



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

ФАКУЛЬТЕТ

ИУ «Информатика и системы управления»

КАФЕДРА

ИУ-1 «Системы автоматического управления»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

на тему:

*Разработка колесного шасси
и системы обеспечения прямолинейного
движения*

Студент ИУ1-72
(Группа)

30/12/2020
(Подпись, дата)

А. А. Кочнов
(И.О. Фамилия)

Руководитель

30/12/2020
(Подпись, дата)

Н. А. Чулин
(И.О. Фамилия)

2020 г.

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ИУ-1
(Индекс)

К.А. Неусыпин
(И.О. Фамилия)

« 11 » сентября 20 20 г.

**З А Д А Н И Е
на выполнение научно-исследовательской работы**

по теме Разработка колесного шасси и системы обеспечения
прямолинейного его движения

Студент группы ИУ1-72
Кочнов Андрей Александрович

(Фамилия, имя, отчество)

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

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) НИР

График выполнения НИР: 25% к н., 50% к н., 75% к н., 100% к н.

Техническое задание
Разработать и собрать подвижное мобильное моторизированное шасси мобильного робота.
Получить математическую модель шасси. Разработать и реализовать алгоритм
прямолинейного движения с сохранением заданного направления.

Оформление научно-исследовательской работы:

Расчетно-пояснительная записка на 29 листах формата А4.
Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)
оформление графического материала в НИР не предусмотрено

Дата выдачи задания « 11 » сентября 20 20 г.

Руководитель НИР 11/09/2020
(Подпись, дата) Н.А. Чулин
(И.О. Фамилия)

Студент 11/09/2020
(Подпись, дата) А.А. Кочнов
(И.О. Фамилия)

Содержание

Вступление	4
Основная часть	5
1. Постановка задачи	5
2. Практическая часть	7
2.1. Создание шасси	7
2.2. Разработка прошивки	13
2.3. Разработка управляющего терминала	18
2.4. Определение параметров движения робота	20
2.5. Получение и подготовка сигнала скорости по данным тахометра	22
Заключение	27
Список использованных источников	29

Вступление

Системы автоматического управления используются повсеместно. Основная их задача - поддерживать состояние системы в соответствии с некоторыми требованиями - движение по заданной траектории, поддержание температуры и т.д.

Одна из причин, почему контролируемая система начинает со временем не соответствовать заданным условиям - это различные внешние воздействия. Например, окружающая среда может похолодать, из-за чего автоматическая печь начнет остывать быстрее. Или беспилотник начнет сносить в сторону боковой ветер. Кроме того, стабильности состояния может помешать несовершенство механизма, который управляется. Люфт в механических передачах, неодинаковые параметры двигателей и т.д.

Для решения проблемы в систему управления вводится обратная связь и некоторый регулятор, чтобы компенсировать влияние помех. Поэтому ставятся задачи как чисто аналитического плана - синтез регулятора, так и технического - разработка удачного ПО для непосредственного управления электромеханическими частями объекта, измерение необходимых параметров среды и состояния системы, предварительная обработка и очистка сигнала, чтобы сделать его пригодным для анализа.

В данной НИР мы начинаем подготовительную работу для анализа работы и влияния различных методов и приемов компенсации помех в работе подвижных объектов. Так как максимально продуктивным будет изучение на практике, необходимо разработать подвижную мобильную платформу, способную перемещаться в пространстве в соответствии с заданными командами, а также собирать и обрабатывать информацию о своем состоянии. Выбран наземный вариант с перемещением в 2D-пространстве как наиболее простой вариант, упрощающий реализацию но не основные принципы и идеи.

Исходный код проекта можно найти на портале Github:
github.com/tamerlanchik/RoboCar.

Основная часть

1. Постановка задачи

Как уже было указано, главной итоговой целью является отработка методов борьбы с помехами при управлении летательным аппаратом. Так как принципы, работающие с летательными аппаратами, такие же, как и для любых других устройств, решено отрабатывать и тестировать на подвижной колесной платформе мобильного робота как на более дешёвой и простой замене летательного аппарата. Кроме того, целию ставится более глубокое изучение базовых методов управление на практике.

Вообще, коррекция отклонений от желаемой фазовой траектории - одна из основных задач управления. Компенсация внешних воздействий - ветер, неровности поверхности, изменение температуры, и внутренних - неидеальность конструкции, неучтенные особенности механизма и тд - может производиться целым спектром различных методов. В классическом подходе сначала производится анализ физики системы. Составляется система дифференциальных уравнений, описывающая поведение объекта. Затем выбирается вектор переменных состояния и составляется представление системы в этом пространстве. Затем система управления дополняется обратной связью - без неё невозможно корректировать фазовую траекторию при наличие неизвестных возмущений - и регулятором.

Наиболее универсальный метод - применение одного из большого семейства ПИД-регуляторов. Структурная схема общего случая такого регулятора представлена на рис.1. Для работы такого регулятора необходимо вычисление производной и интеграла от наблюдаемой величины в реальном времени. Например, возможно применить такой регулятор для коррекции отклонения подвижного колесного шасси о прямой траектории - достаточно следить за разницей между реальными скоростями вращения пары колёс (при условии отсутствия проскальзывания) или угловой скоростью шасси, которая в этом случае должна быть нулевой. Тогда производной

от такого сигнала будет ускорение (линейное либо угловое), а интегралом - накопленная разница в пройденном расстоянии либо угол поворота от заданного направления.

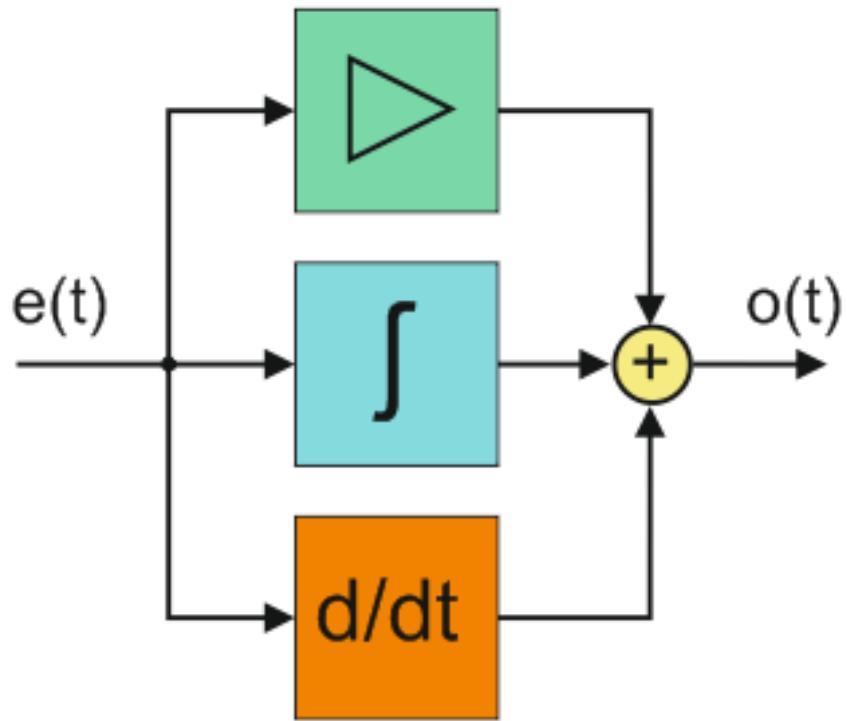


Рисунок 1 – Структурная схема ПИД-регулятора

Существуют и другие методы, которые будут рассмотрены и сравнены в следующей работе.

Как было указано выше, для построения управления классическими методами необходимо составить математическую модель объекта управления. Так как ресурсы ограничены, невозможно сразу точно знать, какая конструкция в итоге получится наиболее удачной, а также какие параметры движения удастся наиболее точно измерять, предлагается вначале создать непосредственно управляемый объект, прописать для него основную программную прослойку, позволяющую затем абстрагироваться от механических и программных подробностей объекта и сконцентрироваться на управлении. Займёмся этим в следующем разделе.

2. Практическая часть

Основная задача на НИР этого семестра - создание платформы для отработки приемов и методов управления. Процесс можно разделить на несколько частей - сборка механической части, разработка ПО для микроконтроллера и разработка подобия управляющего терминала.

2.1. Создание шасси

В основе подвижного мобильного шасси лежит готовый комплект. Пример представлен на рис. 2. Он включает в себя пластиковую основу, стойки-крепления, электрические двигатели постоянного тока с пластико-выми редукторами, колёса с прорезиненным протектором (который, тем не менее, довольно хорошо скользит) и дисками для тахометров.

Как видно из фотографии, оригинальный комплект подразумевает наличие четырёх ведущих колёс. Однако, как выяснилось в тестах, колеса начинают прокальзывать, что вкупе с довольно неоднородными реальными характеристиками двигателей превращало процесс движения шасси в довольно стохастический процесс. Поэтому решено было оставить лишь два задних колеса, а для сохранения баланса поставить вперёд ведомое колесо-подставку, которое дополнительно легко вращается вокруг вертикальной оси, не препятствуя движению объекта. Заметим, что массивные батареи также находятся сзади, что обеспечит колёсам хорошее сцепление с поверхностью.

Комплект хороший, но этого недостаточно для поставленных задач. Далее шасси необходимо дополнить электронными компонентами.

Во-первых, необходим микроконтроллер. Рассматривались несколько вариантов:

- Arduino (контроллеры семейства AVR серии ATmega, кроме Due)
 - Uno (ATmega328 16 МГц, Flash 32Кб, RAM 2Кб, 14 IO pins)

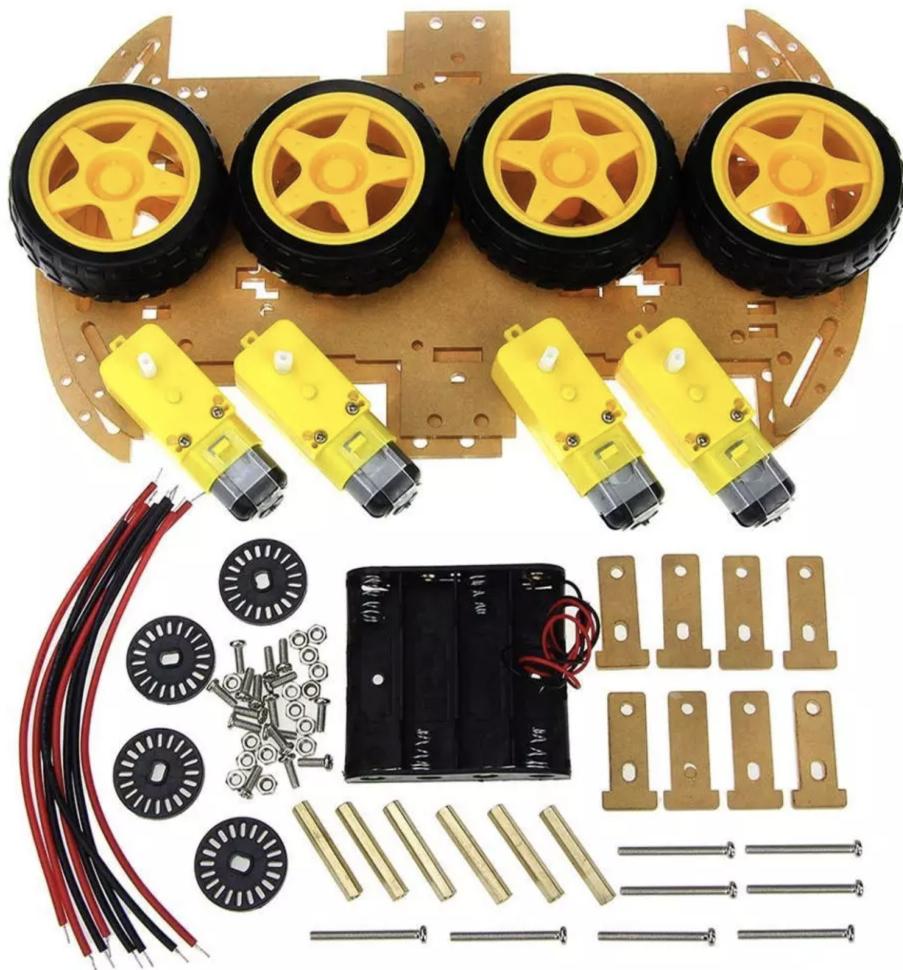


Рисунок 2 — Основа шасси в разобранном виде

- Mega 2560 (ATmega2560 16 МГц, Flash 256 Кб, RAM 8 Кб, 54 IO pins)
- Due (ARM AT91SAM3X8E 84 МГц, Flash 512 КБ, RAM 96 КБ, 54 IO pins)
- Pro mini (ATmega328 16 МГц, Flash 32 Кб, RAM 2 Кб, 14 IO pins)
- STM32 (контроллеры семейства ARM)
 - STM32F103C8T6 "Blue Pill" (Cortex M3 72Мгц, Flash 64Кб, RAM 32Кб 37 IP pins)

Наиболее популярный вариант - Arduino Uno. Обладает мощностями, до-

статочными для решения задачи на начальном этапе, однако имеет достаточно большие размеры и некоторые излишества, которые хороши для обучения работы с микроконтроллерами, но не нужны в готовом устройстве. STM32 куда мощнее и быстрее, компактна и вообще хороша во всём, кроме фреймфорков. Существуют удобные готовые подобия RTOS (ОС реального времени), однако они довольно большие и занимают почти всю доступную память данного контроллера начального уровня. Библиотеки более низкого уровня сложных требуют слишком много времени на освоение, что не предполагается в данной задаче.

Итого, была выбрана плата Arduino Pro Mini, представленная на рис.3

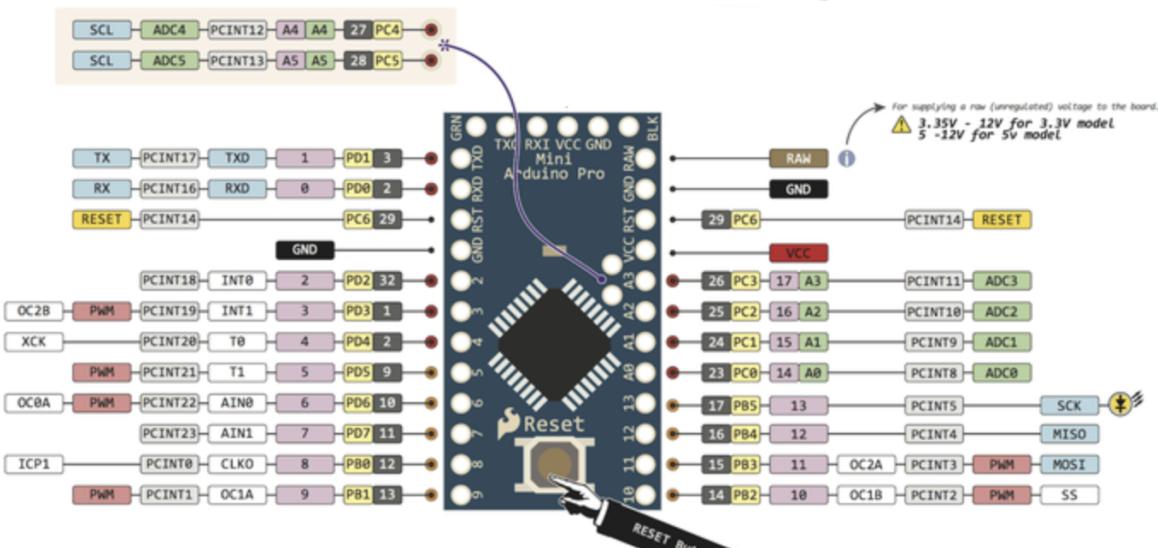


Рисунок 3 — Arduino Pro mini со схемой распиновки

Основа любого мобильного шасси - это двигатели. В данной сборке их два - на каждое колесо. Чтобы управлять направлением движения, необходимо менять полярность подключения к источнику питания. Чтобы управлять скоростью (и усилием) вращения, используется ШИМ-сигнал. Так как для двигателей необходимо высокое напряжение (7..8 В), большее, чем требует контроллер (3.3 В), а также большой ток, двигатели подключаются к так называемому драйверу электродвигателей. Он основан на Н-мосте, который позволяет менять полярность подключения, а также транзисторных

ключах, которые на основе ШИМ-сигнала малого напряжения модулируют рабочее напряжение. В данной сборке использован драйвер на базе микросхемы L298N, имеющий ровно два независимых канала. Представлен на рис.4.

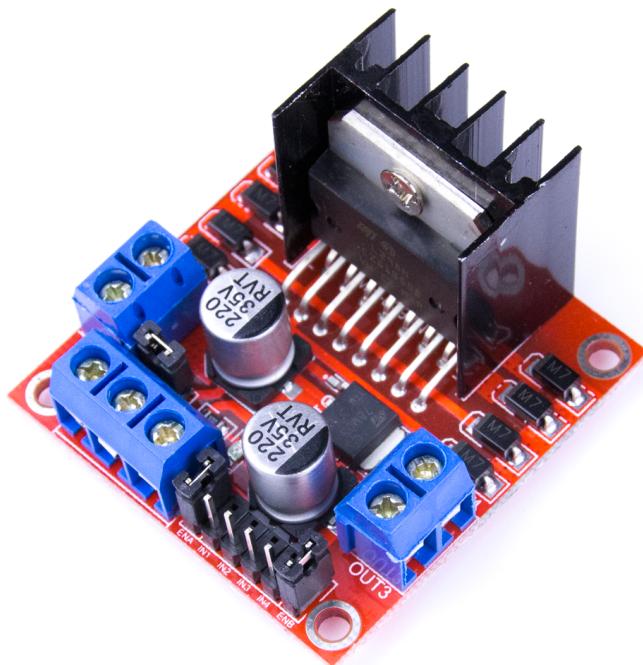


Рисунок 4 — Драйвер электродвигателей L298N

Для определения состояния шасси для обеспечения обратной связи необходимы датчики. Так как мы рассматриваем процесс движения, необходимо получать данные о пройденном пути, текущей скорости объекта (как линейной, так и угловой), ускорения.

Для контроля работы двигательной подсистемы будем использовать оптические тахометры. Принцип действия использованных оптических тахометров заключается в реакции на каждое прохождение препятствия между светодиодом и оптическим приемником. Зная момент прохождения и количество щелей в диске, можно довольно точно вычислять суммарный угол поворота колеса. Проводя численное дифференцирование, можно получать угловые скорости (и даже угловые ускорения) вращения каждого из колес. В итоге можно узнавать общую угловую (и линейную) теорети-

ческие скорость шасси, откуда компенсировать различия в параметрах (а следовательно, и в реальной скорости вращения) двигателей, обеспечивая прямолинейное движение. Приведён на рис.??fig:encoder).

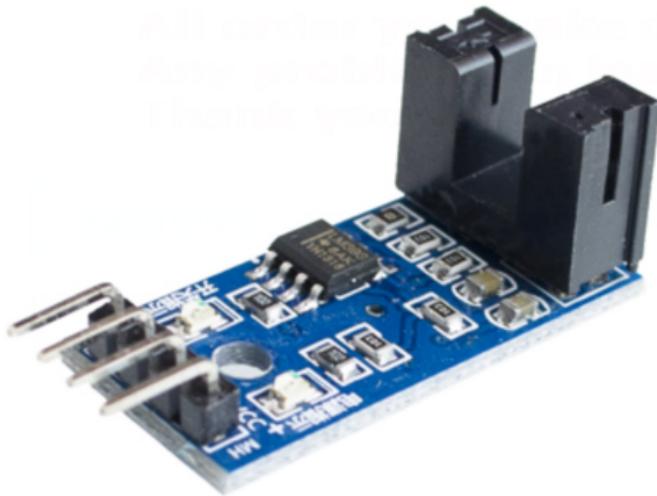


Рисунок 5 – Оптический тахометр (энкодер)

Теоретические скорости - хорошая вещь. Но она получается в предположении что колеса идеально сцепляются с поверхностью без проскальзывания, а шасси не подвергаются внешним воздействиям и не упирается в препятствия. Для получения данных о реальном состоянии движения используем связку гироскоп-акселерометр. Простейшие варианты поставляются в виде объединенной платы, которая отличается не только весьма удовлетворительной точностью, но и сверхнизкой стоимостью. Пример представлен на рис.6.

Дополнительно можно использовать электронный датчик магнитного поля. Вкупе модулем выше можно реализовать электронный компас, с помощью которого измерять абсолютный угол поворота робота. Однако он подвержен помехам от двигателей, а также довольно сложен в реализации, поэтому в данной версии не использовался. Выглядит очень схоже с платой гироскопа. Кроме того, в роботы такого типа также ставятся ультразвуковые/инфракрасные датчики расстояния или даже лидары. Однако в



Рисунок 6 — Гироскоп-акселерометр GY-521 (MPU-6050)

данной работе ставится задача лишь контроля траектории шасси, поэтому эти устройства также не используются.

По заданию необходимо задавать роботу направление движения извне. Так как шасси подвижное, необходима беспроводная связь. Рассматривалось и тестировалось несколько вариантов. Сначала предполагалось использование передатчика nRF24l01, позволяющего держать связь до 50м на открытом пространстве. В этом случае команды не должны теряться в пределах помещения и доходить быстро и надежно. Однако цепочка шасси <-радио-> приемник <-USB-> терминал оказалась довольно сложной. Поэтому исходя из предположения небольших размеров помещения для тестирования шасси использован простой bluetooth-передатчик, держащий связь непосредственно с терминалом.

Терминал изначально предполагался физический. Однако имеющиеся джойстики не предполагали высокого качества и точности выдаваемого сигнала, поэтому эта идея была пропущена.

Дополнительно для схемы использовался понижающий преобразова-

тель напряжения для получения напряжения 5В для микроконтроллера и датчиков, Li-Ion батареи типоразмера 18650 и автономного вольтметра для визуального контроля состояния батарей.

Итоговый вариант сборки представлен на рис. 7, 8, 9.

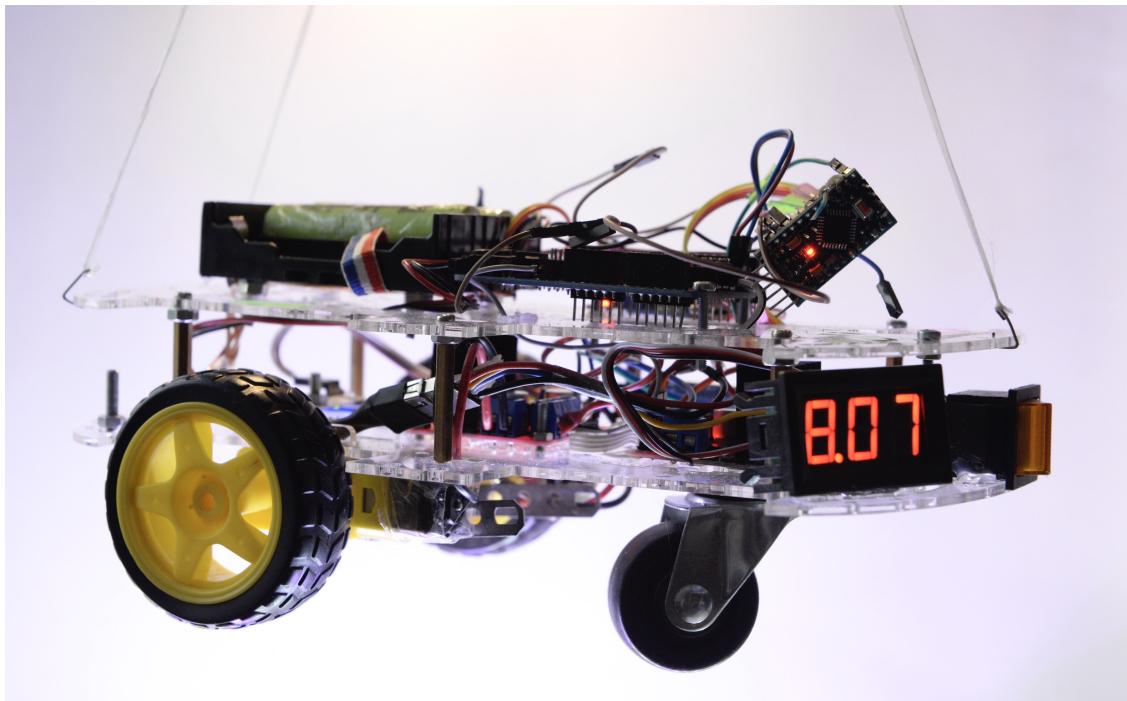


Рисунок 7 — Итоговый вид мобильного робота (вид справа)

2.2. Разработка прошивки

Второй важной частью разработки робота является написание ПО для микроконтроллера - прошивки. Она отвечает за обмен данными с командным терминалом, расчет и подачу управляющих сигналов на двигатели, считывание данных с сенсоров и расчет параметров движения для дальнейшей коррекции.

Так как разработка ведется под микроконтроллер Arduino, очевидным решением является использование фирменного фреймворка, представляющего упрощенный и удобный интерфейс для взаимодействия с железной составляющей проекта. Это вообще позволяет быстро писать короткие и лаконичные скрипты.

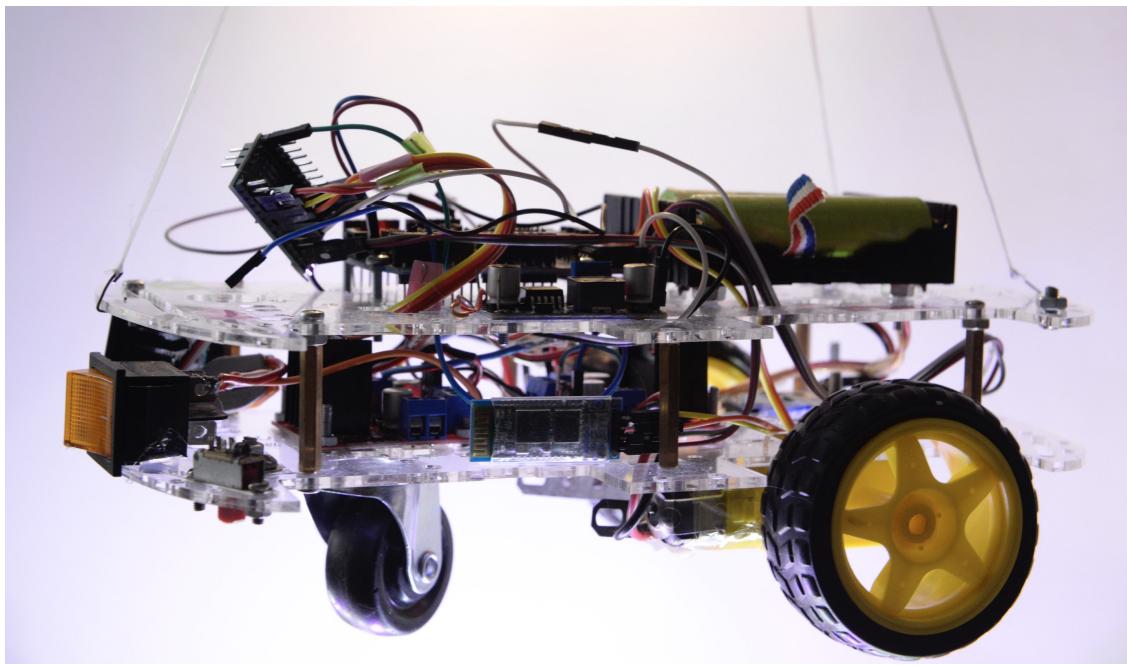


Рисунок 8 — Итоговый вид мобильного робота (вид слева)

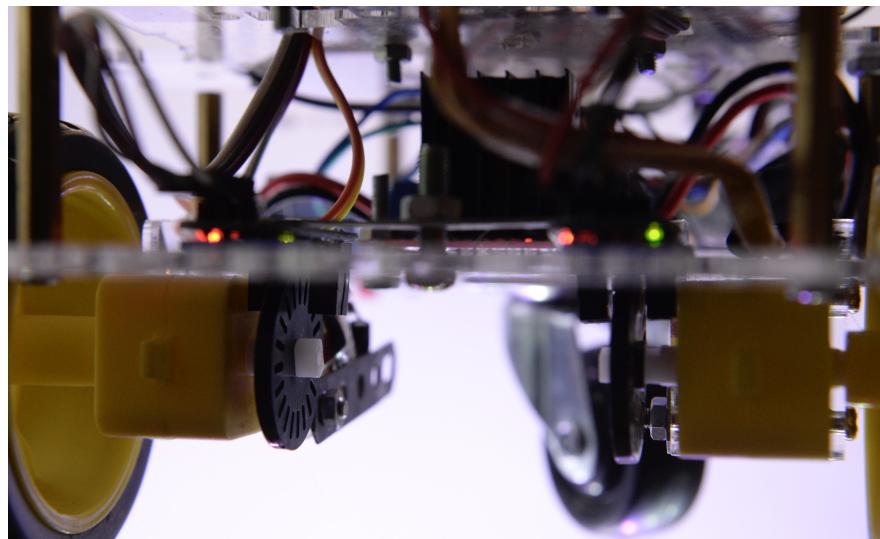


Рисунок 9 — Вид на движущую часть и тахометры

Однако прошлый опыт работы с такими проектами показал, что отлаживать работу программы на реальном роботе довольно сложно, трудоёмко и долго. Кроме того, было желание разработать универсальную основу, в которую в дальнейшем будет легко вносить дополнительную функциональность. Поэтому решено было пойти сложным путём.

Для решения проблемы тестирования существует несколько вариан-

тов. Первый - использовать встроенные возможности тестирования системы программирования контроллеров PlatformIO. Она решает проблему регрессионного тестирования - полной проверки старого функционала продукта после новых изменений. Однако это не решало проблему абстрагирования от оборудования (а это важно, если сбои могут быть именно в оборудовании, а не в коде, или же необходима дополнительная информация о работе программы, которую не получить с железного устройства). Поэтому решено было пойти путём, который применяется в реальных продуктовых разработках программного обеспечения - создание копий функций библиотеки Arduino, которые не используют реальное оборудование, а фиксируют факт вызова и возвращают заранее заданный результат. Процесс называется автоматическим тестированием, а замены - мок-функциями (от англ. "mock шутка, насмешка"). В таком случае становится довольно просто создавать автоматические тесты, которые проверяют правильность работы программы. Для эмуляции Arduino-вызовов использовалась Open-Source библиотека ArduinoFake на основе google-test фреймфорка.

Так как в проекте предполагается несколько задач (обмен данными с терминалом, управление двигателями, считывание данных тахометров и тд), возникает вопрос обеспечения многозадачности. Микроконтроллеры такого класса как правило однопоточны. А стандартный фреймворк Arduino не предлагает никаких решений этого вопроса, потому что предполагает лишь простые проекты. Поэтому использовалась сторонняя библиотека LeOS2. Очевидно, что это никакая не ОС, но обеспечение многозадачности - одна из их задач, поэтому название объяснимо. Эта библиотека работает на основе сторожевого таймера микроконтроллера (в отличие от первой версии, которая использует один из таймеров ШИМ). Раз в 16 миллисекунд таймер срабатывает и вызывает прерывание, которое перехватывается библиотекой, после чего по порядку запускается выполнение тех заранее заданных функций ("задач"), которые должны сработать в этот момент времени. Очевидно, что интервал исполнения задач должен быть

кратен 16 миллисекундам. Использование библиотеки с поддержкой псевдомногозадачности позволило упростить основной сценарий работы программы и чётче разделить подзадачи. Так как библиотека работает с аппаратным таймером в обход фреймворка Arduino, для неё также была создана мок-версия.

Таким образом, удалось полностью отвязать разработку основного программного кода от железной составляющей. Очевидно, это потребовало много дополнительных усилий, однако уже на данном этапе это оказалось очень полезно при разработке и сэкономило часть затраченного времени.

Для решения вопроса универсальности основы разработана компонентная структура программы на основе классов языка C++, используемого при разработке. UML-диаграмма представлена на рис.10. Частично применена идея MVC-архитектуры (модель-контроллер-интерфейс).

Центральным модулем является Controller. Он отвечает за инициализацию и сбор воедино всех компонентов. Model отвечает за хранение данных о состоянии шасси (в идеале должно и вычислять, но на данный момент этим занимается Controller). Chassis принимает на вход требуемые параметры движения двигателей (в различных шкалах), преобразует в необходимый вид и подает на двигатели.

Tachometr отвечает за обработку аппаратных прерываний на проход щели мимо детектора и вычисление пройденного расстояния и текущей скорости. Данные хранятся в зацикленном буфере CircularBuffer. Из-за особенностей языка и требований к обработчикам аппаратных прерываний возникла необходимость в создании статического хранилища данных StaticStorage, агрегирующий данные, необходимые для работы обработчика прерывания и расчета скоростей и расстояний.

Для связи разработана система классов. Основная идея - абстрагировать работу с обменом данных до единого интерфейса. Сейчас его реализует только класс для работы с Serial-протоколом, но в дальнейшем не исключается возможность работы с передатчиками, такими как nRF24l01.

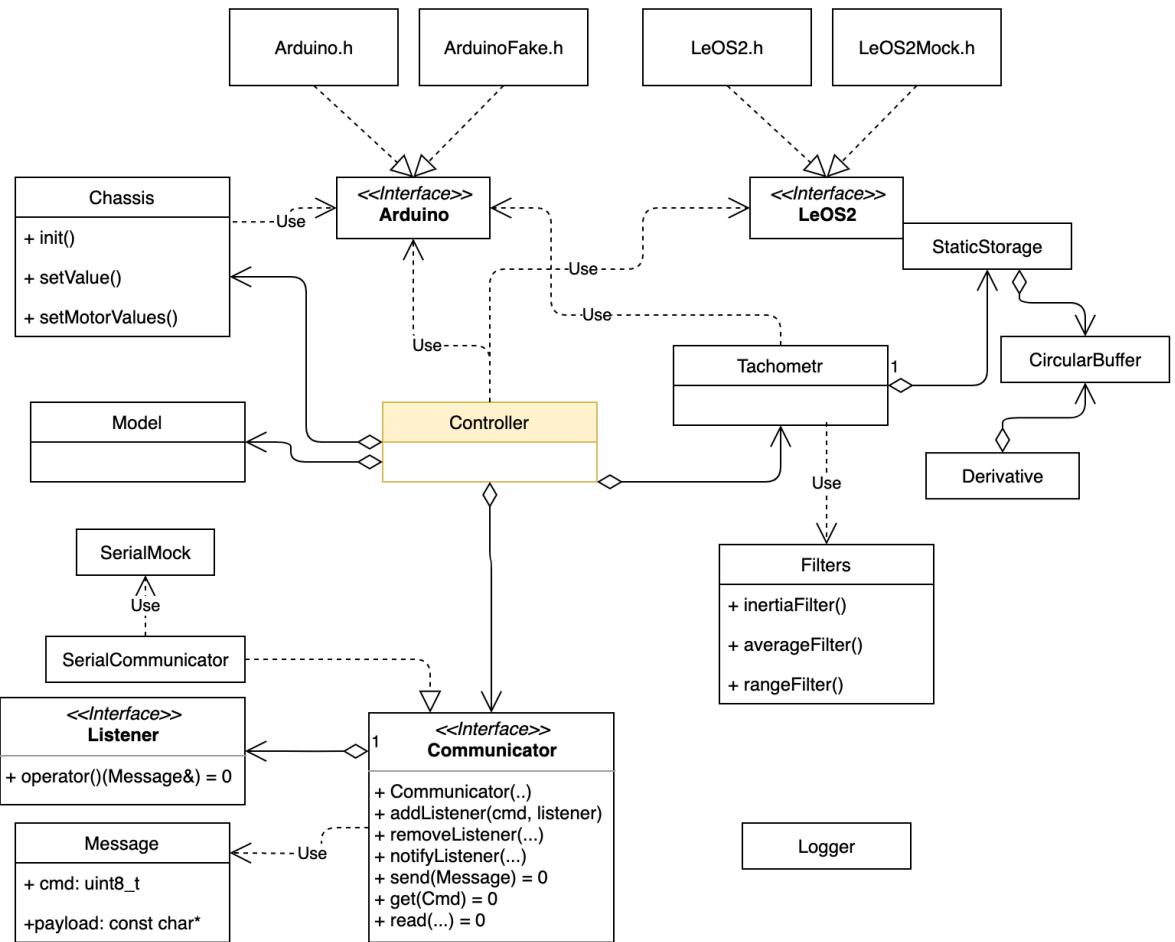


Рисунок 10 — UML-диаграмма блоков прошивки

Как видно из схемы, для `SerialCommunicator` сделана мок-эмуляция `Serial`-подбиблиотеки Адуино. Благодаря использованию интерфейса основной код не нужно будет менять. Кроме того, применен паттерн "Слушатель". Основная идея следующая. При инициализации системы регистрируются несколько типов команд со своими кодами (например, для подачи управления, для обновления конфигурации, для подачи звукового сигнала, поворота камеры и т.д.). Для каждой команды регистрируются один или несколько "слушателей" - функций, которые должны обработать новое сообщение такого типа, когда оно придет извне. Слушателей можно добавлять, удалять, вызывать. Для создания своего слушателя достаточно наследовать интерфейс `Listener` и реализовать функцию `operator()`.

Реализована поддержка динамической конфигурации. Константы, которые могут быть изменены без перезагрузки системы - изменяемы. Достаточно прислать с терминала команду с названием переменной и новым значением. Например, можно изменять константы в фильтрах, включать/отключать некоторые и сразу же наблюдать изменение поведения шасси.

В главном скрипте инициализируется сам контроллер и запускаются несколько задач:

- проверка "почты" наличия данных во входном serial-буфере. Если данные есть - вызываем всех слушателей на эти данные;
- расчет текущих скорости и ускорения по данным тахометра;
- заготовка для регулятора - коррекции траектории,

а также несколько входящих команд:

- получения нового значения желаемого направления движения
- получение нового значения желаемой скорость движения
- обновление конфигурационных параметров
- "ping" ответ на проверочное значение от терминала (жив ли робот).

Работа с гироскопом и акселерометром на данный момент не реализована.

2.3. Разработка управляющего терминала

По условиям задачи робот должен сохранять заданное направление движения. Значит, необходим некий внешний терминал, который способен принимать команды от оператора, отправлять на аппарат и отображать ответ, если таковой предусмотрен.

Наиболее простой вариант - коммуникация через Serial-подобный интерфейс, который затем пересыпает данные поверх Bluetooth. Существует множество Serial-терминалов, к которым можно подсоединить Bluetooth, а также таких, которые разработаны непосредственно для беспроводной коммуникации. В таком интерфейсе, несомненно, возможно задавать направление. Однако задание направления - не единственная функция, то команды становятся довольно длинными, и набирать их в командной строке довольно неудобно. Кроме того, шасси подвижные, и во избежание столкновения с препятствиями необходимо уметь быстро останавливать машину и изменять направление движения. Другими словами, нужен пульт управления, подобный таковым у радиоуправляемых машин.

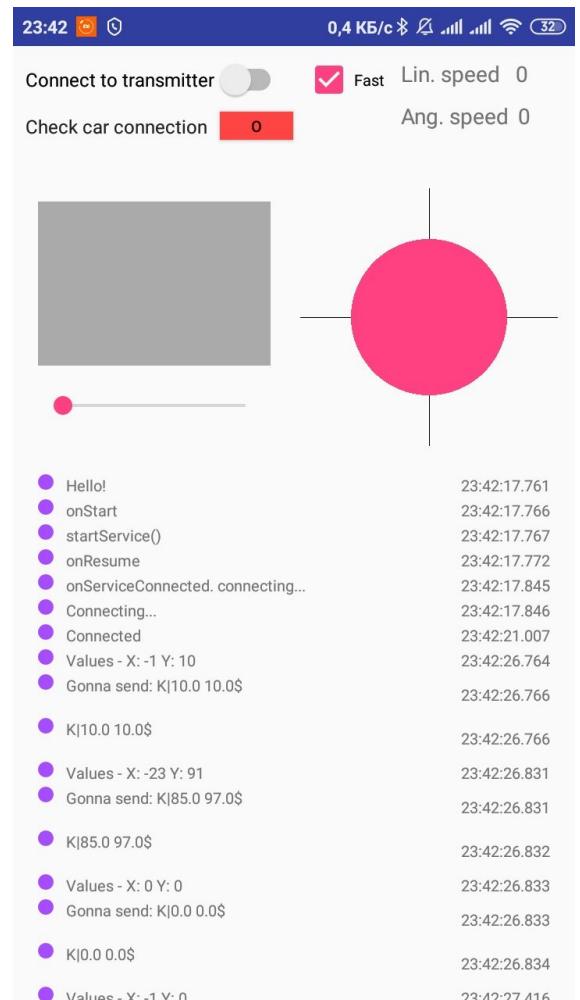
Базовая идея - сделать такой пульт физическим, из имеющихся компонентов. Однако опыт прошлых работ подсказывает, что точности стандартных органов управления (джойстиков) недостаточно для данной задачи. Поэтому принято решение использовать программную реализацию.

Для случая коммуникации по USB (USART) несложно разработать графическую программу для компьютера. Однако работа с bluetooth накладывает сложности. Кроме того, компьютер недостаточно портативен для удобного управления. Поэтому принято решение использовать приложение для смартфона под управлением Android.

В предыдущем проекте автором уже была разработана заготовка для приложения, а также сам модуль джойстика (который вышел довольно удачным и универсальным). Поэтому на данном этапе потребовалось только добавить поддержку связи по каналу Bluetooth (дополнительно добавляется интерфейс выбора устройства из списка доступных) и возможность писать текстовые команды. В дальнейшем планируется в первую очередь добавить интерфейс для online-конфигурирования робота (напомним, что на стороне робота такой функционал уже поддержан), а также отображение данных телеметрии. Начальный и главный экраны приложения представлены на рис.11.



(a) Экран выбора устройства



(b) Основной экран

Рисунок 11 — Интерфейс приложения-терминала

На основном экране остались некоторые заготовки, неиспользуемые на данном этапе, такие как данные о скорости, панель управления дальномером. Основное - джойстик, переключатель подключения к машинке и панель сообщений с метками времени и индикатором статуса (OK, предупреждение, ошибка).

2.4. Определение параметров движения робота

Как уже упоминалось выше, на данный момент единственным источником данных о состоянии шасси для обратной связи является тахометр. Устройство максимально просто работает. На ось колеса ставится диск

с прорезями известного числа, расположенные через равные интервалы. Диск просвечивается светодиодом. Как только на пути света оказывается щель в диске, первый попадает в фотодиод, после чего генерируется электрический сигнал, вызывающий аппаратное прерывание в контроллере. Программа регистрирует время срабатывания датчика (в микросекундах). На данном устройстве диск имеет 23 щели, откуда легко понять, что датчик будет срабатывать довольно часто, оттуда и микросекунды.

В данный момент для простоты работы расчёт скоростей и расстояния происходит на каждое срабатывание датчика, но в дальнейшем планируется связать этот процесс с коррекцией, чтобы оптимизировать вычислительные затраты. Прерывание должно работать быстро.

Опишем процесс расчёта пройденного расстояния и скорости колеса. Для каждого прерывания записывается время в микросекундах, прошедшее с момента последнего срабатывания. Затем инкрементируется текущая координата вдоль пути и расставляются необходимые служебные флаги. Затем через некоторое время начинается расчет скорости. Сначала выполняется расчет производной с новым значением путевой координаты на основе сохраненных ранее предыдущих значений. Затем применяются различные фильтры. В данный момент включены: бегущее среднее, оконный усредняющий фильтр. Их параметры доступны для изменения в режиме реального времени. Затем данные сохраняются в модель и становятся доступными для регулятора. Вообще структура программы позволяет легко вычислять и ускорение, просто добавив еще один модуль производной. Однако, как увидим далее, в текущей реализации это довольно бессмысленно из-за низкой точности.

Так как сигнал значений скорости очень важен, довольно много времени уделено отработке алгоритмов его обработки. Анализ проводился в Matlab на основе реальных данных, собранных с шасси. Для этого прошивка была изменена таким образом, чтобы данные с тахометра печатались в serial-порт, откуда попадали в текстовый файл. Оттуда с помощью регу-

лярных выражений данные преобразовывались в массив Matlab и вставлялись в скрипт. Для лучшего тестирования алгоритмов в выборке попадали моменты как с равномерной работой двигателей, так и резкие остановки/разгоны, а также изменения скорости между уровнями. Такая подготовка предоставила широчайшие возможности для анализа.

2.5. Получение и подготовка сигнала скорости по данным тахометра

Как было указано выше, единственные данные, получаемые с энкодера - это моменты времени, в которые щель колеса проходит между датчиками. Так как угловое расстояние между щелями одинаковое, а за время между срабатываниями колесо поворачивается на $1/23$ от угла 2π радиан, можно вычислить скорость вращения колеса по формуле конечных разностей.

Формулы конечной разности бывают трех модификаций - левые, правые и центральные. Так как мы дифференцируем сигнал в реальном времени, лучше всего подходят левые - производная вычисляется на основе предыдущих значений сигнала. Конечные разности могут быть различных порядков, формула для первого порядка имеет вид:

$$f^{(1)}(x) \approx \frac{f(x) - f(x - h)}{h},$$

где h - шаг между значениями дискретной функции.

Ранее в лабораторной работе уже реализовывался алгоритм расчёта коэффициентов для получения формулы конечных разностей любого порядка (см. Приложение 1). Однако шаг времени в нашем случае по определению непостоянный, поэтому ограничимся формулой первого порядка.

Полученный после дифференцирования сигнал представлен на рис.12.

По графику легко угадывается режим работы. Сначала скорость бы-

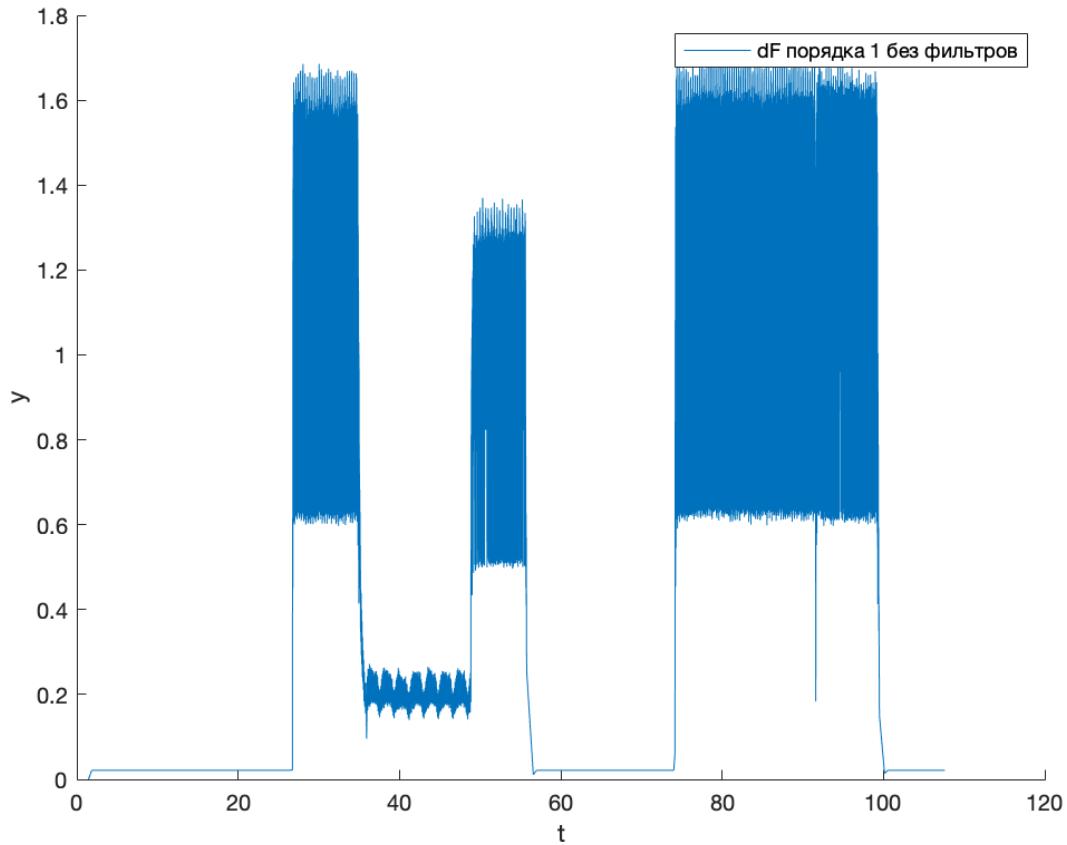


Рисунок 12 — Продифференцированный сигнал с энкодеров

ла нулевой, затем резко увеличина до максимального значения, понижена до некоторого небольшого значения, затем повыше, после - остановка (под действием инерции остановка происходит куда дольше, чем разгон), затем разгон до максимальной скорости и снова остановка. Можно даже заметить, что на низкой скорости двигатель работает неравномерно (колебания малой частоты). Однако величина частых колебаний очень велика, что не годится для использования при анализе и использовании регулятором. Необходима фильтрация. На начальном этапе решено было применить только простейшие фильтры.

Первый фильтр называется "бегущее среднее". Формула имеет вид:

$$f(t_k) = \alpha f(t_k) + (1 - \alpha)f(t_{k-1}),$$

где t_k - текущее значение сигнала, t_{k-1} - предыдущее, α - коэффициент усиления, $\in [0; 1]$.

Суть работы данного фильтра в предотвращении быстрого изменения сигнала под воздействием нового значения сигнала, позволяет устранить резкие выбросы. Сравнительный график с различными значениями коэффициента усиления представлен на рис.13. Внимания стоят два момента. Первое - уменьшение коэффициента усиления уменьшает величину колебаний сигнала, т.е. фильтр действительно добавляет сигналу инерционности. Второе - по этой же причине при резком изменении действительного значения (когда скорость в реальности изменяется), величина отфильтрованного сигнала изменяется постепенно. Это может оказаться на скорости реагирования системы на резкое изменения. Поэтому оптимальное значение - около 0.5.

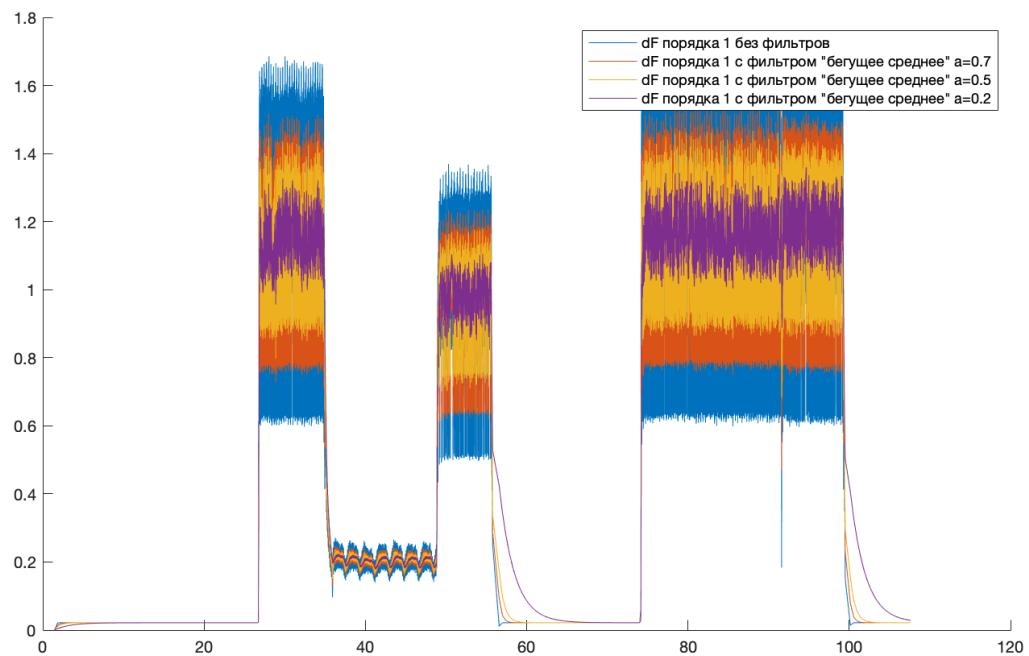


Рисунок 13 — Фильтр "бегущее среднее"

Далее рассмотрим фильтр, вычисляющий среднее значение сигнала в пределах некоторого "окна". Эффект схож с бегущим средним, но включает в себя большее количество точек, что должно дать лучший эффект

сглаживания. Этот фильтр для работы в реальном времени требует реализации циклического буфера. Обычно величина окна задаётся фиксированным. Однако очевидно, что появится дилемма между степенью сглаживания и быстродействием. Поэтому предложен эмпирический метод адаптивного подбора размера окна. Суть следующая. Задаётся характерный размер временного промежутка, в течение которого мы готовы получать неточный сигнал. Затем вычисляется набор промежутков времени между точками по заранее заданному их числу, а затем берется отношение характерного значения и среднего арифметического от полученных интервалов времени. Округлив вверх, получим значение величины окна, которое расчет на постоянном сигнале и уменьшается на резко и сильно меняющемся. Результаты представлены на сравнительном графике на рис.14. Для оценки вычисленного значения адаптивного окна приведен график на рис.15 с наложенным значением величины окна.

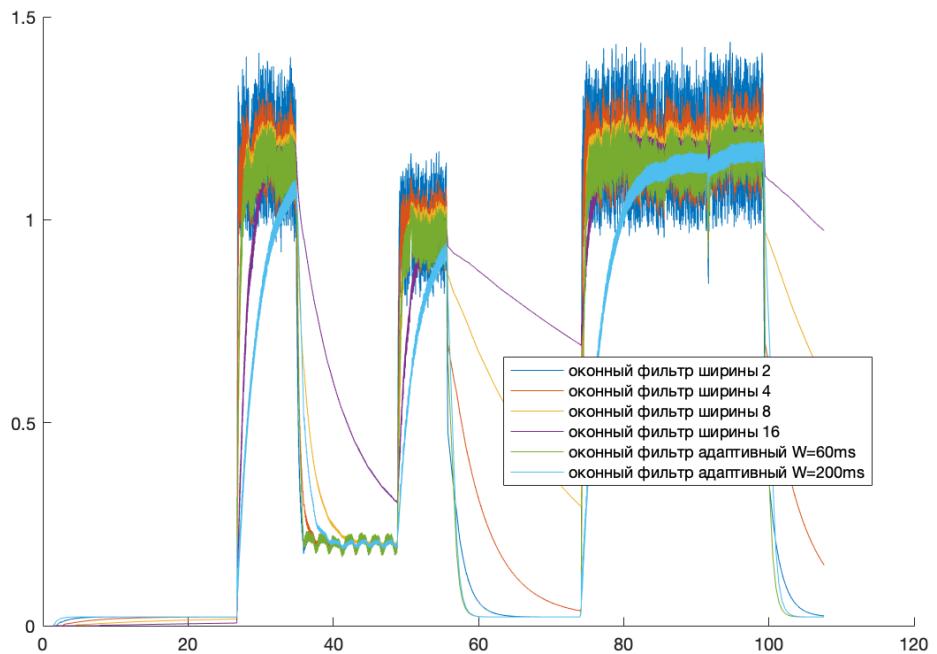


Рисунок 14 — Оконный усредняющий фильтр. Расшифровка легенды: оконные фильтры ширины 2, 4, 8, 16; оконные фильтры адаптивные с характерным интервалом 60мс и 200мс.

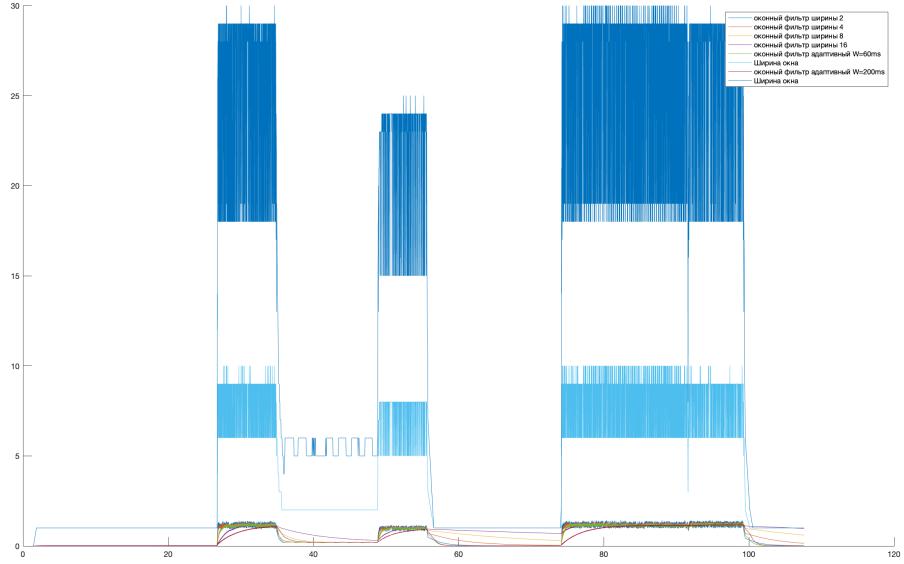


Рисунок 15 — Оконный усредняющий фильтр со значениями адаптивного окна

Очевидно, что, в отличие от бегущего среднего, данный фильтр также дает запаздывание при росте скорости, однако дает лучшее сглаживание. Применение же адаптивной величины окна позволяет частично решить проблему.

Наконец, применим несколько фильтров для получения достаточно хорошего сигнала. Результаты представлены на рис.16

Конечно же существует множество более сложных фильтров, которые могут дать куда лучший результат, например, фильтр высоких частот, фильтр Кальмана. Однако на данном этапе решено ограничиться лишь наиболее простыми.

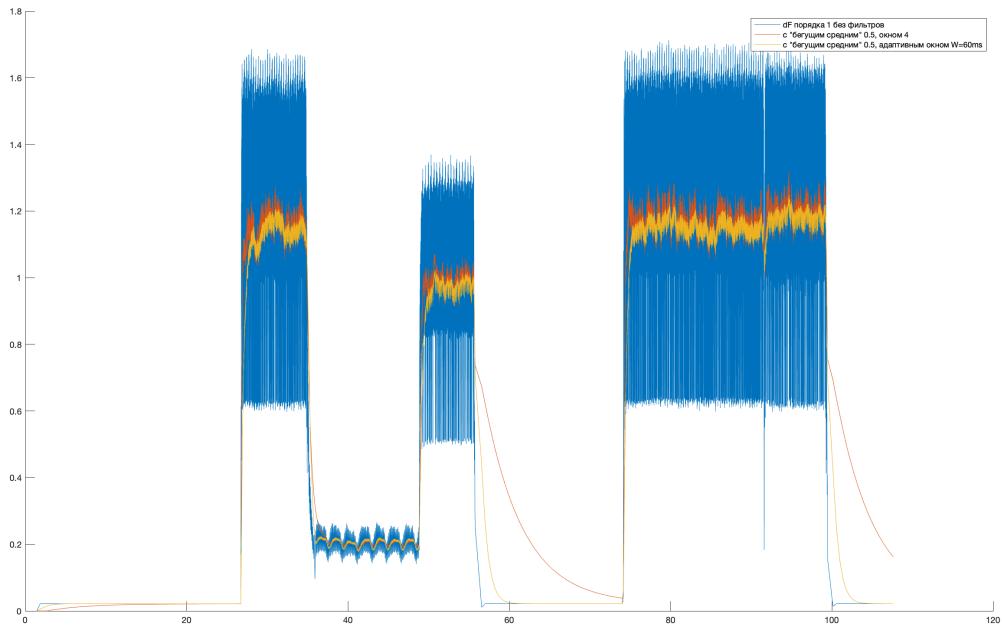


Рисунок 16 — Удачные комбинации нескольких фильтров

Заключение

В рамках данной НИР была проведена подготовительная работа для изучения и отработки на практике различных методов управления и устранения помех движению подвижных объектов. Собрана непосредственно подвижная платформа, приводимая в движение двумя электродвигателями и получающая информацию о своем состоянии посредством измерения пройденного расстояния с помощью колесных энкодеров. Разработана программная основа для прошивки микроконтроллера шасси. Это позволит легко добавлять новый функционал и расширять возможности устройства, а кроме того, отлаживать и тестировать, в том числе автоматически, прошивку на компьютере без участия реального микроконтроллера. На данном этапе производится считывание данных энкодеров, получение команд с терминала, проверка доступности аппарата и изменение конфигурационных констант "на лету". Данные с энкодеров подвергаются численному дифференцированию, результат фильтруется и сохраняется в памяти. В

качестве управляющего терминала была доработана более ранний вариант приложения для смартфона под Android. Связь осуществляется по радиоканалу Bluetooth.

На данном этапе не удалось внедрить поддержку модуля гироскопа и акселерометра, продвинутых методов фильтрации сигнала с тахометров, не составлена математическая модель устройства и, собственно, не разработан регулятор, позволяющий сохранять заданное направление движения. Однако была проделана довольно трудоемкая подготовительная работа, особенно сложным оказался этап разработки прошивки. На следующем этапе планируется наверстать незаконченные подзадачи 1.

Список использованных источников

- [1] Филлипс Б. Стюарт К. Марсикано К. Android. Программирование для профессионалов: Пер. с англ. Санкт-Петербург: Питер, 2017. 688 с.
- [2] А.Л. Масленников. Лекции по предмету "Методы вычислений". Москва, 2020.
- [3] А.Б. Сергиенко. Цифровая обработка сигналов: уч. пособие. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011.
- [4] А.А.Бобцов А.С.Боргуль К.А.Зименко. Алгоритм управления автономным колесным мобильным роботом // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, мехатроники и оптики. 2011. № 5. С. 63–68.
- [5] Страуструп Б. Язык программирования C++. Москва: Бином, 2010.
- [6] Matlab Help. url`https://www.mathworks.com/help/matlab/`.