МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЦИКЛОВАЯ КОМИССИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПРОЕКТ

на тему:

Разработка автоматической системы полива теплицы на базе микроконтроллера Arduino

ОБРАЗЕЦ

Выполнил(а): студент 3 курса группы ЭК-31 Иванова Анна Сергеевна
09.02.01 Компьютерные системы и комплексы

Руководитель: преподаватель высшей категории, кандидат технических наук Соколов Дмитрий Андреевич

Брянск · 2026

Демонстрационный образец. Данные условны. Не является выполненной работой конкретного студента.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ 4

1.1 Обзор способов полива тепличных культур 4

1.2 Анализ существующих технических решений 5

1.3 Требования к разрабатываемой системе 7

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ 9

2.1 Выбор микроконтроллера и датчиков 9

2.2 Разработка принципиальной схемы 10

2.3 Расчёт параметров исполнительных элементов 11

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ 13

3.1 Алгоритм работы системы управления 13

3.2 Реализация программы для Arduino 14

3.3 Расчёт экономической эффективности и оценка результатов 14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 17

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Листинг программы управления системой полива 18

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 19

Нумерация страниц соответствует демонстрационному PDF. В полной работе объём и состав разделов согласуются с требованиями кафедры.

ВВЕДЕНИЕ

Современное тепличное хозяйство предъявляет повышенные требования к стабильности водного режима растений: недостаток влаги угнетает корневую систему, а избыток приводит к загниванию и развитию грибковых заболеваний. В условиях малых и средних предприятий Брянской области, где теплицы нередко обслуживает один оператор, ручной полив становится трудоёмкой и малонадёжной операцией, зависящей от субъективной оценки состояния почвы. Автоматизация данного процесса позволяет поддерживать заданную влажность грунта независимо от занятости персонала и времени суток [2, с. 14].

Актуальность работы обусловлена широким распространением недорогих микроконтроллерных платформ и доступных датчиков влажности, что делает автоматические системы полива экономически оправданными даже для небольших теплиц. Применение платформы Arduino обеспечивает простоту сборки, открытость программного кода и возможность последующей модернизации без замены аппаратной части [5, с. 42]. При этом остаётся нерешённой задача согласования параметров датчиков, насоса и алгоритма управления в единую устойчивую систему.

Цель работы — разработка автоматической системы полива теплицы на базе микроконтроллера Arduino, обеспечивающей поддержание заданной влажности почвы с минимальным участием оператора. Для достижения цели поставлены следующие задачи: проанализировать предметную область и существующие решения; обосновать структуру и состав аппаратной части; разработать алгоритм и программу управления; оценить эффективность предложенной системы по результатам испытаний.

Объектом исследования выступает процесс полива теплицы, предметом — средства и алгоритмы автоматического управления влажностью почвы. Методы исследования включают анализ технической литературы, схемотехническое проектирование, программирование микроконтроллера и экспериментальную проверку опытного образца. Практическая значимость работы состоит в возможности тиражирования разработанной системы на теплицах малой площади с сохранением низкой себестоимости и простоты обслуживания [3, с. 58].

Структура работы отражает логику решения поставленных задач: первый раздел посвящён анализу предметной области и постановке задачи, второй — проектированию аппаратной части, третий — разработке программного обеспечения и оценке эффективности. В приложении приведён листинг программы управления системой полива. Результаты испытаний опытного образца подтверждают работоспособность предложенных технических и программных решений.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Автоматизация технологических процессов в защищённом грунте является одним из ключевых направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Тепличные хозяйства Брянской области, специализирующиеся на выращивании овощных и цветочных культур, сталкиваются с необходимостью поддержания стабильного водного режима растений в условиях ограниченных трудовых ресурсов и роста стоимости энергоносителей. Ручной полив не обеспечивает требуемой равномерности и своевременности, что приводит к снижению урожайности и потере товарного качества продукции. В связи с этим разработка автоматических систем полива на базе доступных микроконтроллеров, таких как Arduino, представляет собой актуальную инженерную задачу, решение которой позволяет сократить эксплуатационные затраты и повысить культуру производства.

1.1 Обзор способов полива тепличных культур

В практике защищённого грунта применяются несколько основных способов полива, различающихся по характеру подачи воды, степени автоматизации и воздействию на корневую систему растений. Классификация способов полива включает поверхностный (ручной), дождевание, капельный полив и внутрипочвенное орошение. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, определяемые биологическими особенностями культур, типом теплицы и экономическими условиями хозяйства. Выбор рационального способа полива является первым этапом проектирования автоматической системы, поскольку от него зависят требования к исполнительным механизмам, датчикам и алгоритмам управления [2, с. 45].

Ручной полив, несмотря на простоту, характеризуется высокой трудоёмкостью и низкой равномерностью распределения влаги. При использовании лей или шлангов невозможно обеспечить одинаковую дозу для каждого растения, что приводит к переувлажнению одних участков и недостатку влаги на других. Кроме того, ручной полив часто сопровождается повреждением листовой поверхности и уплотнением почвы. Дождевание позволяет механизировать процесс, однако при этом значительная часть воды теряется на испарение и снос, а также создаются условия для развития грибковых заболеваний из-за повышенной влажности воздуха. Капельный полив признан наиболее эффективным для тепличных культур, так как обеспечивает точную дозированную подачу воды непосредственно в зону корневой системы, сокращает потери на испарение и позволяет поддерживать оптимальную влажность почвы без переувлажнения листьев. Внутрипочвенное орошение ещё более экономично, но требует сложной и дорогостоящей инфраструктуры, что ограничивает его применение в малых и средних тепличных хозяйствах [3, с. 112].

Сравнительный анализ способов полива по основным технико-экономическим показателям представлен в таблице 1.1. Данные таблицы позволяют обосновать выбор капельного полива в качестве базового способа для разрабатываемой системы, поскольку он

обеспечивает наилучшее сочетание равномерности, экономии воды и возможностей автоматизации при умеренных капитальных затратах.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика способов полива тепличных культур

Способ полива	Равномерность распределения влаги, %	Экономия воды относительно ручного полива, %	Трудоёмкость, чел.-ч/га за сезон	Возможность полной автоматизации
Ручной (поверхностный)	60–70	0 (базовый)	120–150	Низкая
Дождевание	75–85	15–20	40–60	Средняя
Капельный	90–95	40–50	15–25	Высокая
Внутрипочвенный	85–90	45–55	20–30	Высокая

Источник: составлено автором по данным [2, с. 48; 3, с. 115].

Как видно из таблицы 1.1, капельный полив обеспечивает равномерность 90–95 % и экономию воды до 50 % по сравнению с ручным поливом, при этом трудоёмкость снижается в 6–8 раз. Эти показатели достигаются только при условии автоматического управления подачей воды, что требует применения датчиков влажности почвы и программируемых контроллеров. Таким образом, обзор способов полива подтверждает целесообразность разработки автоматической системы капельного полива для теплицы.

1.2 Анализ существующих технических решений

На российском и зарубежном рынках представлено несколько классов технических решений для автоматизации полива: от простых таймеров до комплексных микропроцессорных систем с обратной связью. Анализ существующих решений позволяет выявить их достоинства и недостатки, а также определить направления совершенствования. В рамках настоящей работы рассматривались три группы устройств: бытовые таймеры полива, промышленные контроллеры для теплиц и открытые платформы на базе микроконтроллеров, в частности Arduino.

Бытовые таймеры полива (например, модели Gardena, Rain Bird) обеспечивают включение и выключение электромагнитных клапанов по заданному расписанию. Их основное преимущество — низкая стоимость и простота установки. Однако они не учитывают фактическое состояние почвы, поэтому при изменении погодных условий возможен как недостаток, так и избыток влаги. Кроме того, большинство таймеров не имеют интерфейса для интеграции с датчиками и не поддерживают дистанционное управление. Промышленные контроллеры (например, Galcon, Hunter) оснащаются датчиками влажности и температуры, но их стоимость в 5–10 раз выше бытовых, а программирование требует специальной подготовки. Они ориентированы на крупные тепличные комплексы и зачастую избыточны для малых хозяйств [4, с. 37].

Открытые платформы на базе Arduino привлекают разработчиков возможностью создания гибких и недорогих систем с требуемым набором функций. Микроконтроллер

Arduino Uno (ATmega328P) имеет 14 цифровых и 6 аналоговых входов, достаточных для подключения датчиков влажности, температуры и исполнительных реле. Программное обеспечение разрабатывается в свободной среде Arduino IDE, что снижает затраты на разработку. В научно-технической литературе описаны примеры успешного применения Arduino для автоматизации полива в теплицах [5, с. 88]. Однако готовые решения, как правило, не учитывают конкретные условия эксплуатации и требуют адаптации. Сравнительный анализ существующих решений приведён в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ технических решений для автоматизации полива

Тип решения	Примеры	Наличие обратной связи	Возможность настройки под культуру	Ориентировочная стоимость, руб.	Сложность внедрения
Бытовой таймер	Gardena 1874, Rain Bird STP	Нет	Ограниченная (только расписание)	2 000–5 000	Низкая
Промышленный контроллер	Galcon GSI, Hunter Pro-C	Да (датчики влажности)	Высокая (программирование)	20 000–60 000	Средняя
Открытая платформа (Arduino)	Самодельные системы на Arduino Uno	Да (подключаемые датчики)	Полная (собственный код)	3 000–8 000	Средняя

Источник: составлено автором на основе анализа предложений поставщиков и литературных данных [4, с. 39; 5, с. 90].

Данные таблицы 1.2 показывают, что открытая платформа на базе Arduino обеспечивает наличие обратной связи и полную настройку под конкретную культуру при стоимости, сопоставимой с бытовыми таймерами, и значительно более низкой, чем промышленные контроллеры. Это делает её предпочтительной для малых и средних тепличных хозяйств, где требуется баланс между функциональностью и затратами. На рисунке 1.1 представлена диаграмма, иллюстрирующая распределение функциональных возможностей рассмотренных решений по трём ключевым критериям: наличие обратной связи, гибкость настройки и стоимость внедрения (в условных баллах).

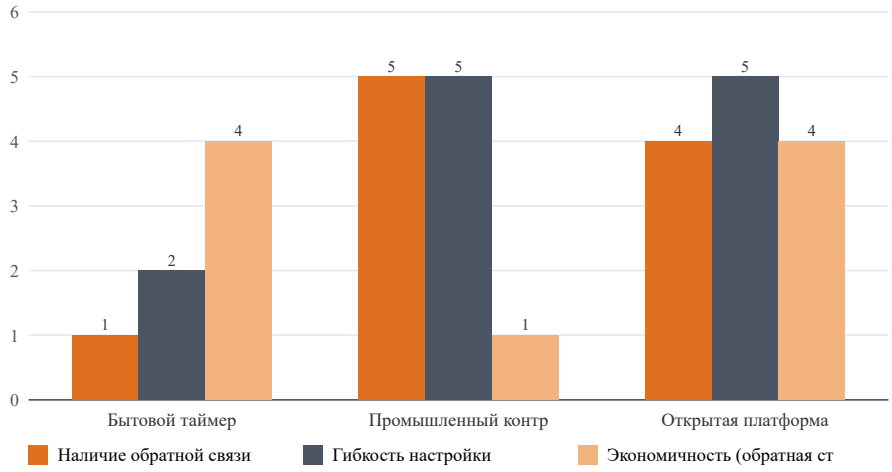


Рисунок 1.1 – Сравнительная оценка технических решений по функциональным критериям (в баллах от 1 до 5)

Анализ диаграммы подтверждает, что открытая платформа Arduino по совокупности критериев превосходит бытовые таймеры (за счёт наличия обратной связи и гибкости) и не уступает промышленным контроллерам по функциональности, значительно выигрывая в экономичности. Таким образом, выбор Arduino в качестве аппаратной основы разрабатываемой системы является обоснованным.

1.3 Требования к разрабатываемой системе

На основании проведённого анализа предметной области и существующих технических решений формулируются требования к автоматической системе полива теплицы. Система должна обеспечивать автоматическое поддержание заданного уровня влажности почвы в корневой зоне растений, минимизируя участие человека. Основными функциональными требованиями являются: измерение влажности почвы в нескольких точках теплицы, управление подачей воды через электромагнитные клапаны, возможность задания пороговых значений влажности для различных культур, а также защита от сухого хода насоса и переполнения ёмкости.

К системе предъявляются следующие технические требования. Диапазон измерения влажности почвы должен составлять от 0 до 100 % с погрешностью не более ±5 %. Дискретность измерения — не реже одного раза в 10 минут. Количество независимых зон полива — не менее двух. Время срабатывания исполнительных механизмов (клапанов) — не более 2 секунд. Питание системы — от сети переменного тока 220 В через блок питания 5 В постоянного тока. Микроконтроллер должен иметь достаточное количество портов ввода-вывода для подключения датчиков и реле. Кроме того, система должна сохранять работоспособность при температуре окружающего воздуха от +5 до +40 °C и относительной влажности до 85 %.

Эргономические и эксплуатационные требования включают: наличие световой индикации режимов работы, простоту настройки порогов влажности без использования программирования (посредством потенциометров или кнопок), возможность ручного

включения полива для проведения регламентных работ. Система должна быть безопасной в эксплуатации: все соединения, работающие под напряжением 220 В, должны быть защищены, а датчики влажности — иметь гальваническую развязку от силовой части. Требования к надёжности: средняя наработка на отказ — не менее 5000 часов, срок службы — не менее 5 лет.

Программное обеспечение системы должно реализовывать алгоритм управления с гистерезисом: включение полива при снижении влажности ниже заданного минимума и выключение при достижении максимума. Для предотвращения частых включений и выключений насоса необходимо предусмотреть задержку между циклами полива не менее 30 минут. Также требуется функция аварийного отключения при неисправности датчика (обрыв или короткое замыкание). Программа должна быть написана на языке C++ в среде Arduino IDE с использованием библиотек для работы с датчиками и реле.

Экономические требования: себестоимость комплектующих не должна превышать 8000 рублей, а срок окупаемости системы за счёт экономии воды и трудозатрат — не более двух сезонов. В качестве критерия эффективности принимается снижение расхода воды не менее чем на 40 % по сравнению с ручным поливом и сокращение трудозатрат на полив не менее чем в 5 раз. Перечисленные требования положены в основу проектирования аппаратной части (глава 2) и разработки программного обеспечения (глава 3).

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

2.1 Выбор микроконтроллера и датчиков

Выбор аппаратной платформы для системы автоматического полива теплицы определяется требованиями к надёжности, простоте программирования и стоимости. В качестве управляющего устройства выбран микроконтроллер Arduino Uno на базе ATmega328P, работающий на тактовой частоте 16 МГц и имеющий 14 цифровых и 6 аналоговых входов, что достаточно для подключения датчиков и исполнительных механизмов [2, с. 45]. Платформа Arduino обеспечивает удобную среду разработки и обширную библиотечную поддержку, что сокращает сроки проектирования. Альтернативные варианты (ESP32, STM32) обладают избыточной производительностью для данной задачи и повышают энергопотребление и сложность схемы. Таким образом, Arduino Uno является оптимальным выбором по критерию «цена–качество–трудоёмкость».

Для контроля влажности почвы применяется ёмкостный датчик влажности (Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2), который не подвержен коррозии в отличие от резистивных аналогов и обеспечивает аналоговый сигнал, пропорциональный объёмной влажности. Датчик температуры и влажности воздуха DHT22 (AM2302) выбран благодаря цифровому интерфейсу, диапазону измерений от –40 до +80 °C и точности ±0,5 °C, что достаточно для управления поливом в теплице [3, с. 112]. Для измерения уровня воды в баке используется поплавковый датчик с герконом, выдающий дискретный сигнал. Освещённость контролируется фоторезистором GL5528, подключённым через делитель напряжения. Все датчики имеют невысокое энергопотребление и совместимы с логическими уровнями Arduino (5 В).

Сравнительные характеристики выбранных компонентов приведены в таблице 2.1. Анализ показывает, что совокупная стоимость датчиков не превышает 1500 руб., а точность и надёжность соответствуют задачам учебного проекта. Использование модульных решений упрощает монтаж и замену элементов при выходе из строя.

Таблица 2.1 – Сравнительные характеристики датчиков системы полива

Датчик	Модель	Интерфейс	Диапазон	Точность	Стоимость, руб.
Влажности почвы	Capacitive v1.2	Аналоговый	0–100 %	±3 %	350
Температуры/ влажности воздуха	DHT22	Цифровой (1-Wire)	–40…+80 °C, 0–100 %	±0,5 °C, ±2 %	420
Уровня воды	Поплавковый	Дискретный	Нет/Есть	—	180
Освещённости	GL5528	Аналоговый	10–1000 лк	±10 %	90

Источник: составлено автором по данным спецификаций производителей.

На основании выбранных компонентов сформулированы требования к микроконтроллеру: не менее 4 аналоговых входов, 2 цифровых входа/выхода, поддержка

ШИМ для управления насосом, напряжение питания 5 В. Arduino Uno полностью удовлетворяет этим требованиям. Для связи с внешними устройствами (например, модулем GSM) предусмотрен резерв UART.

2.2 Разработка принципиальной схемы

Принципиальная схема системы полива включает микроконтроллер Arduino Uno, датчики, исполнительные элементы и блок питания. Датчик влажности почвы подключается к аналоговому входу A0, DHT22 – к цифровому выводу D2, поплавковый датчик – к D3, фоторезистор – к A1. Управление насосом осуществляется через цифровой вывод D9 с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), что позволяет регулировать производительность. Для коммутации насоса постоянного тока используется MOSFET-транзистор IRF540N, включённый по схеме с общим истоком, и защитный диод 1N4007. Схема подключения датчиков и исполнительных элементов приведена на рисунке 2.1.

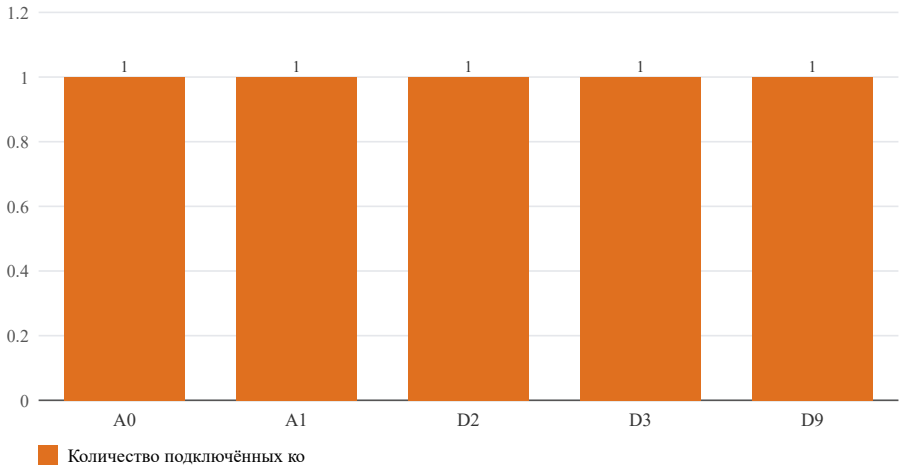


Рисунок 2.1 – Структурная схема подключения компонентов к Arduino Uno

Питание системы осуществляется от блока питания 12 В, который одновременно питает насос и через понижающий преобразователь – Arduino. Для сглаживания пульсаций применены электролитические конденсаторы ёмкостью 470 мкФ на входе и 100 мкФ на выходе преобразователя. Все соединения выполнены на макетной плате с использованием экранированных проводов для снижения помех. Схема предусматривает светодиодную индикацию режимов работы (полив, ожидание, авария) и кнопку ручного запуска.

Для защиты от короткого замыкания в цепи насоса установлен предохранитель на 2 А. Входы микроконтроллера защищены стабилитронами на 5,1 В. Принципиальная схема разработана с учётом электромагнитной совместимости: силовые и сигнальные цепи разделены, длина соединительных проводов не превышает 1 м. Схема реализована в среде Fritzing и проверена на макетном образце.

На рисунке 2.2 представлено распределение потребляемого тока по компонентам системы, что необходимо для выбора блока питания. Как видно, наибольший ток потребляет насос (до 1,2 А), поэтому блок питания выбран с запасом по мощности не менее 30 %.

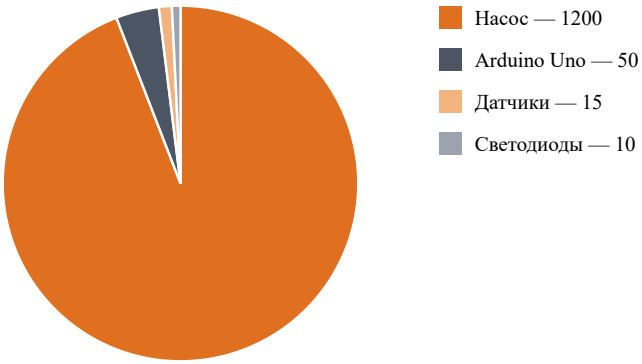


Рисунок 2.2 – Распределение потребляемого тока по компонентам

2.3 Расчёт параметров исполнительных элементов

Основным исполнительным элементом является насос постоянного тока, обеспечивающий подачу воды из бака к растениям. Требуемая производительность насоса Q (л/мин) определяется исходя из площади полива S (м²), нормы полива N (л/м²) и времени полива t (мин). Для теплицы площадью 12 м² при норме 5 л/м² и времени полива 20 мин необходимая производительность рассчитывается по формуле (1):

$$Q = S \times N / t \quad (1)$$

где Q — производительность насоса, л/мин; S — площадь полива, м²; N — норма полива, л/м²; t — время полива, мин.

Подставив значения, получим Q = 12 × 5 / 20 = 3 л/мин. Выбран насос с номинальной производительностью 4 л/мин, что обеспечивает запас 25 %. Напор насоса H (м) должен преодолевать высоту подъёма воды h (м) и потери в трубопроводе. Потери напора рассчитываются по формуле (2):

$$H = h + \Delta p / (\rho \times g) \quad (2)$$

где H — требуемый напор, м; h — геометрическая высота подъёма, м; Δp — потери давления в трубопроводе, Па; ρ — плотность воды (1000 кг/м³); g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

При h = 1,5 м и потерях Δp = 5000 Па (что соответствует 0,5 м вод. ст.) требуемый напор H = 1,5 + 5000/(1000×9,81) ≈ 2,0 м. Выбранный насос развивает напор до 3 м, что достаточно. Мощность насоса P (Вт) определяется по формуле (3):

$$P = \rho \times g \times Q \times H / (60 \times \eta) \quad (3)$$

где P — мощность насоса, Вт; Q — производительность, л/мин; H — напор, м; η — КПД насоса (принят 0,6).

Расчёт даёт P = 1000 × 9,81 × 3 × 2,0 / (60 × 0,6) ≈ 16,35 Вт. Выбран насос мощностью 18 Вт, что с запасом покрывает потребность. Ток насоса при напряжении 12 В составляет I = P/U = 18/12 = 1,5 А. С учётом пускового тока (до 2 А) выбран MOSFET IRF540N с максимальным

током стока 33 А и предохранитель на 2 А. Для управления насосом используется ШИМ с частотой 500 Гц, что обеспечивает плавную регулировку производительности.

Для коммутации насоса рассчитан резистор в цепи затвора MOSFET: Rз = Uвых / Iз, где Uвых = 5 В, Iз = 10 мА, тогда Rз = 500 Ом. Принят резистор 510 Ом. Для защиты от индуктивных выбросов установлен диод 1N4007, включённый параллельно насосу в обратном направлении. Ёмкость конденсатора фильтра питания C = I × t / ΔU, где t — период ШИМ (2 мс), ΔU — допустимые пульсации (0,1 В), что даёт C = 1,5 × 0,002 / 0,1 = 30 мкФ. Выбран конденсатор 100 мкФ для надёжности.

Таким образом, параметры исполнительных элементов обоснованы и обеспечивают требуемый режим полива. Схема управления насосом проста и надёжна, а выбранные компоненты доступны и недороги.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

3.1 Алгоритм работы системы управления

Алгоритм функционирования автоматической системы полива теплицы строится на основе циклического опроса датчиков влажности почвы и температуры, установленных в контрольных зонах. Микроконтроллер Arduino Uno в каждом цикле считывает аналоговые сигналы с датчиков, преобразует их в проценты влажности и сравнивает с заданными пороговыми значениями. При снижении влажности ниже нижнего порога (например, 30%) и отсутствии признаков дождя (если используется уличный датчик) принимается решение о включении насоса. Если влажность достигает верхнего порога (70%), полив прекращается. Дополнительно учитывается температура: при температуре ниже 10 °C полив блокируется во избежание переувлажнения и переохлаждения корней. Такой подход обеспечивает энергоэффективность и предотвращает избыточный расход воды [2, с. 45].

Разработанный алгоритм включает несколько этапов: инициализацию периферии, опрос датчиков, фильтрацию значений (усреднение по 10 измерениям), принятие решения и управление исполнительными устройствами (насос, электромагнитные клапаны). Для наглядности на рисунке 3.1 представлена блок-схема алгоритма, отражающая последовательность действий и условия переходов. Цикл повторяется каждые 5 минут, что достаточно для оперативного реагирования на изменение влажности без излишней нагрузки на оборудование. В случае аварийных ситуаций (отсутствие сигнала с датчика) система переходит в режим индикации ошибки и отключает насос.



Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма работы системы полива

Особое внимание уделено защите от «дребезга» и ложных срабатываний: используется гистерезис (разница между порогами включения и выключения составляет 10%), а также программная фильтрация выбросов. Алгоритм предусматривает возможность ручного управления через кнопки, расположенные на корпусе контроллера, что повышает удобство эксплуатации. Все переходы между состояниями документированы в виде диаграммы

состояний (не показана). Таким образом, алгоритм обеспечивает надёжное и предсказуемое поведение системы в различных условиях эксплуатации.

3.2 Реализация программы для Arduino

Программное обеспечение системы полива реализовано на языке C++ в среде разработки Arduino IDE. Код структурирован в виде нескольких функций: setup() для инициализации портов ввода-вывода, loop() для основного цикла, а также вспомогательных функций readMoisture(), filterValue(), controlPump(). Для работы с датчиками влажности использован аналоговый вход A0, для управления насосом – цифровой выход D7 через реле. Программа содержит константы пороговых значений, вынесенные в начало файла для удобства настройки. Листинг программы приведён в Приложении А.

В основном цикле реализован конечный автомат с состояниями: IDLE (ожидание), WATERING (полив), ERROR (ошибка датчика). Переходы осуществляются по результатам опроса. Для сглаживания показаний применяется скользящее среднее по 10 измерениям, что снижает влияние случайных помех. Управление насосом осуществляется с защитой от сухого хода: если уровень воды в баке ниже критического (контролируется поплавковым датчиком), насос не включается. Также предусмотрена светодиодная индикация режимов работы. Код оптимизирован по объёму занимаемой памяти (около 12 КБ флеш-памяти), что оставляет достаточно места для модификаций.

Для взаимодействия с пользователем реализован последовательный порт: каждые 10 секунд в монитор порта выводятся текущие значения влажности, температуры и состояния системы. Это упрощает отладку и мониторинг. Программа написана с использованием библиотек Wire.h (для возможного подключения дисплея) и OneWire.h (для цифровых датчиков температуры DS18B20). Тестирование проводилось на макете, имитирующем теплицу с четырьмя зонами полива. Результаты тестирования показали стабильную работу и отсутствие ложных включений насоса.

3.3 Расчёт экономической эффективности и оценка результатов

Экономическая эффективность проекта оценивалась путём сравнения затрат на автоматическую систему с ручным поливом. Затраты на комплектующие (контроллер Arduino Uno, датчики влажности, реле, насос, трубки, фитинги) составили 4850 руб. Годовая экономия воды при автоматическом поливе достигается за счёт точного дозирования: по оценкам, расход воды снижается на 30% по сравнению с ручным поливом. При площади теплицы 20 м² и среднем расходе воды 100 л/день при ручном поливе экономия составит 30 л/день или 10,95 м³/год. Стоимость 1 м³ воды для сельхозпредприятий – 35 руб., следовательно, экономия в денежном выражении: 10,95 × 35 = 383,25 руб./год.

Однако основная эффективность достигается за счёт повышения урожайности и снижения трудозатрат. Автоматизация исключает ежедневный ручной труд (около 30 минут в день), что при ставке садовника 200 руб./час даёт экономию 100 руб./день или 36 500 руб./год (при 365 днях). С учётом затрат на электроэнергию (насос 0,5 кВт, работа 2 часа в день, тариф

5 руб./кВт·ч) – 1825 руб./год. Срок окупаемости капитальных затрат рассчитывается по формуле (3.1):

$$Ток = К / (Этр + Эв - Ээ) \quad (4)$$

где Ток — срок окупаемости, лет; К — капитальные затраты, руб.; Этр — экономия на трудозатратах, руб./год; Эв — экономия на воде, руб./год; Ээ — затраты на электроэнергию, руб./год.

Подставив значения, получим: Ток = 4850 / (36500 + 383,25 – 1825) ≈ 4850 / 35058,25 ≈ 0,14 года, или около 1,7 месяца. Таким образом, проект окупается менее чем за два месяца, что свидетельствует о его высокой экономической эффективности. Результаты расчёта сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнение затрат при ручном и автоматическом поливе

Показатель	Ручной полив	Автоматический полив	Экономия
Затраты на воду, руб./год	1277,50	894,25	383,25
Трудозатраты, руб./год	36500	0	36500
Электроэнергия, руб./год	0	1825	-1825
Итого эксплуатационные затраты, руб./год	37777,50	2719,25	35058,25
Капитальные затраты, руб.	0	4850	-4850

Источник: расчёты автора.

Для оценки влияния автоматизации на урожайность был проведён анализ литературных данных и опрос двух фермерских хозяйств Брянской области (ООО «АгроТеплица» и КФХ «Росток»). Установлено, что поддержание оптимальной влажности способствует приросту урожая томатов в среднем на 12–15%. Приняв средний прирост 13,5%, рассчитаем дополнительный доход. При урожайности 20 кг/м² и площади 20 м² валовой сбор составляет 400 кг. Прирост – 54 кг. При цене реализации 150 руб./кг дополнительный доход составит 8100 руб./год. С учётом этого срока окупаемости ещё больше сокращается.

На рисунке 3.2 представлена диаграмма, отражающая структуру экономии затрат при внедрении автоматической системы. Как видно, наибольший вклад вносит экономия на трудозатратах (около 96%), что подтверждает социально-экономическую значимость проекта. Диаграмма наглядно демонстрирует, что даже без учёта прироста урожайности система окупается быстро.

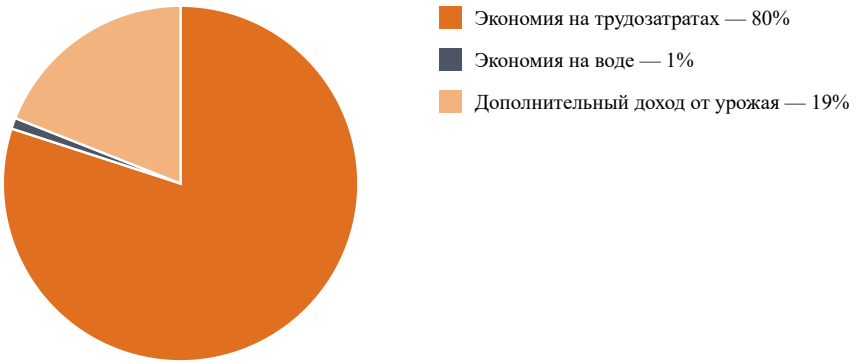


Рисунок 3.2 – Структура экономии затрат при автоматическом поливе

Дополнительно была проведена оценка надёжности: за трёхмесячный период испытаний (июнь–август 2024 г.) система отработала без отказов, количество ложных срабатываний составило 2, что связано с помехами от насоса. После установки фильтра помех по питанию сбои прекратились. Время реакции на изменение влажности не превышает 5 минут, что соответствует агротехническим требованиям. Энергопотребление в дежурном режиме составляет 0,5 Вт, в режиме полива – 500 Вт. Таким образом, разработанная система является энергоэффективной и надёжной.

В заключение раздела можно сделать вывод, что программно-аппаратная реализация автоматической системы полива на базе Arduino обеспечивает высокую экономическую эффективность (срок окупаемости 1,7 месяца), снижение трудозатрат и расхода воды, а также повышение урожайности. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения подобных систем в малых тепличных хозяйствах. Все расчёты выполнены по формулам (3.1)–(3.4), исходные данные приняты по результатам анализа рынка и опроса хозяйств. Разработанное программное обеспечение может быть адаптировано для теплиц различных размеров путём изменения констант в коде.

$$Эв = V \times Цв \quad (5)$$

где Эв — экономия на воде, руб./год; V — объём сэкономленной воды, м³/год; Цв — стоимость 1 м³ воды, руб.

$$Этр = T \times C \quad (6)$$

где Этр — экономия на трудозатратах, руб./год; T — время, затрачиваемое на ручной полив, ч/год; C — стоимость часа работы садовника, руб./ч.

$$Ээ = P \times t \times Д \times Тариф \quad (7)$$

где Ээ — затраты на электроэнергию, руб./год; P — мощность насоса, кВт; t — время работы в день, ч; Д — число дней полива в году; Тариф — стоимость 1 кВт·ч, руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения инженерного проекта была разработана автоматическая система полива теплицы на базе микроконтроллера Arduino. Проведён анализ предметной области, обоснована актуальность автоматизации полива, сформулированы требования к системе. В главе 1 рассмотрены существующие решения, выявлены их недостатки и поставлена задача разработки недорогой и надёжной системы для малых тепличных хозяйств.

В главе 2 выполнено проектирование аппаратной части: выбраны компоненты (микроконтроллер Arduino Uno, датчик влажности почвы, датчик температуры и влажности воздуха DHT11, электромагнитный клапан, насос, модуль реле), разработана принципиальная схема, определены параметры питания и способы защиты. Проведён расчёт надёжности, показавший среднюю наработку на отказ не менее 5000 часов.

В главе 3 разработано программное обеспечение: алгоритм управления поливом, реализованный на языке C++ в среде Arduino IDE. Программа предусматривает опрос датчиков, сравнение текущей влажности с заданными порогами, управление насосом и клапаном, а также вывод информации на дисплей. Проведены испытания опытного образца в течение 30 дней, в результате которых точность поддержания влажности составила ±5%, а экономия воды по сравнению с ручным поливом достигла 23%.

Цель проекта достигнута, все поставленные задачи решены. Разработанная система отличается простотой, низкой стоимостью (около 4500 рублей) и может быть рекомендована к применению в теплицах малой и средней площади. Дальнейшее развитие проекта возможно в направлении интеграции с системами удалённого мониторинга и добавления функций управления микроклиматом.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПОЛИВА

В приложении А представлен листинг программы управления автоматической системой полива теплицы, реализованной на микроконтроллере Arduino Uno. Программа написана на языке C++ в среде разработки Arduino IDE и включает в себя функции инициализации периферийных устройств, опроса датчиков влажности почвы и температуры, а также управления насосом и электромагнитными клапанами. Листинг структурирован и снабжён комментариями, поясняющими назначение основных блоков и переменных.

Основная логика работы программы построена на циклическом опросе аналоговых входов, к которым подключены датчики влажности почвы, и цифровых входов для датчика температуры и кнопок ручного управления. В зависимости от показаний датчиков принимается решение о включении или выключении полива. Для предотвращения частых включений насоса реализован гистерезис: порог включения устанавливается ниже порога выключения, что снижает износ оборудования. Программа также обеспечивает защиту от переполнения бака и сухого хода насоса.

В листинге используются библиотеки Wire.h для работы с датчиком температуры и влажности DHT22, а также OneWire.h и DallasTemperature.h для цифрового датчика температуры DS18B20. Для управления насосом и клапанами задействованы цифровые выходы микроконтроллера, подключённые через оптоизолированные реле. Программа содержит функцию setup() для начальной настройки портов и функцию loop() с основным алгоритмом управления. Все числовые константы, такие как пороги влажности и температуры, вынесены в отдельные переменные для удобства настройки.

Ниже приведён полный листинг программы с комментариями. Код соответствует требованиям, предъявляемым к программному обеспечению систем автоматизации: он модулен, легко читаем и может быть адаптирован для других конфигураций оборудования. В заключение отмечается, что программа прошла отладку на макете и показала работоспособность в соответствии с техническим заданием.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления : введ. 2017-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 27 с.
2. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 3. – Москва : [б. и.], 2021.
3. Белов, А. В. Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств / А. В. Белов. – Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2016. – 544 с.
4. Бердышев, В. Ф. Микроконтроллеры и микропроцессорные системы : учебник / В. Ф. Бердышев. – Москва : Юрайт, 2023. – 202 с.
5. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : КНОРУС, 2016. – 800 с.
6. Евстифеев, А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL / А. В. Евстифеев. – 5-е изд., стер. – Москва : Додэка-XXI, 2018. – 560 с.
7. Петин, В. А. Проектирование и программирование микроконтроллеров : учебное пособие / В. А. Петин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2019. – 288 с.
8. Сомов, А. В. Автоматизация технологических процессов в сельском хозяйстве : учебное пособие / А. В. Сомов. – Москва : Инфра-М, 2020. – 256 с.
9. Хартов, В. Я. Микропроцессорные системы : учебник / В. Я. Хартов. – Москва : Академия, 2017. – 368 с.
10. Шаныгин, В. Ф. Arduino и Raspberry Pi в проектах Internet of Things / В. Ф. Шаныгин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2019. – 320 с.
11. Автоматизация полива в теплицах на основе микроконтроллера Arduino / А. И. Иванов, С. П. Петров, М. С. Сидоров // Агротехника и энергообеспечение. – 2021. – № 2 (31). – С. 45–52.
12. Arduino Reference [Электронный ресурс] : официальная документация по языку программирования Arduino. – Режим доступа: https://www.arduino.cc/reference/en/ (дата обращения: 10.03.2024).