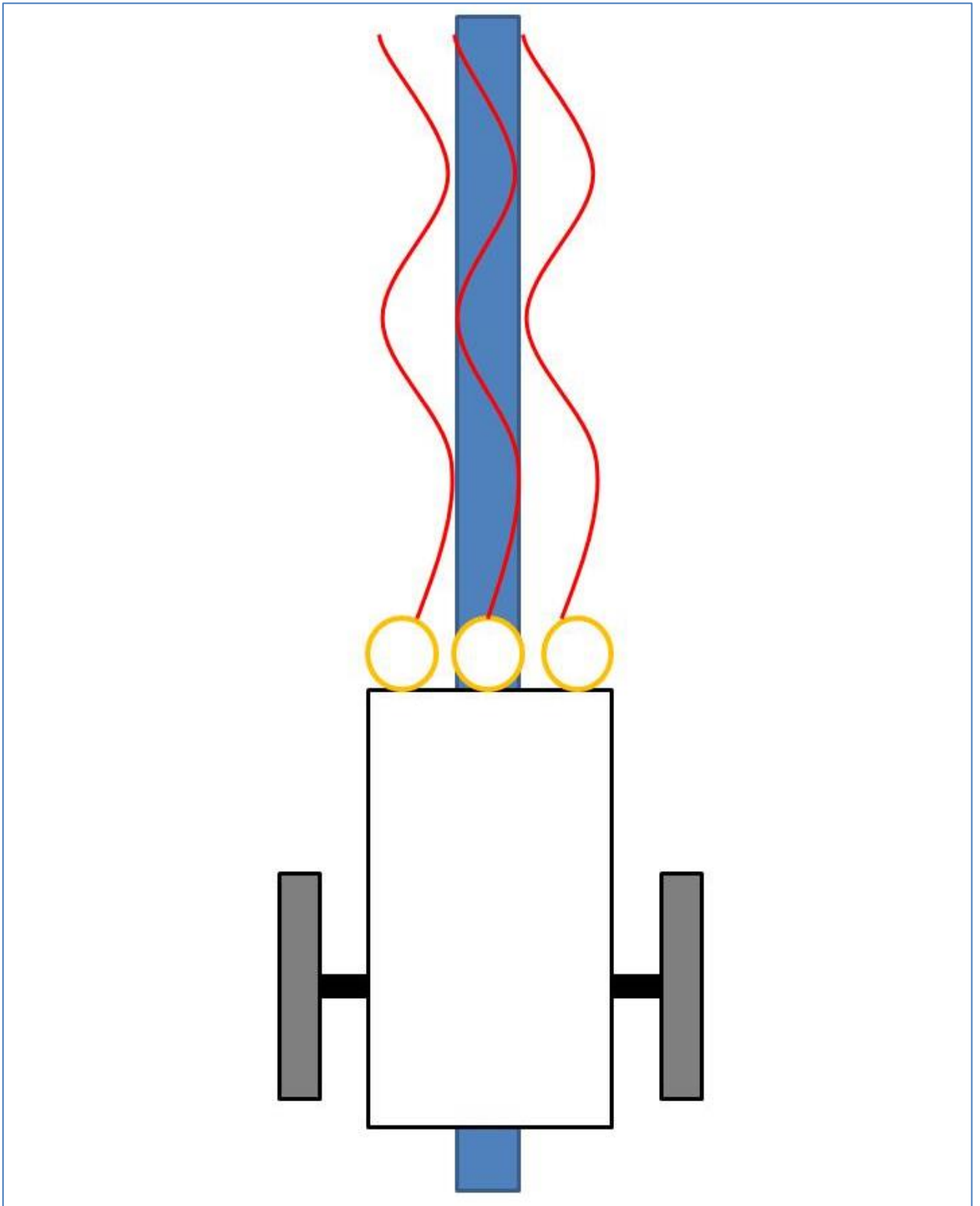


Рисунок 15 – Отслеживание линии платформой с помощью двух датчиков

3.4 Отслеживание линии с помощью четырех и более датчиков

Использование трёх датчиков вполне достаточно, чтобы эффективно отслеживать линию. Но их будет не достаточно, если мы захотим увеличить скорость мобильной платформы. Если платформа перемещается не слишком быстро, у нее есть много времени для регулировки ее направления и скорости, для того чтобы не вылететь с линии. Но если скорость увеличится, то вместо того, чтобы корректно следовать линии, платформа начнет не успевать поворачиваться и может вылететь с трассы, как это показано на рисунке 16. К тому же, если рассматривать промышленные мобильные платформы, тележки и буксировщики, то из-за того что они перевозят или тянут большие грузы, их масса сильно увеличивается, и соответственно увеличивается инерционность. Иными словами, они не смогут резко повернуть или затормозить. Добавление дополнительных датчиков повышает чувствительность и обзор платформы. Датчики могут гораздо эффективнее распознавать положение линии и более эффективно реагировать на изменение ее формы, что в свою очередь сильно исключает риск схода платформы с трассы.

Чтобы избежать такой ситуации со сходом платформы с трассы, которая изображена на рисунке 16, следует использовать больше датчиков с каждой стороны от линии. В этом случае линия будет дольше оставаться между крайними датчиками или, иными словами, в поле зрения платформы, что позволит ей корректно совершить поворот и вернуться обратно на линию.

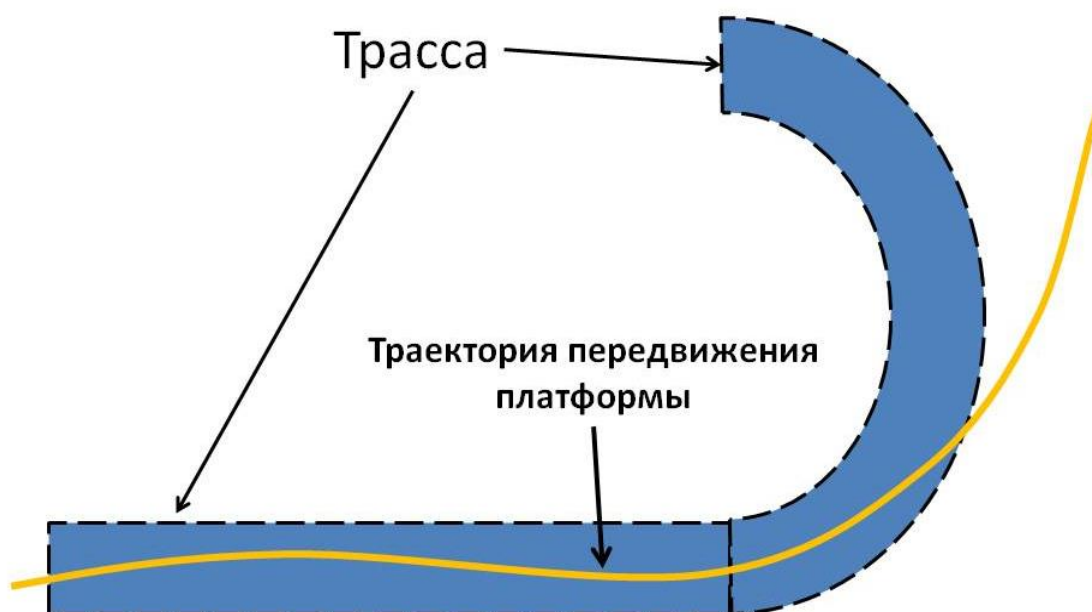


Рисунок 16 – Трасса и траектория движения платформы по ней

Приведем пример использования пяти датчиков для отслеживания линии. Как и в примере с тремя датчиками, будем считать, что если датчик видит линию, то такой датчик показывает единицу или 1, если не видит, то ноль или 0:

- 00001 – почти потеря линии, необходимо полностью повернуть налево и снизить скорость;
- 00011 – линия с правого края, повернуть налево;
- 00010 – линия ушла вправо, немного довернуть налево;
- 00110 – чуть правее от центра линии, небольшая коррекция налево;
- 00100 – по центру линии, увеличить скорость для прямых участков;
- 01100 – чуть левее от центра линии, небольшая коррекция направо;
- 01000 – линия ушла влево, немного довернуть направо;
- 11000 – линия с левого края, повернуть направо;
- 10000 – почти потеря линии, необходимо полностью повернуть направо и снизить скорость.

Из примера видно, что если использовать 5 датчиков, то получится осуществлять более тонкий и плавный контроль движения платформы.

Также можно заметить, что только крайние датчики, обнаружив линию, будут поворачивать платформу в ту или иную сторону с наибольшим коэффициентом. Остальные датчики, по мере приближения линии к центральному датчику, будут поворачивать платформу с меньшим коэффициентом. Поэтому, как уже было упомянуто ранее, использование в мобильных платформах нескольких датчиков по краям от линии способствует более точному управлению и эффективному реагированию на возникновения сильных изгибов линии, тем самым уменьшая риск схода с трассы. Еще одним плюсом использования нескольких датчиков является возможность увеличивать скорость следования платформы на прямых участках трассы, чтобы компенсировать время, затраченное на прохождение поворотов [20].

Подведем следующие выводы по разделу:

- использование одного датчика линии является самым примитивным и малоэффективным методом отслеживания линии мобильной платформой;
- использование двух датчиков линии является более эффективным методом, но при потере платформой линии нет возможности вернуться на нее обратно;
- использование трех датчиков при потере линии позволяет запрограммировать платформу на остановку;
- использование четырех и более датчиков является наиболее удачным и эффективным методом для отслеживания линии.

4 Разработка системы позиционирования с использованием нескольких датчиков линии

Как уже было сказано выше, датчики линии обнаруживают наличие черной линии, излучая инфракрасный свет и определяя уровень света, который отразился и возвратился к датчику. Они делают это с помощью главного элемента датчика. Этим элементом является оптопара, которая состоит из излучателя и детектора. В качестве излучателя практически всегда выступает инфракрасный светодиод. В качестве детектора могут выступать несколько элементов:

- фотодиод,
- фототранзистор,
- фоторезистор.

Наиболее простым и распространенным является использование фотодиода в качестве детектора. В данной работе для создания и исследования системы с несколькими датчиками в оптопаре так же будут использоваться светодиоды и фотодиоды.

Для отслеживания линии можно использовать два типа датчиков:

- цифровой,
- аналоговый.

4.1 Цифровой датчик линии

Цифровой датчик линии выдает только два значения: 0, когда не видит линию и 1, когда видит линию. Принцип работы цифрового датчика показан на рисунке 17. Цифровой датчик состоит из оптопары и ее токоограничивающих резисторов, и компаратора с подстроечным резистором, благодаря которому можно настроить уровень срабатывания датчика.

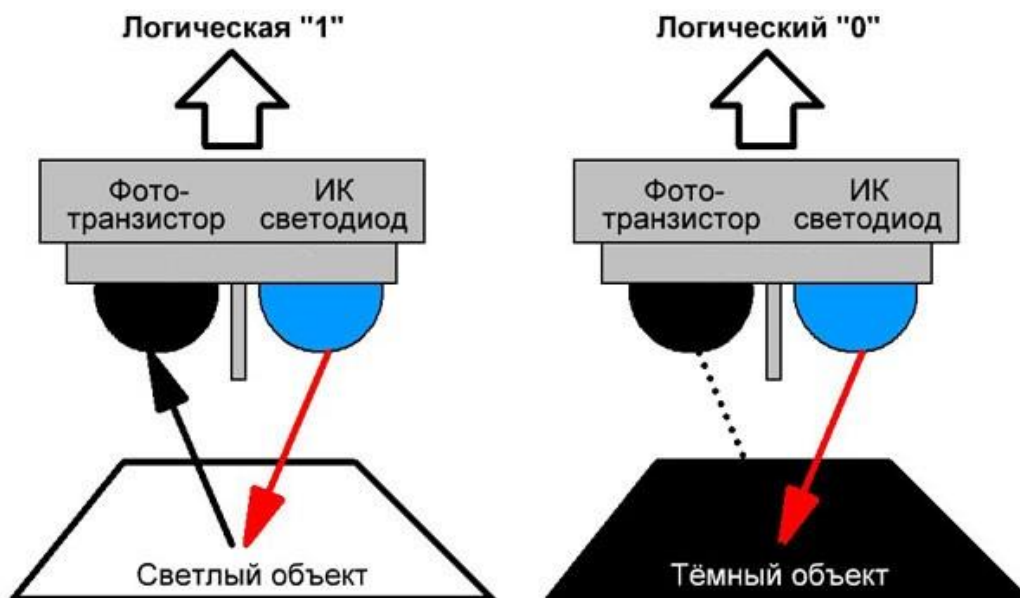


Рисунок 17 – Принцип работы цифрового датчика линии

Именно такой тип датчика использовался в разделе 3. Система, использующая такие датчики, у которых есть только два состояния, называется релейным регулятором. Именно из-за этого регулятора происходят резкие движения и ненужное перемещение из стороны в сторону от линии. Для промышленных автоматизированных платформ такое решение не подходит. К примеру, если платформа будет перевозить высокий тяжелый стеллаж с различными предметами и при этом дергаться из стороны в сторону, то есть очень большой риск опрокинуть этот самый стеллаж.

Гораздо удобнее и практичнее использовать аналоговые датчики и ПИД регулятор.

4.2 Аналоговый датчик линии

Аналоговый датчик линии, так же как и цифровой, состоит из оптопары и резисторов, ограничивающих ток светодиода и фотодиода. Но в отличие от цифрового датчика, у аналогового нет компаратора, благодаря чему сигнал с

фотодиода сразу попадает в микроконтроллер. Это позволяет использовать весь диапазон значений, приходящих с датчика, и соответственно, более эффективно отслеживать линию. В данной работе будут использоваться именно аналоговые датчики линии [2].

4.3 ПИД регулятор

ПИД регулятор является наиболее распространенным алгоритмом управления, используемым в промышленной автоматизации и приложениях, и более 95% промышленных контроллеров относятся к типу ПИД. ПИД регуляторы используются для более аккуратного, плавного и точного управления различными параметрами.

Чаще всего они используются для регулирования температуры, давления, скорости, расхода и других параметров процесса. Благодаря высокой производительности и функциональной простоте они были приняты во многих промышленных комплексах, где более точное управление является первоочередным требованием.

ПИД регулятор состоит из трех элементов, пропорционального, интегрального и дифференциального. Эти три основных коэффициента используются и изменяются в каждом ПИД регуляторе по-разному. Все зависит от конкретного назначения.

Для работы ПИД регулятору нужно подать значение, которое называется ошибкой. Это разность между заданным значением и фактическим значением. Для автоматизированной мобильной платформы ошибкой будет являться разница между показаниями датчиков [8].

4.4 Разработка системы позиционирования

4.4.1 Технические характеристики светодиодов и фотодиодов

Для создания датчиков будут использованы инфракрасные светодиоды и фотодиоды с маркировкой 301А, которые изображены на рисунке 18.



Рисунок 18 – Светодиод и фотодиод 301А для датчиков линии

Краткие технические характеристики светодиода и фотодиода отображены в таблице 1 и в таблице 2 соответственно.

Таблица 1 – Краткие технические характеристики светодиода

Прямой ток, мА	30
Обратное напряжение, В	5
Максимальный импульсный ток, мА	75
Температура окружающей среды для корректной работы, °С	-25 - +85
Температура окружающей среды для хранения, °С	-30 - +100
Диаметр линзы, мм	5

Таблица 2 – Краткие технические характеристики фотодиода

Прямой ток, мА	30
Обратное напряжение, В	5
Максимальный импульсный ток, мА	75
Температура окружающей среды для корректной работы, °С	-25 - +70
Температура окружающей среды для хранения, °С	-30 - +80
Диаметр линзы, мм	5

4.4.2 Сборка, подключение и исследование первого датчика

Большинство готовых датчиков корректно дают показания на высоте до 30 мм. Этого может быть недостаточно для переезда различных порогов, уклонов и препятствий. Поэтому в данной работе датчики для автоматизированной мобильной платформы будут располагаться на высоте 50 мм.

Первым шагом нужно подключить светодиоды и фотодиоды и снять с них показания. Для этого мы будем использовать макетную плату размером 100 мм на 200 мм со стандартным расстоянием между контактными отверстиями в 2,54 мм. Сигналы с фотодиодов будем считывать и обрабатывать с помощью платы ардуино нано, которая использует среду разработки Arduino IDE. Питанием схему будет обеспечивать лабораторный блок питания напряжением 5 В. Несмотря на то, что производителем для светодиодов заявлен ток в 30 мА, мы в рамках данной работы для увеличения светового потока будем подавать ток равный 50 мА. Для этого нам понадобятся резисторы номиналом 100 Ом. Для фотодиода мы будем использовать резисторы номиналом 20 кОм. Подключим все по схеме, как показано на рисунке 19.

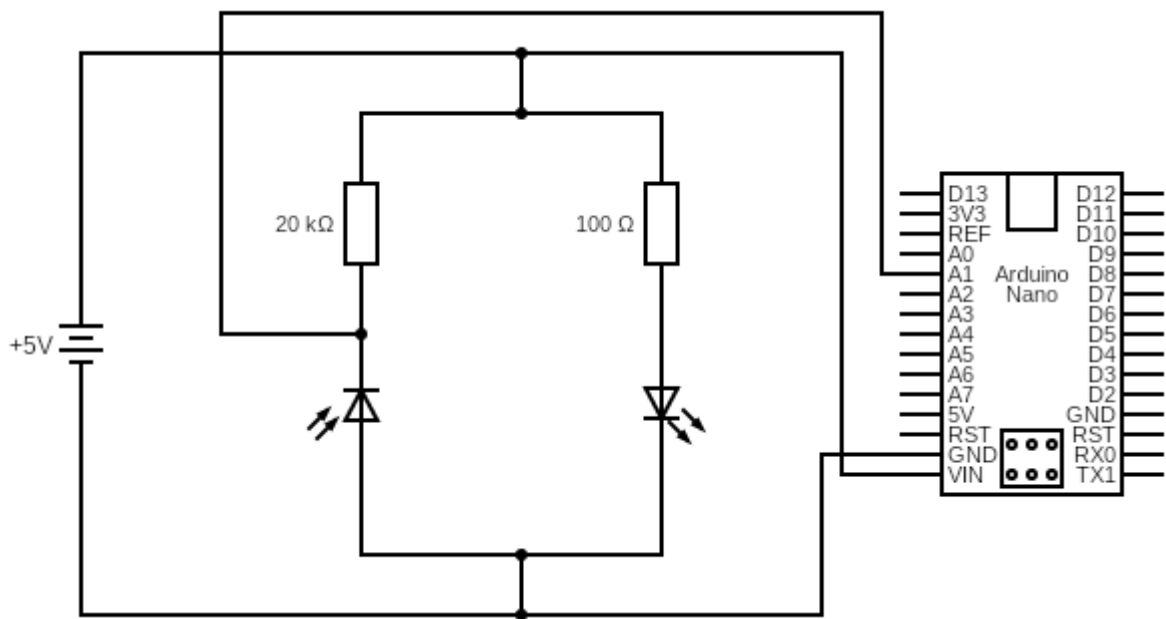


Рисунок 19 – Схема подключения светодиода и фотодиода к ардуино

Далее подключим плату ардуино к компьютеру, и в среде разработки Arduino IDE напишем небольшую программу, которая будет считывать значения с датчика, приходящие на вывод A1 платы ардуино и выводить их через монитор порта на экран компьютера:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  float value = analogRead(A6);
  Serial.print("value = ");
  Serial.print(value);
  Serial.println("\t");
  delay(100);
}
```

Результат выполнения данной программы показан на рисунке 20.



Рисунок 20 – Результат выполнения программы

Как мы видим, микроконтроллер считывает значения с фотодиода. Значит схема собрана верно. В плате ардуино используется микроконтроллер, который содержит в себе аналого-цифровой преобразователь или АЦП с разрешением 10 бит. АЦП оцифровывает поданное на аналоговый вывод напряжение, и переводит его в цифровое значение от 0 до 1023. Аналоговые входы могут считывать напряжение, подаваемое на них от 0 до опорного напряжения. В нашем случае опорным напряжением будет 5 В.

Снимем показания датчика на белом и черном фоне. Показания с датчика на белом фоне изображены на рисунке 21, а показания датчика на черном фоне изображены на рисунке 22.

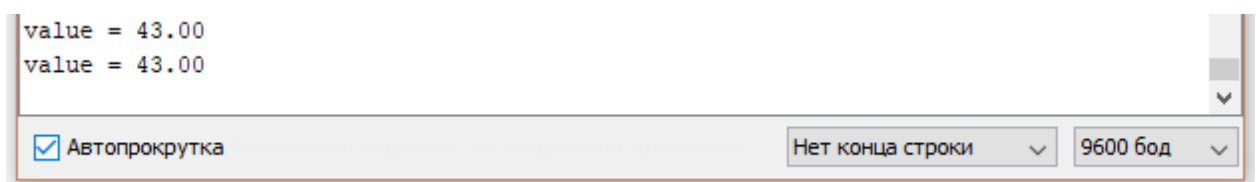


Рисунок 21 – Показания с датчика на белом фоне

```
value = 973.00
value = 973.00
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 22 – Показания с датчика на черном фоне

Переведем данные значения АЦП в значения напряжения с помощью данной строчки кода: $\text{float valueV} = \text{value} * (5.0 / 1023.0)$. Еще раз произведем замеры на белом и на черном фоне и выведем рассчитанные показания напряжения отдельным столбцом. Показания с датчика на белом фоне со значениями напряжения изображены на рисунке 23, а показания датчика на черном фоне со значениями напряжения изображены на рисунке 24.

```
value = 41.00    valueV = 0.20 V
value = 42.00    valueV = 0.21 V
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 23 – Показания с датчика на белом фоне с уровнем напряжения

```
value = 978.00    valueV = 4.78 V
value = 977.00    valueV = 4.78 V
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 24 – Показания с датчика на черном фоне с уровнем напряжения

Как мы можем заметить, минимальное значение напряжения составляет 0,2 В, а максимальное значение составляет 4,78 В. Таким образом, рабочий диапазон напряжений составляет 4,58 В. Если перевести в процентное соотношение, то это составляет 91,6% от напряжения 5 В. Иными словами, для работы с датчик использует практически весь диапазон

подаваемого на него напряжения. Это позволит более точно контролировать переход от белого фона к черному, и, соответственно, более точно отслеживать линию трассы.

В процессе данных замеров было обнаружено, что в некоторых случаях, при расположении датчика ровно вертикально к полу, над черной линией значения опускались до нуля. Это связано с тем, что черная линия имеет небольшой глянец на поверхности, и при определенных обстоятельствах свет от светодиода не поглощается линией, а полностью отражается от нее, как и от белой поверхности, попадает на фотодиод и регистрируется микроконтроллером. Чтобы избавиться от данного эффекта, необходимо располагать датчики под небольшим углом к полу. В данной работе мы будем располагать плату с датчиками под углом 15° к полу.

4.4.3 Исследование на сонаправленность геометрической и оптической осей светодиода

Так же в процессе замеров было обнаружено, что даже при небольшом отклонении светодиода или фотодиода показания датчика изменяются. Была выдвинута теория, что геометрическая ось линзы светодиода не совпадает с оптической осью, как это показано на рисунке 25. Соответственно, если мы расположим фотодиод слева от светодиода, то фактическое световое пятно будет ближе к фотодиоду. На него будет попадать больше отраженного света, и диапазон считанных значений увеличится. А если мы расположим фотодиод справа от светодиода, то фактическое световое пятно будет намного дальше от светодиода. В таком случае на фотодиод будет попадать меньше отраженного света, и диапазон считанных значений уменьшится.

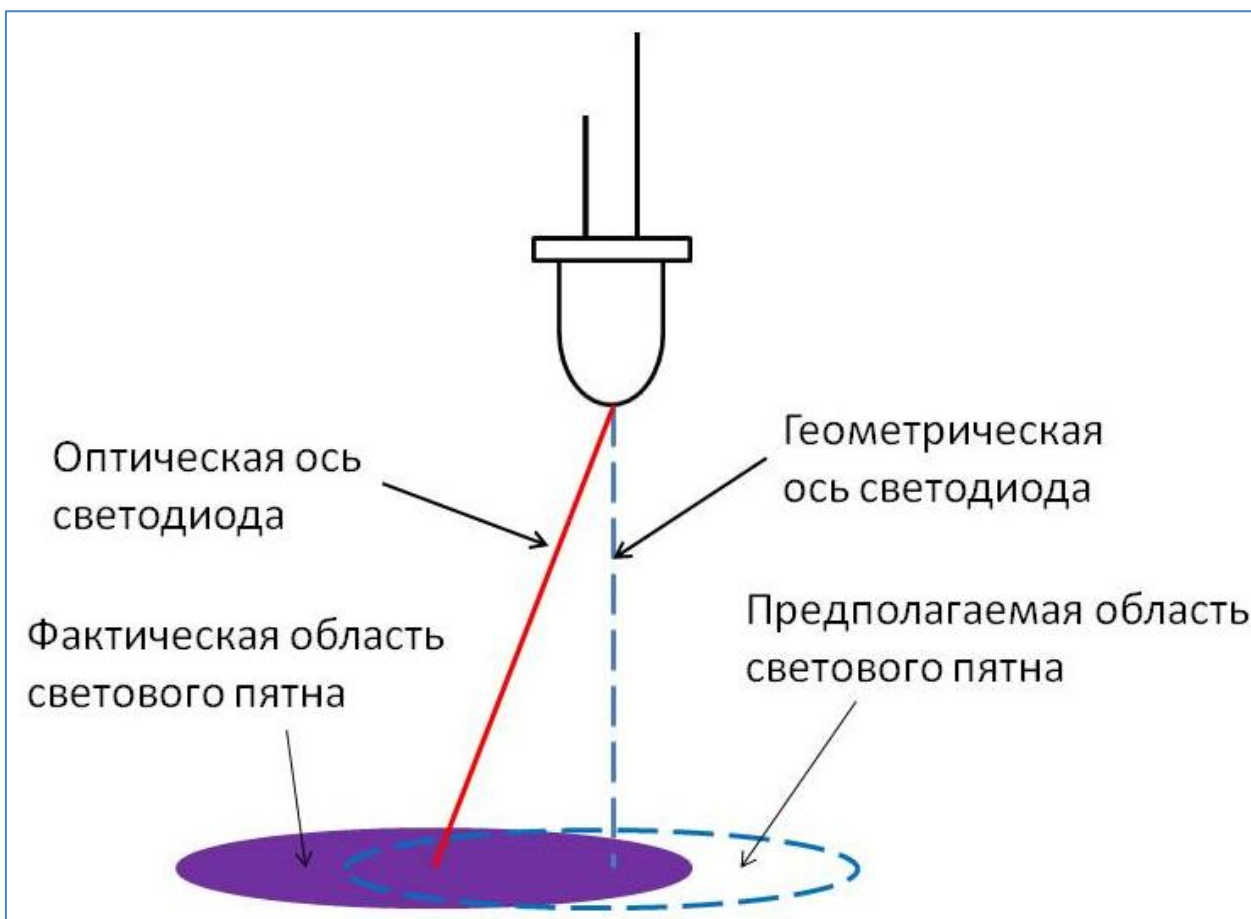


Рисунок 25 – Несовпадение геометрической и оптической осей светодиода

Чтобы подтвердить или опровергнуть данную теорию были проведены исследования на показания значений датчика в зависимости от расположения элементов оптопары. Для исследования было взято 4 варианта расположения светодиода и фотодиода относительно друг друга, как это показано на рисунке 26. Буквы А и К означают анод и катод соответственно.

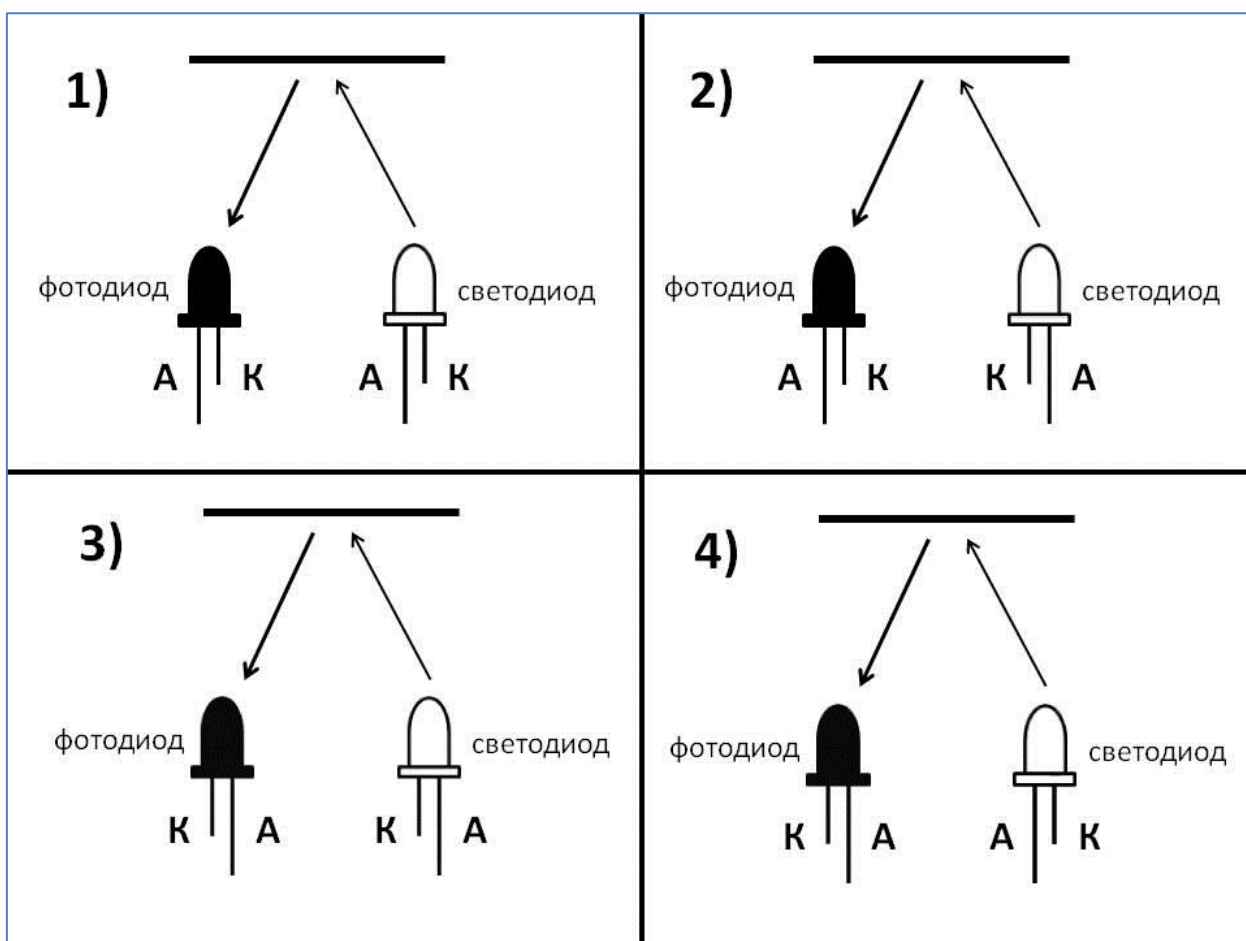


Рисунок 26 – Варианты расположения светодиода и фотодиода относительно друг друга

Исследование проводилось три раза. В каждом из исследований были взяты различные пары светодиодов и фотодиодов. Значения показаний датчиков каждого из трех экспериментов сведены в таблицу 3, в таблицу 4 и в таблицу 5 соответственно.

Таблица 3 - Эксперимент с первой парой светодиода и фотодиода

Вариант расположения по рисунку 26	1	2	3	4
Значение напряжения на черном фоне, В	4,7	4,6	4,72	4,63
Значение напряжения на сером фоне, В	2,4	2,48	2,65	2,53
Значение напряжения на белом фоне, В	0,23	0,2	0,22	0,2

Таблица 4 - Эксперимент со второй парой светодиода и фотодиода

Вариант расположения по рисунку 26	1	2	3	4
Значение напряжения на черном фоне, В	4,65	4,67	4,78	4,61
Значение напряжения на сером фоне, В	2,52	2,5	2,61	2,4
Значение напряжения на белом фоне, В	0,2	0,21	0,2	0,2

Таблица 5 - Эксперимент с третьей парой светодиода и фотодиода

Вариант расположения по рисунку 26	1	2	3	4
Значение напряжения на черном фоне, В	4,69	4,7	4,75	4,68
Значение напряжения на сером фоне, В	2,48	2,62	2,5	2,58
Значение напряжения на белом фоне, В	0,21	0,22	0,2	0,2

Исходя из полученных данных, мы можем заметить, что максимальная разность показаний среди всех трех экспериментов составляет:

- 0,18 В на черном фоне;
- 0,25 В на сером фоне;
- 0,03 В на белом фоне.

Максимальный диапазон напряжений среди всех трех экспериментов составляет 4,58 В, а минимальный диапазон составляет 4,4 В.

Как мы можем заметить, сильной разницы в значениях нет. Исходя из этого, можно сделать вывод, что геометрическая и фактическая оси светодиодов совпадают.

Для дальнейших исследований в данной работе мы будем использовать третий вариант расположения светодиодов и фотодиодов, который показан на рисунке 26. Он наиболее выгоден при разводке печатной платы, потому что анод и катод располагаются рядом друг с другом, и подключаются к минусу питания, соответственно, эти выводы можно сразу объединить. При изучении уже готовых продаваемых решений было выявлено, что они так же

используют третий вариант расположения. Пример готового продаваемого аналогового датчика с третьим вариантом расположения светодиодов и фотодиодов показан на рисунке 27.

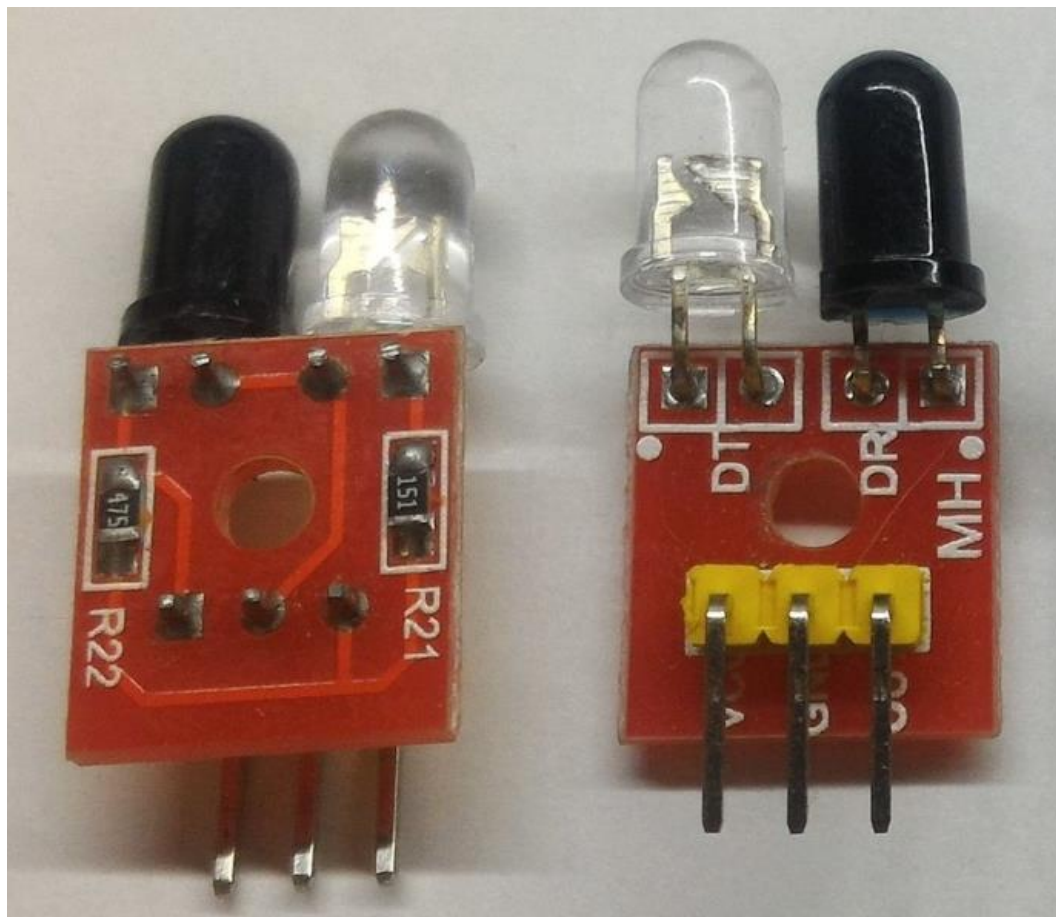


Рисунок 27 – Пример аналогового датчика линии

4.4.4 Сборка и исследование системы позиционирования на линии с использованием шести датчиков

Далее мы взяли макетную плату размерами 100 мм на 200 мм и расположили на ней шесть оптопар, как показано на рисунке 28. Расстояние между центром светодиода и центром фотодиода в оптопарах составило 7,62 мм. Расстояние между центрами соседних светодиодов и соседних фотодиодов составило 20,32 мм.

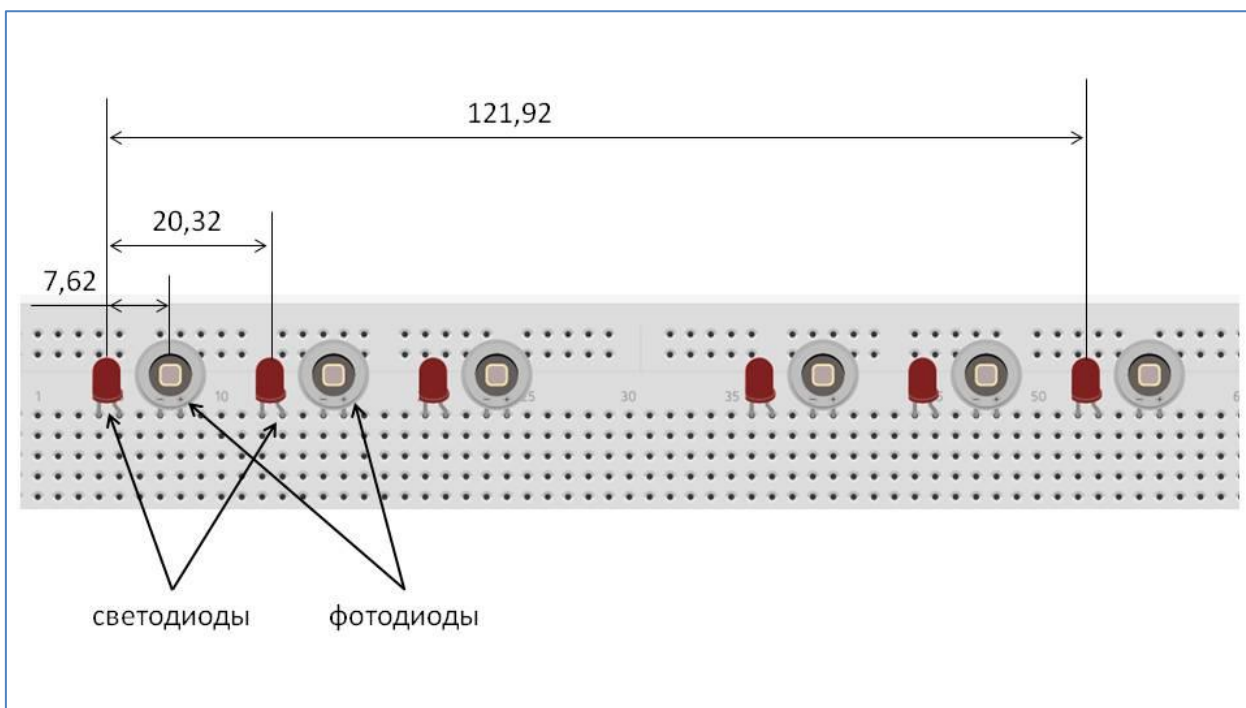


Рисунок 28 – Расположение датчиков на макетной плате

Далее мы подключили все компоненты по схеме, которая показана на рисунке 29. Значения с датчиков подаются на аналоговые выводы А1 - А6 платы ардуино. Плюс питания подключается к выводу VIN платы ардуино, а минус к выводу GND. Светодиод подключается через резистор 100 Ом, фотодиод подключается через резистор 20 кОм.

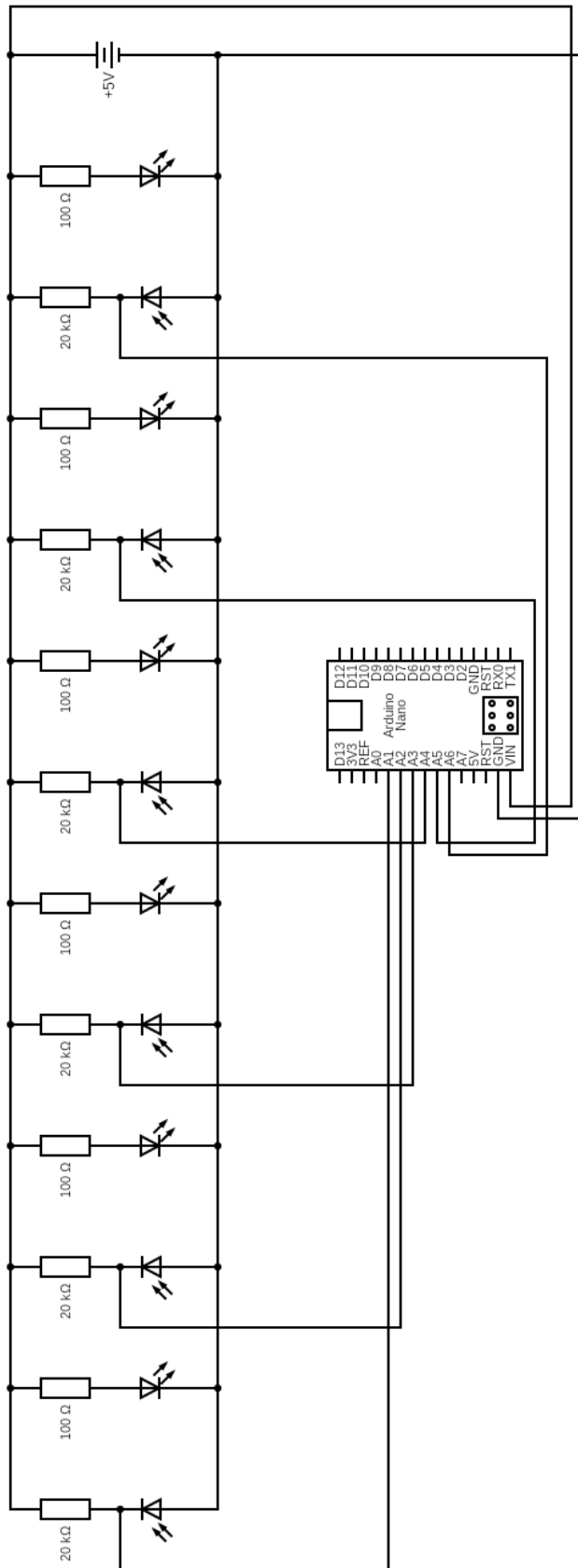


Рисунок 29 – Схема подключения светодиодов и фотодиодов к плате ардуино

После этого мы подключили ардуино к компьютеру, и написали программу, которая будет считывать показания с датчиков, переводить их в напряжения и выводить на экран через монитор порта. Датчики в программе будут обозначаться как vd1 – vd6. Результат со значениями датчиков при первом запуске показан на рисунке 30.

```
vd1= 3.76      vd2= 1.55      vd3= 1.03      vd4= 1.55      vd5= 1.60      vd6= 2.45
vd1= 3.76      vd2= 1.55      vd3= 1.03      vd4= 1.55      vd5= 1.60      vd6= 2.44
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 30 – Значения напряжения шести датчиков при первом включении

Далее расположили датчики над белым, над черным и над серым фоном, произвели замеры, и вывели рассчитанные показания напряжений. Показания с датчиков на белом, на черном и сером фоне изображены на рисунке 31, на рисунке 32 и на рисунке 33 соответственно.

```
vd1= 2.89      vd2= 0.22      vd3= 0.20      vd4= 0.22      vd5= 0.22      vd6= 0.64
vd1= 2.90      vd2= 0.22      vd3= 0.20      vd4= 0.22      vd5= 0.22      vd6= 0.64
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 31 – Показания датчиков на белом фоне

```
vd1= 4.90      vd2= 4.82      vd3= 4.76      vd4= 4.79      vd5= 4.79      vd6= 4.94
vd1= 4.90      vd2= 4.82      vd3= 4.76      vd4= 4.79      vd5= 4.79      vd6= 4.94
```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 32 – Показания датчиков на черном фоне

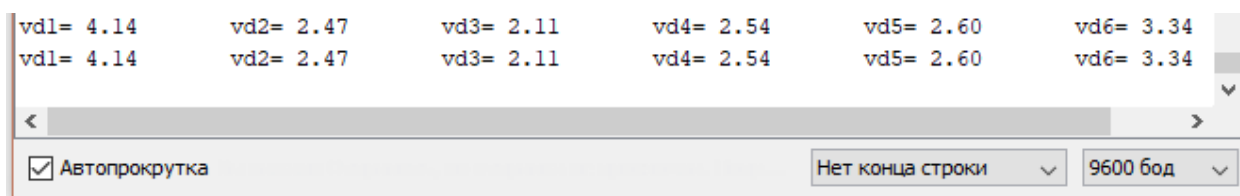


Рисунок 33 – Показания датчиков на сером фоне

Как мы можем заметить, показания крайних датчиков vd1 и vd6 сильно отличаются от показаний остальных датчиков. Это может быть связано с неисправностью светодиодов или фотодиодов в этих оптопарах. Так же мы можем заметить, что показания датчиков vd2 – vd5 тоже отличаются друг от друга, но уже в меньшей степени, по сравнению с vd1 и vd6. Особенно хорошо это видно на сером фоне. Такой эффект может возникать из-за того, что у нас появляются перекрытия световых пятен от светодиодов, из-за чего в некоторых местах будет отражаться и попадать на определенный фотодиод больше света, чем, например, на соседний фотодиод. В связи с этим у некоторых датчиков уменьшается диапазон снимаемых значений, а у некоторых увеличивается. Фотографию световых пятен датчиков с перекрытиями можно увидеть на рисунке 34.

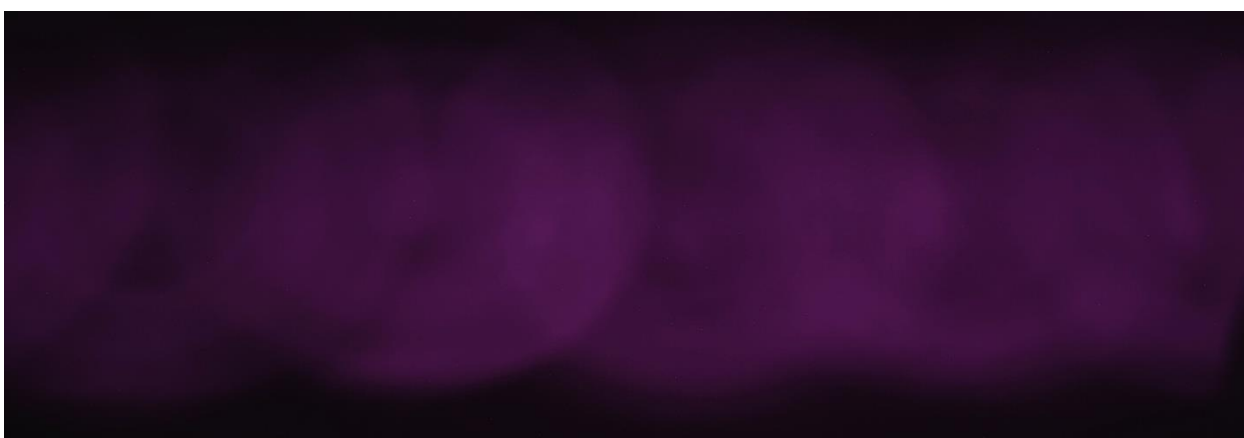


Рисунок 34 – Световые пятна датчиков на полу

4.4.5 Расчет ошибки для ПИД регулятора при расположении светодиодов и фотодиодов в один ряд

Как было озвучено выше, в данной работе мы будем использовать аналоговые датчики, показания с которых будут передаваться на ПИД регулятор. Для ПИД регулятора нужно подавать ошибку, которой является разность значений между датчиками. В дальнейшей работе мы будем использовать показания с датчиков не в напряжении, а в цифровых единицах от 0 до 1023, которые выдает АЦП.

Для исследования мы будем использовать черную линию шириной 48 мм, наклеенную на белый лист бумаги.

Для удобства дальнейшей работы мы будем подавать на ПИД регулятор значения от 0 до 100. Соответственно, нужно пропорционально перенести диапазон значений, получаемых с датчиков в диапазон значений от 0 до 100. С этим нам поможет функция `map()`. Данная функция пропорционально переносит значение с датчика из его текущего диапазона, в требуемый диапазон значений. Разберем на примере. Допустим, минимальное и максимальное значение с датчика ровно 70 и 960 соответственно. В таком случае, запись функции будет выглядеть следующим образом: `map(vd, 70, 960, 0, 100)`. Соответственно, нам нужно определить минимальное и максимальное значение показаний каждого датчика, и для каждого из них прописать функцию `map()` [11].

Для вычисления ошибки мы будем использовать следующую формулу: $err = (vd3 - vd4) + (vd2 - vd5) + (vd1 - vd6)$. По ней из значений левых датчиков `vd1-vd3`, которые находятся с левой стороны от линии, будут вычитаться значения правых датчиков `vd4-vd6`, которые находятся с правой стороны от линии. Вставим эту формулу в скетч и выведем результат. Отдельным столбцом будем выводить рассчитанное значение ошибки. Линию мы будем располагать посередине между 3 и 4 датчиком. Результат можно увидеть на рисунке 35.


```

vd1= 0 vd2= 0 vd3= 55 vd4= 55 vd5= 0 vd6= 0 err= 0
vd1= 0 vd2= 0 vd3= 55 vd4= 55 vd5= 0 vd6= 0 err= 0

```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 35 – Значение датчиков и рассчитанной ошибки при расположении линии между 3 и 4 датчиками

Для примера сдвинем линию немного влево, расположив ее между 2 и 3 датчиком, и выведем показания. Результат можно увидеть на рисунке 36.

```

vd1= 8 vd2= 95 vd3= 100 vd4= 0 vd5= 0 vd6= 0 err= 203
vd1= 8 vd2= 95 vd3= 100 vd4= 0 vd5= 0 vd6= 0 err= 203

```

Автопрокрутка Нет конца строки 9600 бод

Рисунок 36 – Значение датчиков и рассчитанной ошибки при расположении линии между 2 и 3 датчиками

Снимем показания с датчиков, а так же рассчитанную ошибку при различном положении линии относительно датчиков. За нулевое примем положение между 3 и 4 датчиками как это показано на рисунке 37. Перемещать линию будем на 6 см влево и потом на 6 см вправо. Снимать показания будем через каждый сантиметр. Все значения занесем в таблицу 6.



Рисунок 37 – Начальное расположение линии относительно датчиков

Таблица 6 – Показания с датчиков и рассчитанная ошибка

Положение черной линии, см	Показания датчиков						Рассчитанная ошибка
	vd1	vd2	vd3	vd4	vd5	vd6	
-6	100	41	0	0	0	0	141
-5	100	94	0	0	0	0	194
-4	80	100	61	0	0	0	241
-3	25	100	100	0	0	0	225
-2	0	76	100	0	0	0	176
-1	0	6	100	0	0	0	106
0	0	0	57	57	0	0	0
1	0	0	0	100	0	0	-100
2	0	0	0	100	54	0	-154
3	0	0	0	100	97	0	-197
4	0	0	0	71	100	57	-228
5	0	0	0	4	96	100	-200
6	0	0	0	0	42	100	-142

По значениям таблицы 6 построили график зависимости значений каждого датчика от положения линии, который изображен на рисунке 38.

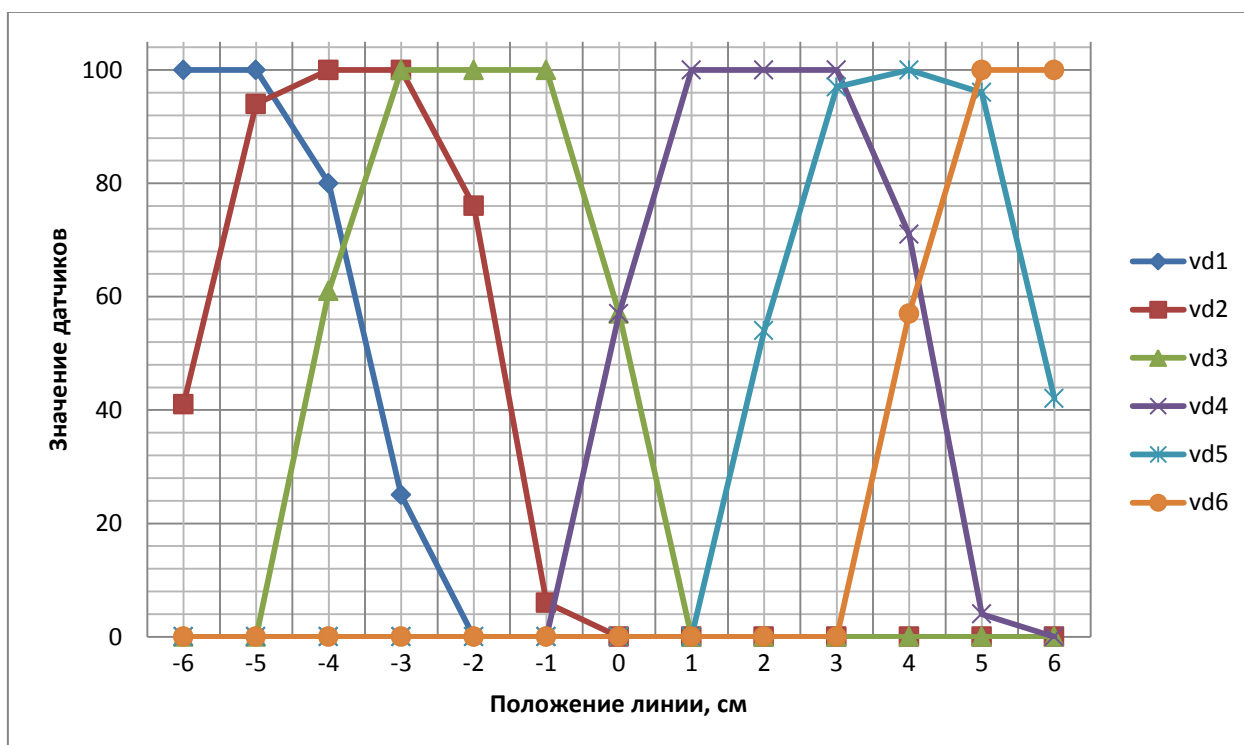


Рисунок 38 – График зависимости значений датчиков от положения линии

Так же по значениям таблицы 6 построили график зависимости рассчитанной ошибки от положения линии, который изображен на рисунке 39.

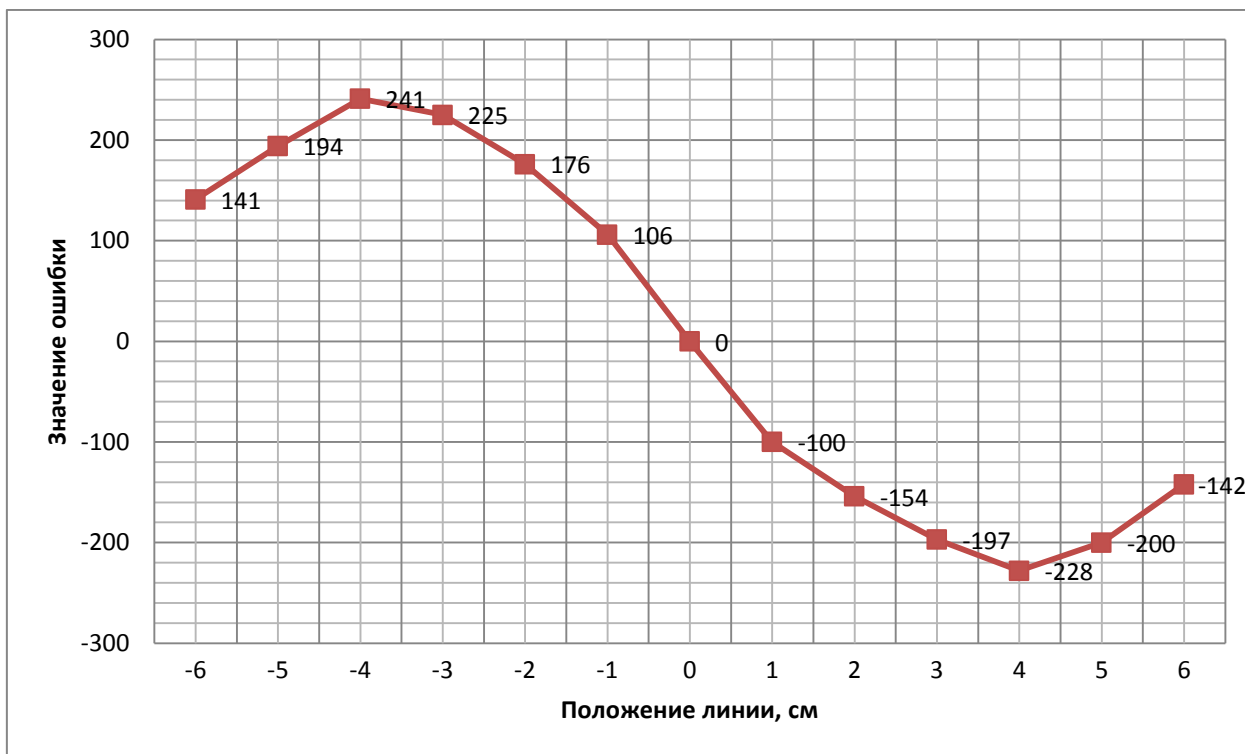


Рисунок 39 – График зависимости рассчитанной ошибки от положения линии

Как мы можем заметить по графику на рисунке 38, линия всегда остается в поле зрения системы из шести датчиков.

А по графику на рисунке 39 мы можем заметить, что, не считая загибов по краям, график приближен к линейному. Это позволит более предсказуемо и корректно работать с этими значениями, подавая их на ПИД регулятор.

4.4.5 Расчет ошибки для ПИД регулятора при расположении светодиодов и фотодиодов друг за другом

4.4.5.1 Расположение светодиода ближе к полу

Помимо варианта расположения датчиков, когда светодиоды и фотодиоды стоят в один ряд, как это изображено на рисунке 28, есть еще вариант расположения их друг за другом, как это показано на рисунке 40. Иными словами, у нас получается отдельно ряд светодиодов и отдельно ряд фотодиодов.

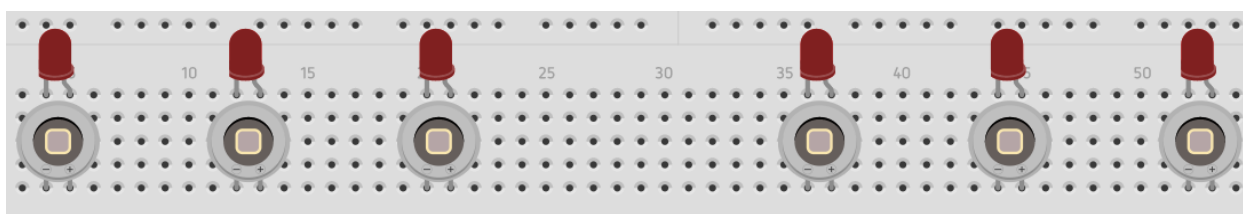


Рисунок 40 – Расположение датчиков на макетной плате

Как мы помним, датчики у нас стоят под углом 15° к полу, чтобы избежать бликов. Соответственно можно проверить еще два различных положения датчиков, когда светодиод находится ближе к полу, и наоборот, когда фотодиод находится ближе к полу.

Поэтому далее мы расположили датчики на плате, как показано на рисунке 40, и наклонили плату так, чтобы светодиод был ближе к полу, чем фотодиод, как это показано на рисунке 41. При этом мы сохранили угол в 15° к полу. Расстояние в 50 мм от пола до датчика в данном случае отсчитывается до светодиода.

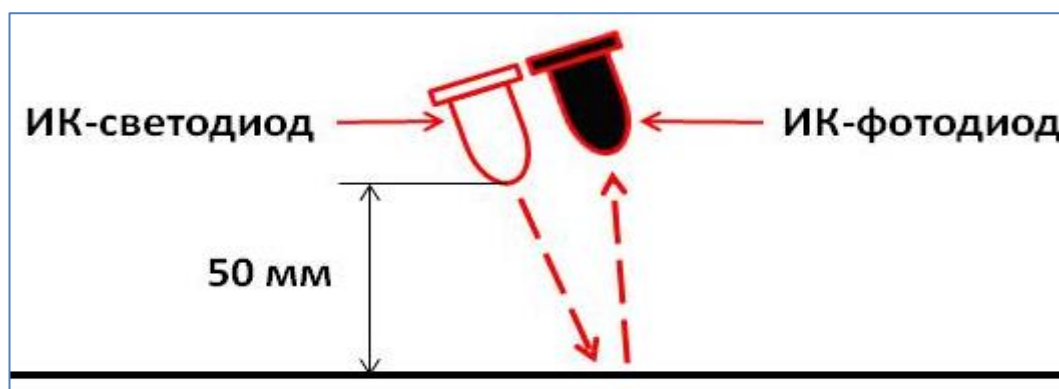


Рисунок 41 – Расположение оптопары, где светодиод ближе, чем фотодиод

Далее мы сняли показания с датчиков, а так же рассчитанную ошибку при различном положении линии относительно датчиков от -6 см до 6 см, снимая показания через каждый сантиметр. За нулевое приняли положение между 3 и 4 датчиками как это показано на рисунке 37. Все значения занесли таблицу 7.

Таблица 7 - Показания с датчиков и рассчитанная ошибка при расположении светодиода к полу ближе, чем фотодиода

Положение черной линии, см	Показания датчиков						Рассчитанная ошибка
	vd1	vd2	vd3	vd4	vd5	vd6	
-6	100	85	0	0	0	0	185
-5	100	100	12	0	0	0	212
-4	70	100	67	0	0	0	237
-3	13	90	100	0	0	0	203
-2	0	37	100	0	0	0	137
-1	0	0	95	2	0	0	93
0	0	0	59	59	0	0	0
1	0	0	3	99	15	0	-111
2	0	0	0	100	68	4	-172
3	0	0	0	96	100	40	-236
4	0	0	0	54	100	97	-251
5	0	0	0	0	94	100	-194
6	0	0	0	0	53	100	-153

По значениям таблицы 7 построили график зависимости рассчитанной ошибки от положения линии, который изображен на рисунке 42.

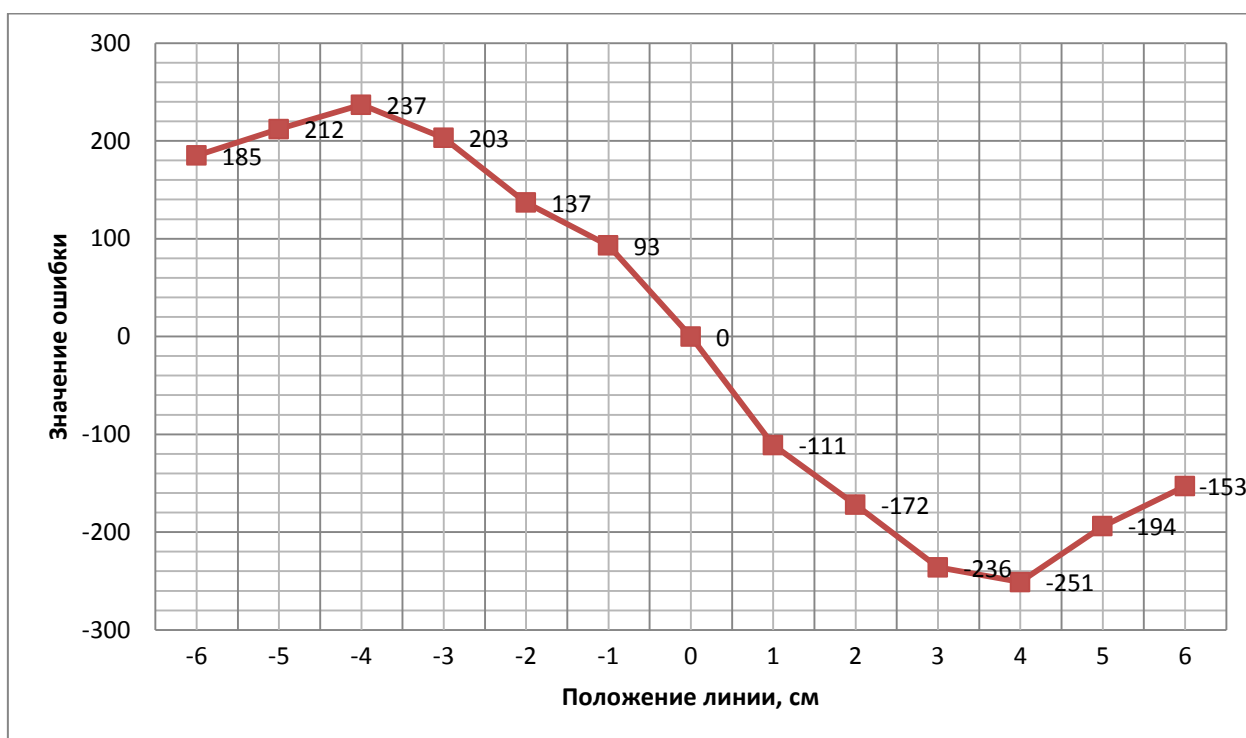


Рисунок 42 – График зависимости рассчитанной ошибки от положения линии при расположении светодиода к полу ближе, чем фотодиода

4.4.5.2 Расположение фотодиода ближе к полу

Далее мы расположили плату как и в пункте 4.4.5.1, но на это раз наклонили плату так, чтобы фотодиод был ближе к полу, чем светодиод, как это показано на рисунке 43. Расстояние в 50 мм от пола до датчика в данном случае отсчитывается до фотодиода. Далее мы также сняли показания с датчиков и рассчитанную ошибку при различном положении линии относительно датчиков, и все значения занесли таблицу 8. По значениям таблицы 8 построили график зависимости рассчитанной ошибки от положения линии, который изображен на рисунке 44.

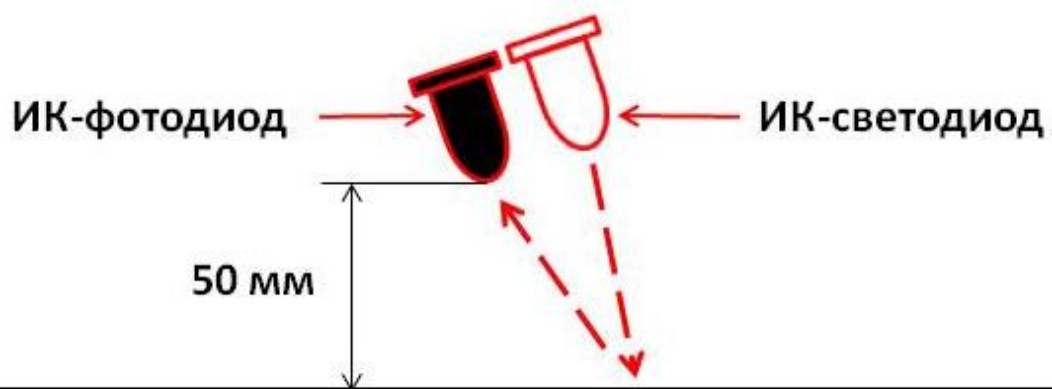


Рисунок 43 – Расположение оптопары, где фотодиод ближе, чем светодиода

Таблица 8 - Показания с датчиков и рассчитанная ошибка при расположении фотодиода к полу ближе, чем светодиода

Положение черной линии, см	Показания датчиков						Рассчитанная ошибка
	vd1	vd2	vd3	vd4	vd5	vd6	
-6	98	76	0	0	0	0	174
-5	98	97	0	0	0	0	195
-4	74	84	54	0	0	0	212
-3	12	83	98	0	0	0	192
-2	0	23	97	0	0	0	135
-1	0	0	92	0	0	0	95
0	0	0	56	56	0	0	0
1	0	0	0	99	0	0	-99
2	0	0	0	100	66	3	-169
3	0	0	0	99	100	24	-223
4	0	0	0	64	100	92	-256
5	0	0	0	0	96	100	-196
6	0	0	0	0	57	100	-157

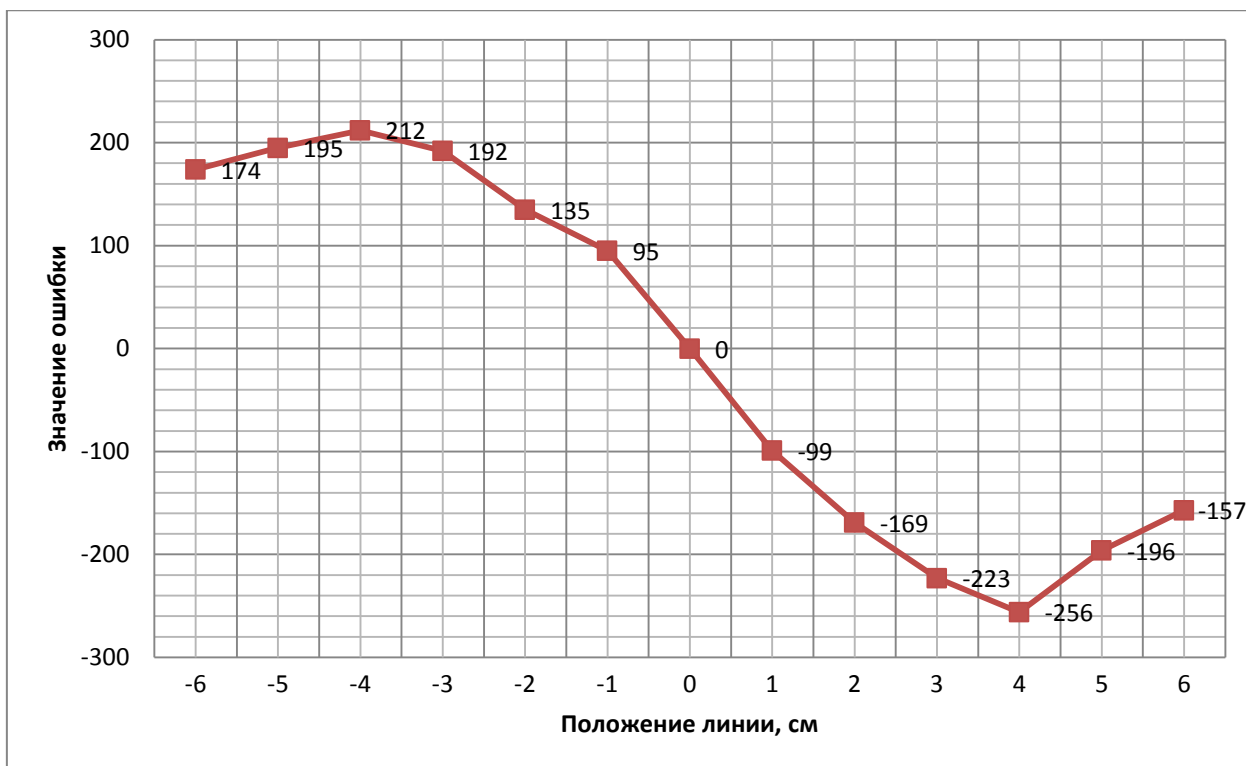


Рисунок 44 – График зависимости рассчитанной ошибки от положения линии при расположении фотодиода к полу ближе, чем светодиода

По полученным данным мы можем заметить, что при расположении светодиодов и фотодиодов друг за другом, графики менее линейны, чем при расположении элементов в один общий ряд. Особенно это заметно на графике, который изображен на рисунке 44. Это происходит из-за того, что при такой конструкции с расположением элементов друг за другом, на фотодиоды попадает меньше отраженного света. Диапазон значений, снимаемых с датчика, уменьшается, соответственно и рассчитанная ошибка тоже уменьшается. В дальнейшем это может негативно сказаться на движении платформы. Поэтому расположение светодиодов и фотодиодов в один общий ряд, как это показано на рисунке 28, является наиболее удачным и перспективным. В дальнейшей работе будет использоваться именно такое расположение датчиков.

4.4.6 Алгоритм пересчета полученных значений

Стоит напомнить, что для ПИД регулятора нам нужно подавать значения от 0 до 100, а значение ошибки, которое мы получаем, варьируется в диапазоне 200-250 единиц. Так же можно заметить, что при смещении линии дальше 4 см значение ошибки уменьшается. Это происходит из-за того, что при перемещении линии далее 4 см ее продолжают отслеживать только крайние датчики. Соответственно суммарная рассчитанная ошибка уменьшается. Для платформы это недопустимо. Для того чтобы платформа не съехала с трассы, нам нужно сделать прямую зависимость значения датчиков от положения линии, чтобы при увеличении смещения линии от центра значение ошибки так же увеличивалось. Иными словами, чтобы максимальное значение ошибки у нас было при смещении линии на 6 см, когда только крайние датчики видят линию.

Чтобы решить эти проблемы был разработан следующий алгоритм:

```
v1=vd1;  
v2=max(v1,vd2);  
v3=max(v2,vd3);  
v7=vd7;  
v6=max(v7,vd6);  
v5=max(v6,vd5);  
err=(v1+v2+v3-v5-v6-v7)/3;
```

По этому алгоритму значение с крайнего первого датчика сравнивается со значением со второго датчика, находится максимальное среди них, и присваивается второму датчику. Далее присвоенное значение второго датчика сравнивается с третьим датчиком, находится максимальное значение среди них, и присваивается третьему датчику. То же самое делается с 4, 5 и 6 датчиком. После этого из суммы 1-3 датчиков вычитается сумма 4-6 датчиков и делится на 3. Результат можно увидеть на рисунке 45. Значения, подставляемые в алгоритм, использовались из таблицы 6.

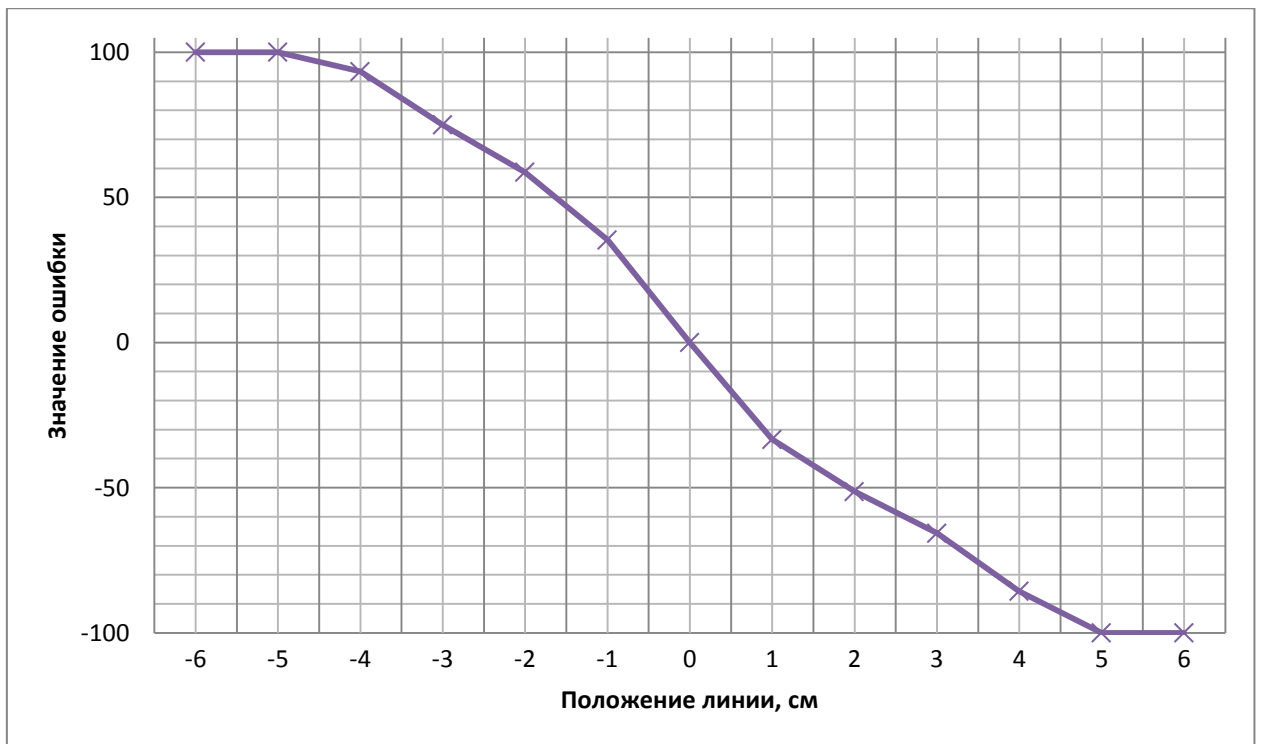


Рисунок 45 – Результат выполнения алгоритма по пересчету ошибки

Можно заметить, что значения плавно изменяются в диапазоне от -100 до 100, а не как раньше в диапазоне до 250 единиц. Соответственно, такие значения мы уже можем подавать на ПИД регулятор. Так же мы видим, что зависимость значения ошибки практически прямо пропорциональна положению линии. Это означает, что чем сильнее сдвигается линия от середины, тем сильнее будет значение ошибки, и тем сильнее платформа будет поворачивать, чтобы не съехать с линии. Так же мы видим, что максимальные значения ошибки у нас получаются только в крайних положениях, когда линия остается в зоне видимости только крайних датчиков, что нам и требовалось получить.

Подведем следующие выводы по разделу:

- аналоговые датчики линии и ПИД регулятор являются наиболее эффективным методом в управлении платформой, чем цифровые датчики и релейный регулятор;
- для устранения бликов следует располагать датчики под углом к полу;
- оптическая и геометрическая оси светодиодов совпадают;
- диапазон значений, снимаемых с датчиков, может уменьшаться вследствие различных факторов, и для предотвращения некорректной работы из-за уменьшения диапазона следует использовать функцию `map()`;
- расположение светодиодов и фотодиодов в один ряд является наиболее эффективным решением, чем расположение друг за другом.

5 Система безопасности на основе лидара

Еще одним важным вопросом является система безопасности автоматизированной мобильной платформы, исключающая ее столкновения с препятствиями и последующий выход из строя. В данной работе для создания системы безопасности будет использоваться лидар. О его преимуществах было подробно написано в разделе 2.3 данной работы.

5.1 Обзор и сравнение лидаров

Для сравнения было выбрано два лидара: RP Lidar A1, который изображен на рисунке 46, и YDLidar X2, который изображен на рисунке 47.



Рисунок 46 – RP Lidar A1



Рисунок 47 – YDLidar X2

Краткие технические характеристики RP Lidar A1 отображены в таблице 9 [27], а краткие технические характеристики YDLidar X2 отображены в таблице 10 [28].

Таблица 9 – Краткие технические характеристики RP Lidar A1

Максимальная дальность, м	12
Минимальная дальность, м	0,15
Скорость сканирования, Гц	5-10
Максимальная частота дискретизации, Гц	8000

Таблица 10 – Краткие технические характеристики YDLidar X2

Максимальная дальность, м	8
Минимальная дальность, м	0,1
Скорость сканирования, Гц	5-8
Максимальная частота дискретизации, Гц	3000

Изучив техническую документацию, и сравнив технические характеристики данных лидаров, был сделан выбор в пользу RP Lidar A1. По сравнению с YDLidar X2 у него больше максимальная дальность сканирования и скорость сканирования, а так же больше частота дискретизации. Еще одним немаловажным фактором является то, что производители RP Lidar A1 создали библиотеку для работы с лидаром на ардуино. Благодаря чему работать с ним в среде программирования Arduino IDE будет намного проще, чем с YDLidar X2.

5.2 Разработка алгоритма работы

Далее была написана программа для работы с лидаром, которая показана в приложении А. По алгоритму этой программы лидар сканирует пространство в заданном секторе, и передает данные о расстоянии до объектов в этом секторе на ардуино. Далее ардуино сравнивает полученные значения расстояния с заданными, и если значения оказываются меньше, то загорается светодиод на плате ардуино. На автоматизированной мобильной платформе вместо включения светодиода будет подаваться сигнал об остановке платформы. Значения сектора и заданного расстояния для отслеживания в этом секторе прописываются в массиве `int minDis []`. Каждое число в этом массиве обозначает сектор от 0 до 10 градусов, а значение самого числа обозначает дальность в миллиметрах, которую нужно проверять. Разберем на примере. Допустим, задан массив с двумя числами `int minDis [] = { 20, 30 }`. Первое число 20 означает, что если измеренное

лидаром расстояние в диапазоне от 0 до 10 градусов меньше 20, то нужно зажечь светодиод. Второе число 30 означает, что если измеренное лидаром расстояние уже в диапазоне от 10 до 20 градусов меньше 30, то нужно зажечь светодиод.

При исследовании работы лидара с помощью программы из приложения А было выявлено, что лидар работает корректно и видит препятствия в заданном ему диапазоне. Так же лидар корректно работает с зеркалом и любыми другими зеркальными поверхностями или предметами, определяя их как обычные предметы.

5.3 Проработка расположения лидара на платформе

Так же в ходе проработки встал вопрос о расположении лидара на автоматизированной мобильной платформе и о защите его от внешних факторов и воздействий, которые могут вывести его из строя.

Было два варианта расположения лидара:

- сверху платформы;
- спереди платформы.

Предпочтительным стал вариант расположения лидара спереди, так как сверху платформы планируется располагать груз или иное оборудование. Схематично расположение Лидара показано на рисунке 48.

Автоматизированная мобильная платформа предполагает свое использование не только на складах, но и в условиях различных цехов и производств, где на лидар могут попасть искры или различный мусор. Так же в воздухе может присутствовать мелкодисперсная пыль, которая в свою очередь способна осесть на оптику лидара, или забиться в электромотор, вращающий измерительную головку. Все это может значительно ухудшить работу лидара или полностью вывести его из строя. В таком случае требуется защитить лидар, полностью изолировав его от внешней среды.

В связи с этим было проведено исследование по работе лидара через прозрачные материалы. Для этого были выбраны две пластинки оргстекла толщиной 2 и 4 мм. В ходе исследования выяснилось, что лидар никак не реагирует на пластинки, работает корректно и видит препятствия сквозь них. Так же лидару не мешает небольшое запотевание оргстекла, в этом случае он тоже работает корректно и видит возникающие препятствия перед ним в пределах его зоны видимости.

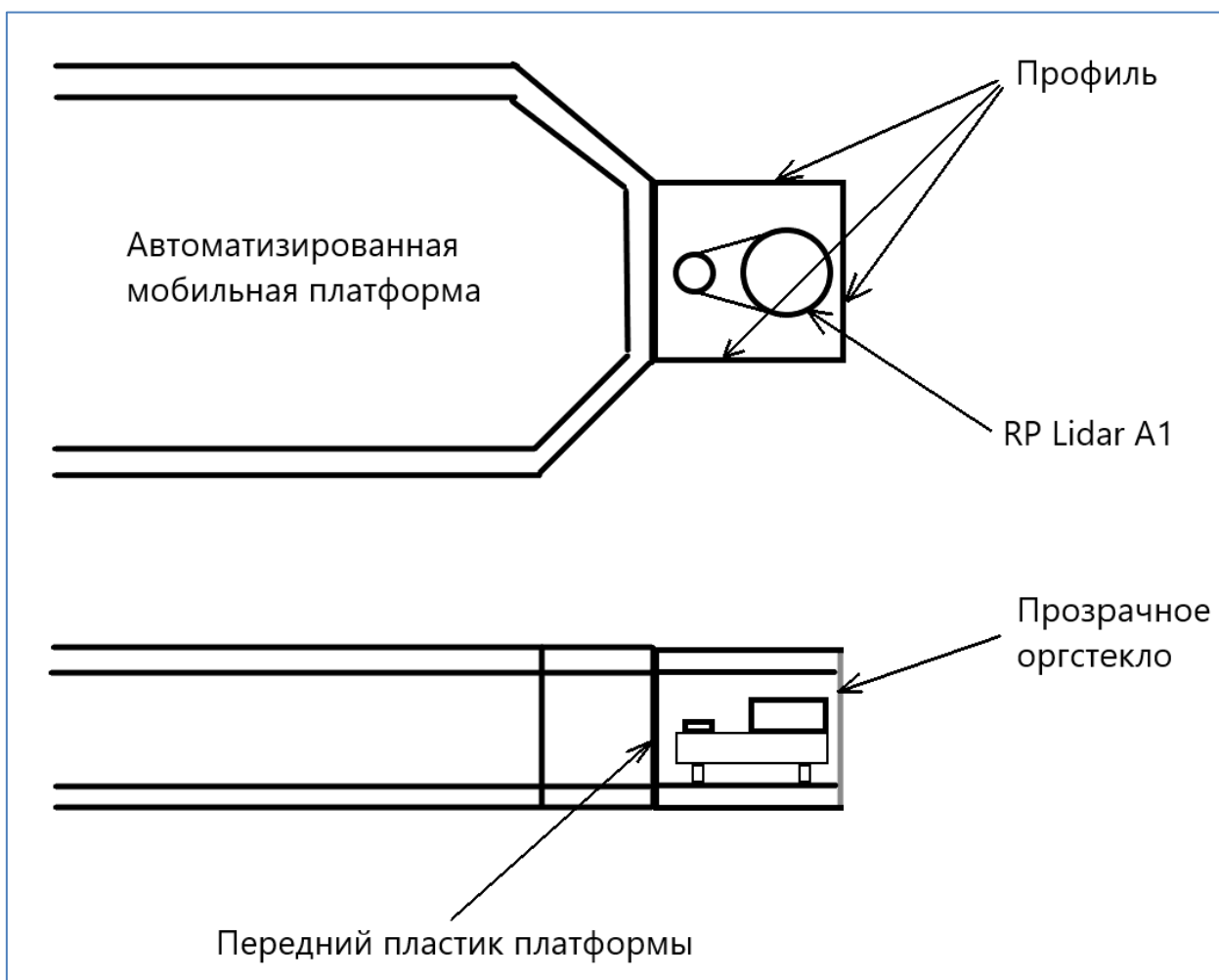


Рисунок 48 – Расположение лидара на платформе

Подведем следующие выводы по разделу:

- из двух лидаров RP Lidar A1 и YDLidar X2, был выбран RP Lidar A1 из-за его превосходящих над конкурентом технических характеристик, а так же из-за наличия библиотеки для работы в среде программирования Arduino IDE;
- лидар корректно работает вместе с платой ардуино по разработанной программе;
- лидар корректно работает через прозрачные материалы;
- лидар корректно работает с зеркальными материалами и поверхностями;
- при использовании лидара в условиях с агрессивными внешними факторами, такими как мелкодисперсная пыль и искры, требуется обязательная его защита с полным изолированием от окружающей среды.

Заключение

В данной работе была произведена оценка актуальности данной темы.

Был произведен обзор существующих решений различных роботов для склада и складской логистики, в ходе которого выяснилось, что роботы тележки или буксировщики являются самыми распространенными и востребованными в сфере складской логистики и производства.

Были рассмотрены различные датчики и их принципы работы. В ходе данного рассмотрения было выяснено, что система позиционирования автономной мобильной платформы на основе отслеживания черной линии с помощью инфракрасных аналоговых датчиков является наиболее простой, дешевой, но в тоже время надежной системой.

Далее было рассмотрено использование различного количества датчиков для отслеживания линии. В ходе рассмотрения было выяснено, что использование нескольких инфракрасных датчиков с каждой из сторон линии увеличивает угол обзора автономной мобильной платформы, что позволяет практически исключить риск возникновения схода с трассы. Это так же позволяет проходить крутые повороты и участки трассы на высокой скорости под большим радиусом, чем сам поворот, не теряя при этом трассу из виду.

Далее была произведена сборка, написание алгоритма программы и исследование системы позиционирования с помощью шести датчиков линии. Было выяснено, что расположение светодиодов и фотодиодов датчиков в один ряд является наиболее удачным расположением. Так же был написан и исследован алгоритм пересчета значений с датчиков и ошибки, подаваемой на ПИД регулятор.

Далее была произведена сборка, написание алгоритма программы и исследование системы безопасности с помощью лидара. Лидар в системе безопасности автономной мобильной платформы надежно защищает ее от столкновения с препятствиями, возникающими у нее на пути. В дальнейшем лидар также можно использовать и для системы позиционирования.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Автоматизация складов с помощью роботов [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/warehouse-and-logistics-robots-review.html> (дата обращения: 07.05.2022)
2. Аналоговые входы [Электронный ресурс]. URL: <https://arduino.ru/Tutorial/AnalogInputPins> (дата обращения: 01.09.2021)
3. Как превратить обычный склад в предприятие «умного» хранения [Электронный ресурс]. URL: https://www.equipnet.ru/org-biz/torgovlya/torgovlya_330.html (дата обращения: 26.08.2021)
4. Каплина М.С. Разработка алгоритма поиска выхода из лабиринта // Наука, Образование, Инновации: Пути развития, 2015, с. 135- 139.
5. Курсовые датчики (датчики направления) [Электронный ресурс]. URL: https://bstudy.net/940129/tehnika/kursovye_datchiki_datchiki_napravleniya (дата обращения: 09.10.2020)
6. Оптопара принцип работы [Электронный ресурс]. URL: <https://principraboty.ru/optopara-princip-raboty-optrony-princip-raboty/> (дата обращения: 05.05.2021)
7. Основы машинного зрения - Control Engineering Russia [Электронный ресурс]. URL: <https://controlengrussia.com/tehnicheskoe-zrenie/osnovy-mashinnogo-zrenija/> (дата обращения: 30.01.2022)
8. ПИД регулятор [Электронный ресурс]. URL: <https://alexgyver.ru/lessons/pid/> (дата обращения: 13.06.2022)
9. Роботы-паллетайзеры | ЭлеМаш [Электронный ресурс]. URL: <https://elemash-m.ru/production/roboty-palletayzery> (дата обращения: 18.07.2021)
10. Складские роботы учатся сортировать грузы: опыт инженеров из компании Covariant по применению ИИ для задач складской сортировки [Электронный ресурс]. URL: <https://integral-russia.ru/2020/07/21/skladskie-roboty-uchatsya-sortirovat-gruzu-opyt-inzhenerov-iz-kompanii-covariant-po->

- primeneniyu-ii-dlya-zadach-skladskoj-sortirovki/ (дата обращения: 10.12.2020)
11. Справочник языка Ардуино [Электронный ресурс]. URL: <http://arduino.ru/Reference> (дата обращения: 17.06.2022)
 12. AGV тележка: автоматически управляемые тележки, роботы туннельного типа [Электронный ресурс]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/agv-amr-robots-review.html> (дата обращения: 15.04.2021)
 13. Renault Россия поставила первые беспилотные ТС для промпроизводства - КОЛЕСА.ру – автомобильный журнал [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kolesa.ru/news/renault-rossiya-postavila-pervye-bespilotnye-ts-dlya-promproizvodstva> (дата обращения: 01.02.2022)
 14. AI Startup Covariant.ai Building ‘Universal AI for Robots’ | by Synced | SyncedReview | Medium [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/syncedreview/ai-startup-covariant-ai-building-universal-ai-for-robots-ee0aa4e118d5> (дата обращения: 14.02.2020)
 15. Applications of drones in warehouse operations [Электронный ресурс]. URL: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/pom-dam/documents/Drones%20in%20warehouse%20operations_POM%20whitepaper%202019_Final.pdf (дата обращения: 14.03.2022)
 16. Applications of LIDAR Technology [Электронный ресурс]. URL: <https://wethegeek.com/applications-of-lidar-technology/> (дата обращения: 29.11.2020)
 17. Autonomous Drones for Warehouse Inventory [Электронный ресурс]. URL: <https://flytware.com/> (дата обращения: 19.04.2022)
 18. Drones in Warehousing: Then , Now & Future Technologies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scmdojo.com/drones-in-warehousing/> (дата обращения: 25.05.2018)
 19. Enhanced Sensor for Guiding Robotic Vehicles Along Magnetic Tracks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.therobotreport.com/enhanced-sensor-guiding-robotic-vehicles-along-magnetic-tracks/> (дата обращения: 13.02.2022)

20. How to Program a Line Following Robot [Электронный ресурс]. URL: <https://robotresearchlab.com/2019/02/12/how-to-program-a-line-following-robot/> (дата обращения: 08.06.2021)
21. IR Line Sensors - Code: Robotics [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.idew.org/code-robotics/references/physical-inputs/ir-line-sensors> (дата обращения: 07.05.2022)
22. IR Sensor : Circuit, Types, Working Principle & Its Applications [Электронный ресурс]. URL: <https://www.watelectronics.com/ir-sensor/> (дата обращения: 17.03.2022)
23. IR sensor Working Principle and Applications | Robu.in [Электронный ресурс]. URL: <https://robu.in/ir-sensor-working/> (дата обращения: 05.12.2021)
24. Line Tracking Robotic Vehicle [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ijsr.net/archive/v6i11/ART20178007.pdf> (дата обращения: 11.11.2020)
25. Robot Navigation Roundup: Tracking/Depth Cameras, SLAM SDKs, Accelerators, and Cloud Navigation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/news/robot-navigation-roundup-tracking-depth-cameras-slam-sdk-cloud-navigation/> (дата обращения: 28.06.2021)
26. Robot Navigation using Stereo Vision [Электронный ресурс]. URL: <https://boredomprojects.net/index.php/projects/robot-navigation-using-stereo-vision> (дата обращения: 15.09.2021)
27. RPLIDAR-A1 360°Laser Range Scanner _ Domestic Laser Range Scanner|SLAMTEC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.slamtec.com/en/Lidar/A1> (дата обращения: 21.01.2021)
28. YDLIDAR X2_YDLIDAR|Focus on lidar sensor solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ydlidar.com/products/view/6.html> (дата обращения: 21.05.2022)
29. What is LiDAR and How does it Work? [Электронный ресурс]. URL: <https://circuitdigest.com/article/what-is-lidar-and-how-does-lidar-works>

(дата обращения: 01.10.2020)

30. 4 types of autonomous mobile robots, and their warehouse use cases [Электронный ресурс]. URL: <https://www.supplychaindive.com/news/4-types-of-autonomous-mobile-robots-and-their-warehouse-use-cases/529548/> (дата обращения: 11.05.2022)

Приложение А
Программа для работы с Лидаром

```
#include <RPLidar.h>

// You need to create an driver instance
RPLidar lidar;

#define RPLIDAR_MOTOR 3 // The PWM pin for control the speed of
RPLIDAR's motor.

// This pin should connected with the RPLIDAR's MOTOCTRL signal
////////////////////////////////////

float minDistance = 100000;
float angleAtMinDist = 0;
float distance = 0;
float angle = 0;
bool newScan = 0; //1 означает прохождение нулевого угла (начало
нового круга сканирования)
bool GO = 0; //1 означает отсутствие препятствий вблизи (возможность
ехать)
//минимально допустимая дистанция в см. первое число - для угла от 0
до 10 градусов, 2e - от 10 до 20 и т.д. до 360. 0-не отслеживается
int minDis [] = {20, 20, 20, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 20, 20, 20};

void setup() {
// bind the RPLIDAR driver to the arduino hardware serial
lidar.begin(Serial);
// Serial.begin(115200);
```

Продолжение Приложения А

```
// set pin modes
pinMode(RPLIDAR_MOTOR, OUTPUT);
pinMode(13, OUTPUT);
}

//float minDistance = 100000;
//float angleAtMinDist = 0;

void loop() {

  if (IS_OK(lidar.waitPoint())) {
    //perform data processing here...
    distance = lidar.getCurrentPoint().distance;
    angle = lidar.getCurrentPoint().angle;

    if (lidar.getCurrentPoint().startBit) {
      // a new scan, display the previous data...
      minDistance = 100000;
      angleAtMinDist = 0;
      newScan = 1;
    } else {
      if ( distance > 0 && distance < minDistance) {
        minDistance = distance;
        angleAtMinDist = angle;
      }
    }
  } else {
    analogWrite(RPLIDAR_MOTOR, 0); //stop the rplidar motor
  }
}
```


Продолжение Приложения А

```
// try to detect RPLIDAR...
rplidar_response_device_info_t info;
if (IS_OK(lidar.getDeviceInfo(info, 100))) {
    //detected...
    lidar.startScan();
    analogWrite(RPLIDAR_MOTOR, 255);
    delay(1000);
}
}

if (newScan) {
    if (GO) digitalWrite(13, LOW); //можно ехать
    GO = 1;
    newScan = 0;
}

byte N = angle / 10; //присвоение произойдет целочисленно с
обрасыванием дробной части
if (distance > 0) {
    if ((distance / 10) < minDist[N]) { // /10 это перевод мм в см
        digitalWrite(13, HIGH); //нельзя ехать
        GO = 0;
    }
}
}
}
```