

Введение

Аграрная промышленность занимает ключевое место в экономике любой страны, обеспечивая продовольственную безопасность и устойчивое развитие общества. Она включает в себя широкий спектр деятельности, от возделывания сельскохозяйственных культур до разведения животных и переработки сельхозпродукции. Важность этого сектора трудно переоценить, так как он напрямую влияет на качество жизни населения, экспортные возможности и создание рабочих мест в сельских регионах.

Внедрение автоматизации в аграрную промышленность представляет собой перспективное решение, способное значительно облегчить труд фермеров, ускорить процессы производства и повысить точность сельскохозяйственных работ. Автоматизированные системы позволяют увеличить скорость и качество обработки земель, а также повысить общую эффективность производства. Кроме того, использование современных технологий способствует устойчивому использованию ресурсов, что в конечном итоге ведет к улучшению общего состояния аграрной отрасли и повышению ее конкурентоспособности на мировом рынке.

Проблема и актуальность её решения

Агропромышленный комплекс (АПК) играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны, удовлетворяя базовые потребности населения в пище. В последние годы для повышения эффективности производства крупные агрокомпании активно внедряют робототехнику и искусственный интеллект. В частности, используются специальные дроны для анализа состояния земель, растений и автономные тракторы для выполнения различных работ на поле.

Однако существующие решения имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, высокая стоимость агропромышленных дронов, начинающаяся от 1 миллиона рублей, делает их приобретение оправданным только для крупных хозяйств с большими площадями. Кроме того, автономные дроны обладают ограниченным временем работы в 10–20 минут, что снижает их эффективность при обработке больших территорий. Автономные тракторы, несмотря на свои преимущества, также характеризуются высокой стоимостью и большими размерами, что ограничивает их применение преимущественно на больших полях.

В результате малые и средние фермерские хозяйства вынуждены продолжать использовать ручные методы обработки земли, поиска вредителей и мониторинга состояния растений. Это приводит к снижению общей эффективности сельского хозяйства, увеличению затрат на выращивание. Это, в свою очередь, сказывается на конкурентоспособности российского АПК на мировом рынке, где более гибкие и технологичные методы производства уже становятся стандартом.

Дополнительной проблемой является дефицит рабочей силы в России в том числе в агропромышленной сфере. В то время как в развитых странах активно внедряются промышленные роботы, в России их использование остается на низком уровне. Это вынуждает компании привлекать дорогостоящих работников, что дополнительно увеличивает затраты и снижает общую эффективность производства.

Решение этих проблем посредством разработки мультифункциональных роботов способных работать не только на полях больших хозяйств станет важным шагом на пути повышения эффективности сельскохозяйственного производства в России. Это позволит не только снизить зависимость от ручного труда и сократить издержки, но и повысить конкурентоспособность российского АПК на международной арене. В условиях увеличения продолжительности жизни и роста мирового населения будет расти спрос на выращивание продовольствия. Внедрение

современных робототехнических устройств и искусственного интеллекта станет необходимостью, как для больших, так и для малых хозяйств для удовлетворения спроса на продовольствие.

Выбор темы проекта

Мой проект нацелен на создание мультифункционального робота для использования на малых и средних полях. Он будет небольшого размера, чтобы эффективнее использоваться на малых территориях и меньше наносить вред почве. Мультифункциональность будет заключаться в возможности поменять рабочий инструмент робота. Благодаря этому он будет больше задействован в различных задачах, что снизит затраты на персонал.

Как результат я должен буду создать робота, который сможет передвигаться по полям, с возможностью замены функционального модуля.

Цель и задачи

Целью проекта является разработка мобильного робота (прототипа) способного позиционироваться на открытом поле, передвигаться по заданной траектории с использованием GPS и IMU модулей, поддерживающий управление через дистанционную связь с сервером по интернету, возможностью подключать модули для выполнения различных работ на поле. Так же нужно будет разработать модули для робота (модуль анализа состояния среды вокруг растений, модуль позволяющий мониторить состояние растений).

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:



1. Исследовать существующие предложения на рынке, выделить их сильные и слабые стороны.
2. Разработка технического задания и структурной схемы робота.
3. Подбор компонентов и материалов.
4. Создание 3D-модели и проектирование конструкции
5. Проектирование электронной части и разработка печатных плат
6. Сборка прототипа и монтаж модулей
7. Программирование и настройка системы управления
8. Тестирование и отладка прототипа
9. Разработка дополнительных модулей и функционала
10. Оценка эффективности и подготовка документации

Анализ аналогов

Для сравнения и анализа были выбраны роботы, разработанные для полей небольших и средних размеров, они имеют модульный механизм и небольшие размеры. Так они будут максимально удовлетворять поставленной цели проекта.

Сравнительная таблица

Название	Изображение	Описание
Oz (Naïo Technologies)		Oz – робот от компании Naïo Technologies. Ориентирован преимущественно на механическую прополку и уход за междурядьями. Имеет базовую модульность, позволяющую использовать разные насадки (например, пропольщики, окучники). Использует простые и надёжные электрические приводы,

		<p>базовую GPS-навигацию, а также датчики для распознавания рядов растений. Лёгкий и относительно небольшой робот на колёсном шасси. Он способен обрабатывать грядки без значимого уплотнения почвы.</p>
Thorvald (Saga Robotics)		<p>Thorvald – робот от компании Saga Robotics. Имеет более широкую сферу использования: от мониторинга состояния растений и внесения удобрений до сбора урожая. На него могут быть установлены различные модули: опрыскиватели, камеры, манипуляторы для сбора ягод. Оснащён обширным набором датчиков (камеры, лидары, GPS, IMU), которые позволяют ему выполнять автономное движение, собирать разнообразные данные и взаимодействовать в рамках «роевых» сценариев с другими роботами.</p>
TerraSentia (EarthSense)		<p>TerraSentia – робот от компании EarthSense. Нацелен в первую очередь на детальный сбор данных и проведение измерений в полевых условиях. Отличается модульностью по части сенсоров и программного обеспечения: различные камеры, спектральные модули, алгоритмы распознавания и анализа данных. Он может выполнять множество задач по измерению параметров растений, но не предназначен для физических работ. Специализируется на детальном сборе данных: используются высокоточные мультиспектральные и гиперспектральные камеры, лидары, а также ПО с алгоритмами компьютерного зрения и машинного обучения для анализа состояния растений.</p>

Проанализировав имеющиеся на рынке аналоги были сделаны выводы:

Для передвижения будет достаточно 4-х колесного шасси, где каждое колесо будет ведомым. Такая конструкция будет оптимальной для передвижения по полям и ее будет достаточно чтобы преодолевать препятствия. Колеса должны иметь протектор для хорошей сцепки.

Для позиционирования робота в пространстве и передвижения можно будет использовать GPS навигацию, IMU модуль и моторы с энкодером. Эти датчики имеют достаточный функционал для передвижения по полю.

В работе нужно предусмотреть возможность удаленного управления через интернет, чтобы можно было в любой момент остановить и вернуть робота.

В качестве модулей для робота стоит рассмотреть как модули для механической работы (прополка, окучка) так и для профессионального оборудования с датчиками (модуль мониторинга состояния растений). Это позволит наиболее полно закрыть функционал, который робот сможет выполнять на поле.

Структурная схема и техническое задание

Прежде чем приступить к работе была разработана структурная схема.

Так же было сформулировано техническое задание:

1. Робот должен перемещаться по открытым полям малого и среднего размера, позиционироваться с помощью GPS-модуля и инерциального модуля (IMU).
2. Робот должен поддерживать удалённое управление и обмен данными по сети (через GSM/GPRS или аналогичный модуль), позволяя оператору в любой момент остановить/изменить траекторию робота.
3. Робот должен иметь возможность менять функциональный модуль (например, для механической прополки или мониторинга состояния растений) без сложной разборки конструкции.
4. Конструкция должна позволять роботизированной платформе передвигаться меж рядов растений по полю с неровной поверхностью, преодолевая небольшие препятствия
5. Опорой робота служит колёсное шасси на четырёх колёсах, каждое из которых должно быть ведущим либо иметь возможность установки полного привода. Колёса должны иметь выраженный протектор для лучшего сцепления с грунтом.
6. Робот должен иметь модульную конструкцию, позволяющую заменять функциональные модули без переделки основного корпуса (крепление на разъёмах/быстросъёмных механизмах).
7. На каждом колесе должны быть установлены двигатели с энкодерами, обеспечивающими контроль скорости и пройденного расстояния.
8. Конструкция должна обеспечивать простую замену или обслуживание моторов, редукторов и колёс.
9. Требования к функциональным модулям
Робот должен иметьМодуль анализа состояния среды вокруг растений (датчики температуры, влажности, освещённости, качества воздуха и др.).Модуль мониторинга состояния растений (камера/система компьютерного зрения для обнаружения и фотографирования/видеозаписи)
 - 4.2. Каждый модуль должен иметь собственный корпус (или защитный кожух), а также стандартный разъём для подключения питания и данных к основной платформе.
10. Для передачи данных на сервер и получения команд робот должен использовать GSM/GPRS-модуль (или альтернативный модуль сотовой связи — 4G, LTE).
11. Внешний вид и дополнительные требования

12. Корпус робота, функциональных модулей и печатные платы должны быть выполнены в едином стиле, предпочтительно выдержанном в нейтральных цветах (например, сочетание серого, чёрного и элементов корпоративных цветов).
13. Все острые кромки и выступающие детали должны быть обработаны и закрыты защитными элементами, чтобы избежать травмоопасных ситуаций при работе с роботом.

Конструкторско-технологический этап

Конструкция робота

Выбор САПР

Для разработки конструкции робота была выбрана САПР Компас 3Д. Ее выбор обусловлен наличием у меня опыта работы в данной среде, а также наличием большого количества материала по работе с ней в открытом доступе.

Разработка основного корпуса

В первую очередь было выбрано разработать корпус основной части. Он является основной деталью так как именно к нему будут крепиться все остальные детали. Было принято решение, что корпус будет иметь прямоугольную форму. Спереди будет находиться разъем для крепления и специальные отверстия, в которые будет вставляться модуль для более удобного взаимодействия. Моторы будут иметь внешнее крепление. Далее они будут закрыты насадкой для поддержания герметичности корпуса. Материнская плата будет крепиться на болты в нижней части корпуса. Для доступа внутрь корпуса сверху имеется крышка.

Разработка модуля

Далее были спроектированы модули. Предполагается, что они будут иметь универсальное крепление и эргономично продолжать основную часть. Было решено, что модуль будет иметь корпус, внутри которого будет находиться все необходимое. Корпус будет сверху накрываться крышкой-креплением, которая вдавлена внутрь для поддержания герметичности модуля.

Расположение датчиков и не только

Робот работает от аккумулятора, для того чтобы он мог работать как можно дольше, было принято решение, что аккумулятор можно будет поменять. Он будет крепиться внутри корпуса, и к нему будет легкий доступ при открытии крышки.

Для датчиков в модуле анализа окружающей среды вокруг растений и для камеры в модуле мониторинга состояния окружающей среды были сделаны специальные отверстия в корпусе модуля.

Изготовление и сборка конструкции

Корпус робота был изготовлен на 3Д принтере. Для печати использовался пластик PETG так как он более прочный, также его характеристики позволяют эксплуатировать робота в более жесткой среде. Для ускорения печати некоторые детали были разделены и напечатаны отдельно.

Электроника робота

Выбор электронных компонентов и САПР

В качестве моторов были выбраны ТТ моторы с редуктором 1:48, рабочем напряжении 12В и моментом ..., что позволяет передвигать робота весом до 10 кг, благодаря этому можно увеличить полезную нагрузку. В качестве энкодеров используются

В качестве драйверов были выбраны ... так как они предоставляют возможность работать с напряжением до 13В, так же у них хорошее рассеивание тепла, что особенно важно в маленьком корпусе.

Для онлайн связи с сервером был выбран GSM/GPRS модуль SIM800L, так как он позволяет быстро подключиться к сети и передать все необходимые данные. Общение с модулем происходит по UART.

Для определения положения робота на поле так же используется GPS модуль Он отличается надежностью и наличием большого количества материалов по работе с ним. Связь с ним так же происходит по UART.

В качестве IMU-модуля была выбрана плата MPU6050, так как она предоставляет большой функционал по работе с гироскопом и акселерометром, что позволяет точнее определять местонахождение робота и контролировать его движение. Связь с модулем происходит по I2C.

В качестве контроллера основной части была выбрана Arduino UNO. Она поддерживает все необходимые протоколы передачи данных. Так же имеет достаточно большое количество пинов, которые нужны для управления роботом.

Для модуля мониторинга состояния растений была выбрана OpenMV H7. Она представляет большой функционал для работы с камерой. Так же имеет выводные пины, через которые можно будет наладить общение между контроллерами.

В качестве контроллера для модуля анализа окружающей среды была выбрана Arduino NANO. Она имеет компактные размеры и поддерживает все необходимые протоколы для связи датчиков и контроллеров.

Для модуля анализа окружающей среды были выбраны датчики ... Общение с ними происходит по I2C.

Для удобного взаимодействия компонентов между собой было решено спроектировать собственную печатную плату. Так же на плате можно заранее предусмотреть все разъемы и пины и для удобного налаживания связи между основным блоком и модулем. Для основной части и для модуля анализа состояния окружающей среды были разработаны печатные платы.

Список компонентов в приложении

Для проектирования и разводки печатных плат была выбрана САПР EASY EDA. Так как эта программа имеет обширную библиотеку, которую пополняют в том числе и пользователи, в ней можно найти почти любой компонент. Так же она предоставляет обширные возможности для работы над проектом и импортом его в другие программы.

Разработка принципиальной схемы и трассировка печатной платы

Принципиальная схема представлена ...

Далее я приступил к разводке печатных плат. Было решено сделать печатные платы двухслойными для удобства трассировки и экономии места.

Производство печатной платы и монтаж компонентов

Было решено самому делать печатную плату. Для производства платы из САПР выгружалось информация в виде pdf файлов. Далее на основе этих данных из текстолита на лазерном чертеже вырезалась плата и вытравливалась.

Компоненты я так же сам располагал на плате и припаивал при помощи паяльника.

Программное обеспечение робота

Выбор среды разработки и языка программирования

Для основного контроллера Arduino UNO и контроллера модуля анализа состояний окружающей среды Arduino Nano было решено использовать PlatformIO в качестве среды программирования на языке C++. Данная платформа позволяет расширить стандартный функционал и использовать все возможности языка программирования. Так же она удобно встраивается в VScode и предоставляет больше возможностей для качественного написания кода.

Для программирования модуля анализа состояния растений было выбрано использовать OpenMV IDE и язык MicroPython, так как эта среда специально разрабатывалась для работы с модулем и предоставляет большие возможности, которых нет в аналогах.

Общее описание структуры ПО

Робот разбит на несколько функциональных модулей.

Главный микроконтроллер Arduino UNO находится в основном корпусе. Он отвечает за сбор данных (энкодеры, IMU-модуль, GPS-модуль), контроль передвижений робота с использованием ПИД-регулятора, на основе анализа данных с энкодеров, IMU-модуля и GPS-модуля. Получает и обрабатывает данные от модуля анализа окружающей среды вокруг растений или модуля мониторинга состояния растений. Так же передаёт данные о местонахождении робота, состоянии и данных с модулей и получает дальнейшие команды с помощью GPRS-модуля. Взаимодействие между модулями в основном происходит через I2C или UART.

Модуль OpenMV используется для фотографирования растений и возможности удаленного контроля за состоянием тех или иных культур. С использованием компьютерного зрения камера может отфильтровать изображения с поля на те, где есть растения и где их нет. Изображения с растениями далее будут переданы человеку для дальнейшего анализа.

Arduino Nano используется в качестве контроллера для модуля анализа состояния окружающей среды. Она общается с датчиками качества воздуха, температуры, освещенности по I2C. Далее эти данные так же по I2C передаются основному контроллеру.

Общий алгоритм работы робота придерживается принципов конечного автомата. События переключаются в зависимости от условий. Основные состояния робота: Инициализация, Ожидание команды (робот стоит на месте), Передвижение к точке (GPS + IMU), Считывание и обработка данных с подключенного модуля, Ошибка (нештатная ситуация, потеря связи).

Передвижение робота

Для обеспечения точного движения робота реализована система сбора данных с энкодеров на четырех колесах и гироскопа, а также управление скоростями моторов с использованием ПИД-

регулятора. Каждый из четырех колес оснащен энкодером, который отслеживает количество оборотов колеса. Данные с энкодеров сверяются с показаниями GPS-модуля и используются для определения текущей скорости и пройденного расстояния. Гироскоп измеряет ориентацию робота, что позволяет контролировать его положение и направление движения. На основе полученных данных с энкодеров и гироскопа ПИД-регулятор вычисляет отклонения от заданных параметров движения. Регулятор рассчитывает необходимую скорость для каждого мотора, чтобы обеспечить стабильное и точное движение робота. Вычисленные скорости передаются на драйверы моторов через ШИМ-сигналы.

```
void controlMotors(float target_speed[4]) {  
  
    static long prev_encoders[4] = {0, 0, 0, 0};  
  
    static float integral[4] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0};  
  
    static float prev_error[4] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0};  
  
    float dt = MOTORS_DELAY / 1000.0; // Время между итерациями в секундах  
  
    int pwm_values[4];  
  
    for(int i = 0; i < 4; i++) {  
  
        // Вычисление текущей скорости  
  
        float current_speed = (encoders[i] - prev_encoders[i]) * 60000.0 / (CPR * MOTORS_DELAY);  
  
        // Вычисление ошибки  
  
        float error = target_speed[i] - current_speed;  
  
        // Вычисление интегральной и дифференциальной составляющих  
  
        integral[i] += error * dt;  
  
        float derivative = (error - prev_error[i]) / dt;  
  
        // Вычисление управляющего воздействия  
  
        float control = KP * error + KI * integral[i] + KD * derivative;  
  
        // Ограничение управляющего воздействия  
  
        if(control > PWM_MAX) control = PWM_MAX;  
  
        if(control < -PWM_MAX) control = -PWM_MAX;  
  
        // Преобразование в значение ШИМ  
  
        pwm_values[i] = map((int)control + target_speed[i]), 0, 1000, 0, PWM_MAX);  
  
        // Сохранение предыдущих значений  
  
        prev_encoders[i] = encoders[i];  
  
        prev_error[i] = error;  
  
        // Отправка ШИМ-сигнала на мотор  
  
        analogWrite(MOTOR_PINS[i], pwm_values[i]);  
  
    }  
}
```

Связь с сервером

Для обеспечения удаленного мониторинга и управления роботом реализована связь с сервером посредством протокола MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) через модуль SIM800L. Данная система позволяет обмениваться данными между роботом и сервером в реальном времени, обеспечивая надежную и эффективную передачу информации.

Компьютерное зрение

OpenMV предоставляет возможности для обработки изображений и выполнения алгоритмов машинного зрения на встроенном микроконтроллере, что позволяет эффективно интегрировать эту функцию в систему робота. Данная система позволяет автоматизировать процесс обнаружения растений

```
green_threshold = (30, 100, -64, -8, -32, 32)
```

```
def find_plants():
```



```

img = sensor.snapshot().lens_corr(1.8) # Захват изображения и коррекция искажений

blobs = img.find_blobs([green_threshold], pixels_threshold=100, area_threshold=100, merge=True)

if blobs:

    for blob in blobs:

        # Отрисовка прямоугольника вокруг обнаруженного растения

        img.draw_rectangle(blob.rect())

        img.draw_cross(blob.cx(), blob.cy())

        # Отправка координат растения через UART

        uart.write("{cx},{cy}\n".format(cx=blob.cx(), cy=blob.cy()))

    return True

else:

    # Отправка сигнала о отсутствии растений

    uart.write("No plants detected\n")

    return False

```

Модуль анализа среды

Этот модуль собирает данные с различных сенсоров, таких как датчики температуры, влажности, освещенности и качества воздуха, а затем передает их на основной контроллер робота посредством интерфейса I2C.

Отладка и тестирование

В процессе отладки робота была проведена серия этапов, начиная с первичной проверки модулей. Первоначально собрал простейший «стенд» из контроллера, драйвера моторов и датчиков GPS/IMU. С помощью тестовых скетчей в Arduino IDE проверил, корректно ли работают сигналы энкодеров и акселерометра при ручном вращении колёс. Затем перенёс эти наработки имевшийся у меня корпус робота, и начал тестировать — наблюдал, как ПИД-регулятор изменяет ШИМ при варьировании нагрузки и как конечный автомат переключается между состояниями.

Следующим этапом было тестирование передвижения робота в помещении. Я вручную задавал команды и наблюдал за его передвижениями. В процессе обнаружилась чувствительность IMU к вибрациям, что приводило к срывам алгоритма ориентации. Путём добавления сглаживающего фильтра и корректировки коэффициентов ПИД эти неточности удалось существенно снизить.

Опытным путем было выяснено, что GPS-модулю требуется некоторое время для нахождения спутников. Для этого было добавлено состояние инициализации робота.

Заключительный этап

Эстетический вид и качество робота

Конечный прототип отличается высокой модульностью, что позволяет легко заменять и добавлять различные рабочие модули в зависимости от требований хозяйства. Эстетический вид и качество конструкции были тщательно проработаны: корпус робота, изготовленный на 3D-принтере из прочного PETG-пластика, получил эргономичную прямоугольную форму с удобным доступом к внутренним компонентам. Для удобства эксплуатации имеется съемный аккумулятор, к которому осуществляется легкий доступ через внешнюю крышку.

Новизна и креативность проекта

Новизна и отличительная черта проекта от аналогов заключаются в его универсальности и адаптивности к различным задачам на поле. Робот может выполнять спектр различных задач на поле, быстро переключаться с одной задачи на другую благодаря лёгкой замене модулей.

Практическая значимость

Практическая значимость проекта заключается в его способности значительно повысить эффективность работы малых и средних фермерских хозяйств. Автоматизация процессов обработки земли позволяет сократить затраты на ручной труд, увеличить производительность и улучшить качество сельскохозяйственной продукции. Благодаря использованию доступных компонентов и модульной конструкции, разработанный робот может быть адаптирован под различные культуры и условия выращивания, что делает его востребованным инструментом в аграрном секторе. Популяризация аграрных роботов среди агрономов поможет повысить конкурентоспособность российского АПК на мировом рынке.

Результат

В результате проделанной работы был создан прототип робота, полностью соответствующий заявленным требованиям. В целом, проект достиг поставленных целей и задач, продемонстрировав потенциал использования автоматизированных решений в аграрной промышленности. Созданный робот может стать основой для дальнейших разработок и внедрения более сложных функций, что позволит повысить эффективность сельскохозяйственного производства и снизить зависимость от ручного труда.